



TESIS - PM7501

**PENENTUAN INTERVAL WAKTU PEMELIHARAAN
PENCEGAHAN BERDASARKAN METODE ALOKASI
DAN OPTIMASI KEANDALAN PADA PERALATAN
SUB UNIT SISTEM SIRKULASI AIR DAN UAP
DI BLOK 1
(STUDI KASUS DI PT. XYZ)**

BAYU WIJAYA
NRP. 09211650013033

DOSEN PEMBIMBING
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN MANAJEMEN TEKNOLOGI
BIDANG KEAHLIAN MANAJEMEN INDUSTRI
FAKULTAS BISNIS DAN MANAJEMEN TEKNOLOGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Manajemen Teknologi (M.MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

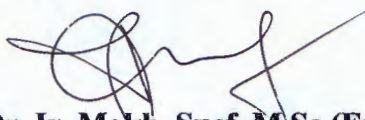
Oleh:
BAYU WIJAYA
NRP. 09211650013033

Tanggal Ujian : 18 Juli 2018
Periode Wisuda : September 2018

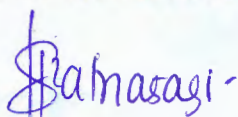
Disetujui oleh:



1. **Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.** (Pembimbing)
NIP. 1953 0516 1978 031001



2. **Dr. Ir. Mokh, Suef, M.Sc (Eng)** (Penguji)
NIP. 1965 0630 1990 031002



3. **Dr. Vita Ratnasari, S.Si., M.Si.** (Penguji)
NIP. 1970 0910 1997 022001

Dekan Fakultas Bisnis dan Manajemen Teknologi,




Prof. Dr. Ir. Udisubakti Ciptomulyono, M.Eng.Sc.
NIP. 1959 0318 1987 011001

**PENENTUAN INTERVAL WAKTU PEMELIHARAAN
PENCEGAHAN BERDASARKAN METODE ALOKASI DAN
OPTIMASI KEANDALAN PADA PERALATAN SUB UNIT
SISTEM SIRKULASI AIR DAN UAP DI BLOK 1
(STUDI KASUS DI PT. XYZ)**

Nama : Bayu Wijaya
NRP : 09211650013033
Dosen Pembimbing : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

PT. XYZ merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pembangkit tenaga listrik. Perusahaan ini memiliki 3 Blok PLTGU, yaitu Blok 1, Blok 2 dan Blok 3. Masing-masing blok memiliki sub unit sistem sirkulasi air dan uap. Sub unit ini merupakan sub unit yang kritis, selain dikarenakan umur peralatan yang sudah tua, apabila terdapat kegagalan pada peralatan ini, maka akan mengganggu proses pembangkitan, baik itu dapat menyebabkan berkurangnya pasokan listrik untuk konsumen atau bahkan menyebabkan kegagalan terhadap sistem pembangkit secara keseluruhan (trip). Peralatan-peralatan pada sub unit ini harus dijaga keandalannya supaya tetap tinggi. Perusahaan ini telah memiliki jadwal pemeliharaan pencegahan pada peralatan-peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap, tetapi seringkali terjadi kegagalan sebelum dilakukannya aktivitas pemeliharaan pencegahan, sehingga peralatan tidak beroperasi secara optimal. Agar peralatan dapat beroperasi secara optimal, maka perlu ditentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan yang tepat. Blok 1 memiliki jumlah frekuensi kegagalan dan *downtime* paling banyak. Dengan demikian, perlu ditetapkan interval waktu pemeliharaan pencegahan yang dapat menjaga keandalan peralatan tetap tinggi dan meminimalkan laju biaya total pemeliharaan pencegahan.

Terdapat empat langkah yang harus dikerjakan untuk mencapai tujuan dari penelitian ini berdasarkan metode alokasi dan optimasi keandalan. Langkah yang pertama adalah pengolahan data yang meliputi penentuan sub unit yang kritis, pembuatan diagram Pareto dan penggabungan data waktu antar kegagalan dengan melakukan ANAVA. Langkah kedua adalah penentuan nilai keandalan yang meliputi penentuan distribusi data waktu antar kegagalan, penentuan fungsi keandalan dan penentuan *mean time between failure* (MTBF). Langkah ketiga adalah penentuan interval waktu pemeliharaan pencegahan yang meliputi penentuan indeks kelayakan dengan metode AHP dan penentuan keandalan optimal. Langkah keempat adalah penentuan laju biaya total pemeliharaan pencegahan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju biaya total pemeliharaan pencegahan per siklus terendah didapatkan pada saat target keandalan sub unit sistem sirkulasi air dan uap sebesar 0,9, yaitu sebesar Rp. 47.489.673 per siklus. Dengan target keandalan sistem yang sama, interval waktu pemeliharaan pencegahan peralatan yang terpanjang dimiliki oleh sub-sub-sub unit LP *boiler circulating pump* 3A, yaitu sebesar 359 hari, dan yang terpendek dimiliki oleh sub-sub-sub unit *condensor*, yaitu sebesar 11 hari.

Kata Kunci: Interval waktu pemeliharaan pencegahan, alokasi keandalan, optimasi keandalan, AHP.

**DETERMINATION OF THE PREVENTIVE MAINTENANCE
TIME INTERVAL BASED ON RELIABILITY ALLOCATION
AND OPTIMIZATION METHOD ON THE EQUIPMENT OF
WATER AND STEAM CIRCULATION SYSTEM SUB UNIT
AT BLOCK 1
(CASE STUDY IN PT. XYZ)**

By : Bayu Wijaya
Student Identity Number : 09211650013033
Advisor : Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

PT. XYZ is a company engaged in the field of power plants. The company has 3 Blocks of PLTGU. Each block has a sub unit of water and steam circulation system. This sub unit is a critical sub unit, if there is a failure of this equipment, it will disrupt the generation process, whether it can lead to reduced power supply for consumers or even cause failure full of the generating system (trip). In order for the equipment to operate optimally, it is necessary to specify the appropriate preventative maintenance time interval. Block 1 has the highest frequencies of failure and downtime. Thus, it is necessary to establish a preventive maintenance time interval that can keep equipment reliability high and minimize the total cost of preventative maintenance. There are four steps that must be done to achieve the objectives of this study based on the reliability allocation and optimization method. The first step is data processing which includes the determination of critical sub units, making Pareto diagrams and combining time data between failures by doing ANAVA. The second step is the determination of the reliability value which includes the determination of time data between failure distribution, determination of reliability function and determination of mean time between failure (MTBF). The third step is the determination of time interval of preventive maintenance which includes determination of feasibility index with AHP method and determination of optimal reliability. The fourth step is to determine the total cost of preventive maintenance. The results showed that the lowest total cost of preventive maintenance per cycle was found when the target sub-unit reliability of the water and steam circulation system was 0,9, which is Rp. 47.489.673 per cycle. With the same system reliability target, the longest preventive maintenance time interval is owned by sub-sub-sub unit of LP boiler circulating pump 3A, which is 359 days, and the shortest is owned by the sub-sub-sub unit of condensor, which is 11 days .

Keywords: Preventive maintenance time interval, reliability allocation, reliability optimization, AHP.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadirat Allah Subhanahu wa ta'ala Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, yang selalu memberikan petunjuk, rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua. Tak lupa kita ucapkan sholawat serta salam kepada Nabi Muhammad shallallahu 'alaihi wa sallam. Alhamdulillah tesis ini dapat diselesaikan sesuai harapan. Penulisan ini sebagai salah satu persyaratan dalam memperoleh gelar Master Manajemen Teknik di MMT-ITS.

Banyak pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penulisan tesis ini. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orangtua dan keluarga tercinta yang selalu memberikan dukungan moral dan material yang tidak ada hentinya selama menjalani studi di MMT-ITS.
2. Bapak Dr. Ir. Mokh. Suef, M.Sc. (Eng) sebagai kepala MMT-ITS dan juga dosen penguji atas saran dan masukkan untuk pengerjaan tesis.
3. Bapak Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing tesis yang telah banyak memberikan waktu, ide, arahan dan bimbingan dalam pengerjaan tesis ini hingga selesai.
4. Ibu Dr. Vita Ratnasari, S.Si., M.Si. selaku dosen penguji atas saran dan masukkan untuk pengerjaan tesis.
5. Kepada bapak/ibu dosen yang telah banyak memberikan ilmu dan pengalamannya selama menjalani perkuliahan di MMT-ITS.
6. Kepada bapak/ibu staff MMT-ITS yang banyak memberikan bantuan dan arahnya selama menjalani perkuliahan.
7. Kepada teman-teman angkatan yang banyak membantu selama berjuang bersama di MMT-ITS.
8. Dan kepada semua pihak yang terlibat dalam membantu penulis dalam pengerjaan tesis ini hingga selesai yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata semoga Allah Subhanahu wa ta'ala melimpahkan berkah dan rahmat-Nya kepada kita semua.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

Bayu Wijaya

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.2.1 Batasan Penelitian	4
1.2.2 Asumsi Penelitian	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Sistematika Penulisan	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Manajemen Pemeliharaan	7
2.2 Konsep Keandalan (<i>Reliability</i>)	8
2.3 <i>Mean Time Between Failure</i> (MTBF)	8
2.4 <i>Mean Time To Repair</i> (MTTR)	9
2.5 Pemodelan Sistem Keandalan	9
2.6 Analisis Variansi	11
2.7 Karakteristik Kegagalan	15
2.8 Distribusi Data Kegagalan	16
2.8.1 Distribusi <i>Weibull</i>	17
2.8.2 Distribusi Eksponensial	18
2.8.3 Distribusi Normal	18
2.8.4 Distribusi Lognormal	19
2.9 Pengujian Distribusi	19
2.9.1 <i>Average Goodness of Fit</i> (AvGOF)	20

2.9.2 <i>Average of Plot (AvPlot)</i>	20
2.9.3 <i>Likelihood Function Ratio (LKV)</i>	20
2.10 <i>Metode Analytic Hierarchy Process (AHP)</i>	21
2.11 <i>Penetapan Target Keandalan yang Optimal</i>	23
2.12 <i>Optimasi Biaya Interval Pemeliharaan</i>	26
2.13 <i>Posisi Penelitian</i>	27
BAB 3 <i>METODE PENELITIAN</i>	29
3.1 <i>Studi Lapangan dan Identifikasi Permasalahan</i>	29
3.2 <i>Studi Pustaka</i>	29
3.3 <i>Penetapan Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian</i>	29
3.4 <i>Pengumpulan Data</i>	31
3.5 <i>Pengolahan Data, Penilaian Keandalan, Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dan Penentuan Laju Biaya Total Pemeliharaan Pencegahan</i>	31
3.6 <i>Penarikan Kesimpulan dan Pemberian Saran</i>	32
BAB 4 <i>PENGOLAHAN DATA DAN PENILAIAN KEANDALAN</i>	33
4.1 <i>Pemodelan Sistem Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap</i>	33
4.1.1 <i>Pemodelan Sub-Sub Unit Pemanasan Awal Air</i>	33
4.1.2 <i>Pemodelan Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Rendah</i> ..	34
4.1.3 <i>Pemodelan Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Tinggi</i> ...	34
4.1.4 <i>Pemodelan Sub-Sub Unit Ekspansi Uap</i>	35
4.2 <i>Pembuatan Diagram Pareto</i>	35
4.3 <i>Pengolahan Data Waktu Antar Kegagalan</i>	38
4.4 <i>Data Waktu Antar Kegagalan Sub-Sub-Sub Unit</i>	45
4.5 <i>Distribusi Data Waktu antar Kegagalan dan Parameter Keandalan</i>	46
4.6 <i>Fungsi Padat Peluang (<i>pdf</i>) Sub-Sub-Sub Unit</i>	47
4.7 <i>Laju Kegagalan (λ) Sub-Sub-Sub Unit</i>	49
4.8 <i>Mean Time Between Failure (MTBF) dan Keandalan pada saat MTBF Sub- Sub-Sub Unit</i>	51
4.9 <i>Keandalan (<i>Reliability</i>) Sistem</i>	53
4.9.1 <i>Keandalan (<i>Reliability</i>) Sub-Sub Unit Pemanasan Awal Air</i>	53

4.9.2 Keandalan (<i>Reliability</i>) Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Rendah.....	53
4.9.3 Keandalan (<i>Reliability</i>) Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Tinggi	54
4.9.4 Keandalan (<i>Reliability</i>) Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap	55
BAB 5 PENENTUAN INTERVAL WAKTU DAN LAJU BIAYA PEMELIHARAAN PENCEGAHAN	57
5.1 Penentuan Indeks Kelayakan	57
5.2 Optimasi Keandalan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap.....	62
5.3 Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap.....	64
5.4 Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan	67
5.4.1 Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan Sub-Sub-Sub Unit <i>Condensor (Tube)</i> Sebelum Optimasi	67
5.4.2 Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan Sub-Sub-Sub Unit yang Lain	67
5.4.3 Penurunan Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan per Siklus.....	69
5.5 Pembahasan.....	73
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN	75
6.1 Kesimpulan	75
6.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN A.....	79
LAMPIRAN B	109
LAMPIRAN C	115
LAMPIRAN D.....	121
LAMPIRAN E	125
BIOGRAFI PENULIS	131

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Gambaran umum proses pembangkit listrik pada PLTGU.....	1
Gambar 1.2	Tahapan sirkulasi air dan uap beserta peralatannya pada PLTGU	2
Gambar 2.1	Model keandalan sistem seri.....	10
Gambar 2.2	Model keandalan sistem paralel.....	10
Gambar 2.3	Model keandalan sistem kombinasi.....	11
Gambar 2.4	<i>Bathtub curve</i>	15
Gambar 2.5	Grafik optimasi waktu pemeliharaan pencegahan	26
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	30
Gambar 3.1	Sub-sub unit penyusun sub unit sistem sirkulasi air dan uap	33
Gambar 4.2	Sub-sub-sub unit penyusun sub-sub unit pemanasan awal air.....	33
Gambar 4.3	Sub-sub-sub unit penyusun sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah	34
Gambar 4.4	Sub-sub-sub unit penyusun sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah	35
Gambar 4.5	Sub-sub-sub unit penyusun sub-sub unit ekspansi uap.....	35
Gambar 4.6	Diagram Pareto komponen sub-sub-sub unit <i>condensor</i>	36
Gambar 4.7	Plot ACF	42
Gambar 4.8	Plot <i>residual versus observation order</i>	43
Gambar 4.9	Plot uji distribusi normal	43
Gambar 5.1	Struktur hirarki indeks kelayakan peralatan	58

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Frekuensi Kegagalan dan <i>Downtime</i> Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap pada Bulan Januari 2010 hingga Desember 2017	3
Tabel 2.1. Tabel Analisis Variansi.....	12
Tabel 2.2. Skala Kepentingan AHP	22
Tabel 4.1 Frekuensi Kegagalan Komponen Sub-Sub-Sub Unit <i>Condensor</i>	36
Tabel 4.2 Hasil Diagram Pareto untuk Penentuan Komponen Penyusun Sub-Sub-Sub Unit.....	37
Tabel 4.3 Data TBF Komponen <i>Valve</i> Sub-Sub-Sub Unit <i>Condensor</i> dari Sub-Sub Unit Pemanasan Awal Air dari Blok 1, 2 dan 3	39
Tabel 4.4 Hasil ANAVA Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap dari Data Waktu Antar Kegagalan Komponen Sub-Sub-Sub Unit dengan Tingkat Signifikansi 5%	40
Tabel 4.5 Data Waktu Antar Kegagalan Komponen Sub-Sub-Sub Unit <i>Condensor</i>	44
Tabel 4.6 Hasil ANAVA Komponen Sub-Sub-Sub Unit dari Data Waktu Antar Kegagalan Sub-Sub-Sub Unit dengan Tingkat Signifikansi 5%	45
Tabel 4.7 Data Waktu Antar Kegagalan Sub-Sub-Sub Unit.....	46
Tabel 4.8 Distribusi Data Waktu Antar Kegagalan dan Parameter Sub-Sub-Sub Unit	46
Tabel 4.9 Fungsi Padat Peluang (<i>pdf</i>) Sub-Sub-Sub Unit.....	47
Tabel 4.10 Laju Kegagalan (λ) Sub-Sub-Sub Unit.....	49
Tabel 4.11 <i>Mean Time Between Failure</i> (MTBF) dan Keandalan pada Saat MTBF Sub-Sub-Sub Unit	52
Tabel 4.12 Nilai Keandalan Sub-Sub Unit Pemanasan Awal Air.....	53
Tabel 4.13 Nilai Keandalan Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Rendah.....	54
Tabel 4.14 Nilai Keandalan Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Tinggi	55

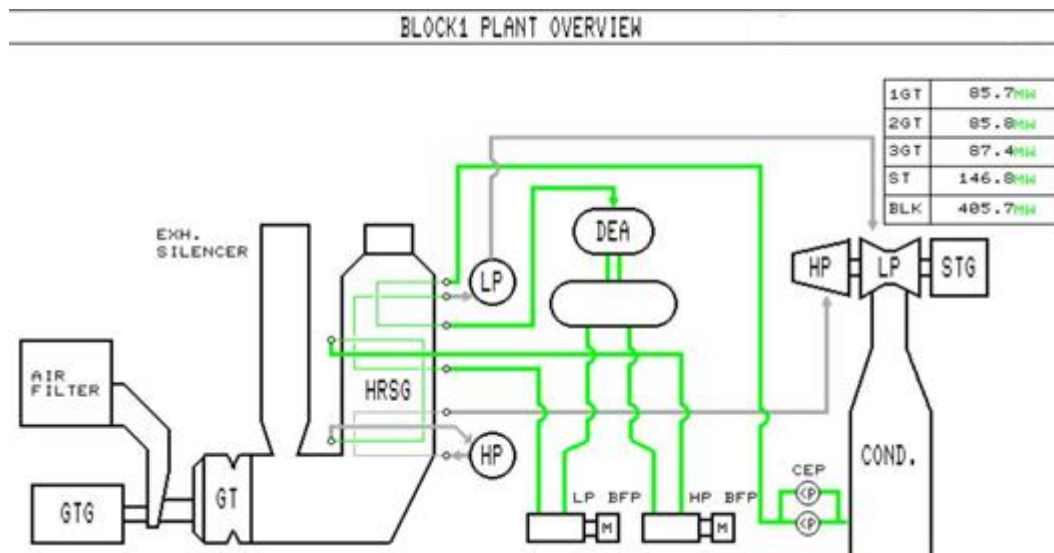
Tabel 4.15 Nilai Keandalan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap.....	55
Tabel 5.1 Perbandingan Berpasangan Antar Kriteria Seluruh Responden.....	59
Tabel 5.2 Perbandingan Berpasangan Antar Sub Kriteria dengan Kriteria Frekuensi Kegagalan Seluruh Responden.....	59
Tabel 5.3 Perbandingan Berpasangan Antar Sub Kriteria dengan Kriteria Waktu Pemeliharaan Seluruh Responden.....	60
Tabel 5.4 Perbandingan Berpasangan Antar Sub Kriteria dengan Kriteria Jumlah Komponen Seluruh Responden	60
Tabel 5.5 Perbandingan Berpasangan Antar Sub Kriteria dengan Kriteria Kemampuan Teknisi Seluruh Responden	60
Tabel 5.6 Indeks Kriteria	60
Tabel 5.7 Indeks Sub Kriteria.....	61
Tabel 5.8 Indeks Kelayakan Peralatan	61
Tabel 5.9 Keandalan Aktual ($t = 8.760$ jam)	62
Tabel 5.10 Keandalan Optimal dengan Keandalan Sub-Sub Unit, $R_G = 0,7$	63
Tabel 5.11 Rekapitulasi Alokasi Keandalan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap.....	64
Tabel 5.12 Rekapitulasi Alokasi Keandalan Sub-Sub-Sub Unit di Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap.....	65
Tabel 5.13 Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan yang Optimal	66
Tabel 5.14 Laju Biaya ($C(t)$) per Jam untuk Setiap Sub-Sub-Sub Unit	68
Tabel 5.15 Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dan Jumlah Pemeliharaan Pencegahan per Tahun	69
Tabel 5.16 Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan per Siklus	71
Tabel 5.17 Penurunan Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan per Siklus	72

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan hal yang penting dalam kebutuhan hidup manusia pada saat ini dan saat mendatang. Sebagian kebutuhan listrik di Pulau Jawa ditopang oleh PT. XYZ, yang merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pembangkit tenaga listrik yang sudah berdiri sejak tahun 1994. PT. XYZ memiliki 3 Blok PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap) yang terdiri dari Blok 1, Blok 2 dan Blok 3. Masing-masing blok tersebut memiliki 3 turbin gas, 3 *heat recovery steam generator* (HRSG) dan 1 turbin uap. Secara garis besar proses pembangkit tenaga listrik di PLTGU PT. XYZ dapat dilihat pada Gambar 1.1 Peralatan yang digunakan di PT. XYZ dapat digolongkan sebagai peralatan yang sudah tua, sehingga diperlukan proses pemeliharaan yang optimal agar keandalan peralatan tetap terjaga dan kejadian kegagalan pada peralatan dapat berkurang.

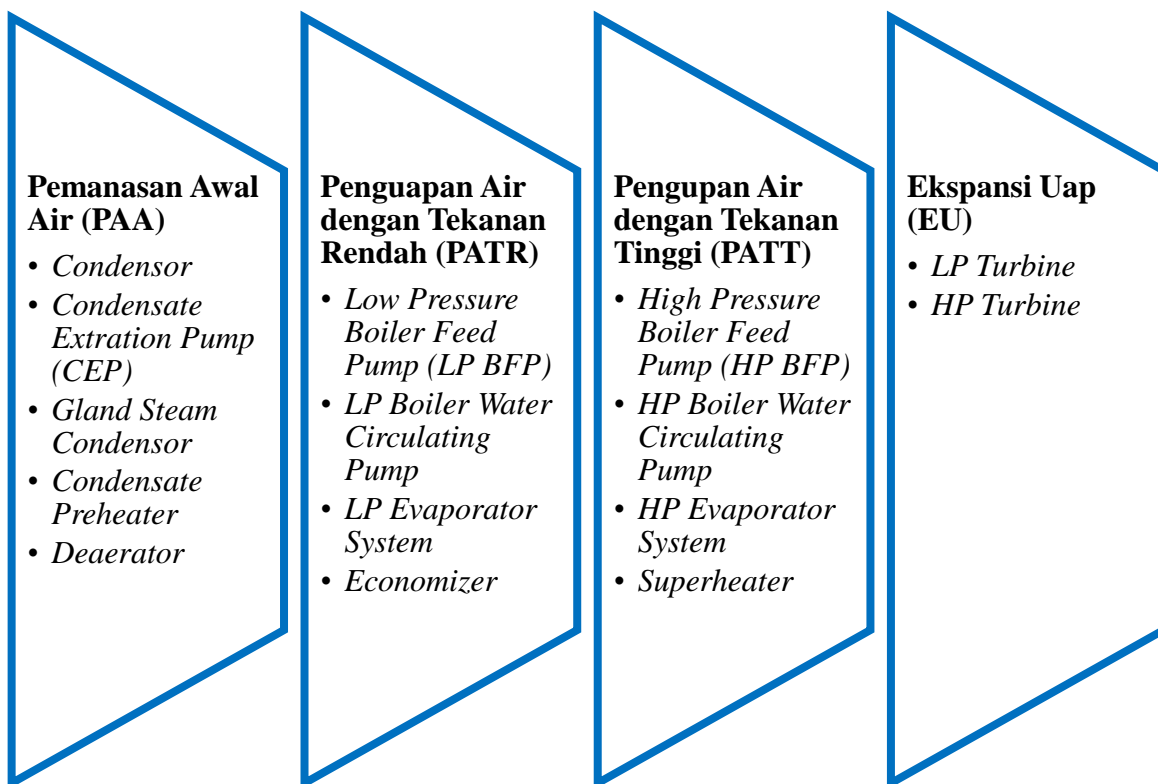


Gambar 1.1 Gambaran umum proses pembangkit listrik pada PLTGU

Sumber: Data aliran proses dari departemen operasi PLTGU PT. XYZ

Masing-masing blok memiliki sub unit sistem sirkulasi air dan uap. Sub unit ini merupakan sub unit yang kritis, dikarenakan apabila terjadi kegagalan, maka dapat menyebabkan berkurangnya pasokan listrik kepada konsumen atau bahkan

dapat menyebabkan kegagalan terhadap sistem pembangkit secara keseluruhan (trip). Sub unit sistem sirkulasi air dan uap memiliki empat tahapan proses, yaitu tahap pemanasan awal air (PAA), tahap penguapan air dengan tekanan rendah (PATR), tahap penguapan air dengan tekanan tinggi (PATT) dan tahap ekspansi uap (EU). Empat tahapan tersebut beserta peralatannya dapat dilihat pada Gambar 1.2. Peralatan untuk mensirkulasikan air dan uap ini harus dikendalikan kondisinya supaya kinerja pembangkit tenaga listrik tetap optimal.



Gambar 1.2 Tahapan sirkulasi air dan uap beserta peralatannya pada PLTGU

Peralatan-peralatan pada sub unit sistem sirkulasi air dan uap memegang peranan yang penting pada pembangkit tenaga listrik di PLTGU. Sisa gas panas dari pembuangan turbin gas akan digunakan sebagai media pemanas untuk memanaskan air di HRSG. Air yang telah dipanaskan di HRSG akan menjadi uap yang akan memutar sudu-sudu turbin uap. Dengan berputarnya poros turbin uap maka poros generator pun akan berputar dan akan menghasilkan listrik. Oleh karena itu, peralatan pada sub unit sistem sirkulasi air dan uap harus dijaga keandalannya agar tetap tinggi. Peralatan dari *condensor* sampai turbin uap merupakan peralatan

yang kritis, dikarenakan bila terdapat kegagalan pada peralatan ini maka proses pembangkit tenaga listrik akan terganggu, hal tersebut dapat menyebabkan berkurangnya pasokan listrik kepada konsumen atau bahkan menyebabkan kegagalan terhadap sistem pembangkit secara keseluruhan (trip). Oleh karena itu, sub unit sistem sirkulasi air dan uap mulai dari *condensor* sampai turbin uap dipilih sebagai obyek penelitian pada studi kasus penelitian ini.

Setiap unit blok PLTGU di PT. XYZ memiliki satu sub unit sistem sirkulasi air dan uap, sehingga secara keseluruhan terdapat tiga sub unit sistem sirkulasi air dan uap. Ketiga sub unit ini memiliki rangkaian peralatan yang sama akan tetapi berada pada unit blok yang berbeda, sehingga dilakukan perbandingan terhadap data frekuensi kegagalan, *downtime* dan biaya pemeliharaan. Tabel 1.1 menunjukkan perbandingan terhadap data frekuensi kegagalan dan *downtime* dari ketiga sub unit sistem sirkulasi air dan uap pada periode bulan Januari 2010 hingga bulan Desember 2017. Dari hasil perbandingan, jumlah frekuensi kegagalan dan *downtime* terbesar terdapat di sub unit sistem sirkulasi air dan uap Blok 1.

Tabel 1.1 Frekuensi Kegagalan dan *Downtime* Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap pada Bulan Januari 2010 hingga Desember 2017

No	Unit	Frekuensi Kegagalan	<i>Downtime</i> (Jam)
1	BLOK 1	258	1.326
2	BLOK 2	201	1.144
3	BLOK 3	157	805

Sub unit sistem sirkulasi air dan uap didukung oleh peralatan yang bekerja secara terus menerus, sehingga menyebabkan keandalan peralatan tersebut menurun. Menurunnya keandalan peralatan tersebut dapat menyebabkan proses pembangkitan listrik menjadi terganggu atau terhenti. Perusahaan ini telah memiliki jadwal pemeliharaan pencegahan pada peralatan-peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap, tetapi seringkali terjadi kegagalan sebelum dilakukannya aktivitas pemeliharaan pencegahan, sehingga peralatan tidak beroperasi secara optimal. Ketika banyak terjadi kegagalan dengan *downtime* yang besar, maka biaya pemeliharaan pun akan menjadi besar juga, oleh karena itu nilai keandalan harus

tetap dijaga supaya tetap tinggi. Target keandalan suatu rangkaian sistem dapat dicapai dengan alokasi dan optimasi keandalan sistem (Mettas, 2000). Penelitian ini akan menggunakan dua formulasi, yaitu formulasi perumusan untuk alokasi nilai keandalan dan formulasi biaya untuk digunakan dalam algoritma *non linear programming*. Nilai keandalan sistem didapatkan dari nilai keandalan sub-sub-sub sistem, yang nantinya akan digabungkan untuk dioptimasi (Malaiya, 2005).

Nilai keandalan setiap peralatan sangat penting diketahui untuk menentukan jadwal pemeliharaan pencegahan. Pemeliharaan pencegahan yang terjadwal dengan baik dapat mengurangi biaya-biaya yang disebabkan oleh berkurangnya efisiensi sistem atau pun berhentinya proses pembangkit tenaga listrik dikarenakan adanya kegagalan pada peralatan. Oleh karena itu, penentuan interval waktu pemeliharaan pencegahan dengan metode alokasi dan optimasi diperlukan untuk meningkatkan keandalan pada peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan dengan metode alokasi dan optimasi keandalan pada peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap di Blok 1 PT. XYZ.
2. Bagaimana menentukan laju biaya total pemeliharaan pencegahan pada peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap di Blok 1 PT. XYZ.

1.2.1 Batasan Penelitian

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Analisis keandalan hanya dilakukan pada peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap di PT. XYZ mulai dari kondensor hingga turbin uap.
2. Air yang dimaksud adalah air yang berperan di *heat recovery steam generator* (HRSG), bukan air yang sebagai media pendingin *condensor*.
3. Data kegagalan peralatan yang digunakan adalah data kegagalan pada periode Januari 2010 sampai Desember 2017.

4. Data biaya perbaikan yang digunakan meliputi biaya pemeliharaan pencegahan dan biaya kegagalan peralatan dari periode Januari 2010 sampai Desember 2017.
5. Tidak membahas kerusakan peralatan secara rinci.

1.2.2 Asumsi Penelitian

Asumsi yang diberlakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak terdapat kesalahan operator produksi dalam pengoperasian peralatan.
2. Suku cadang pengganti memiliki spesifikasi yang sama.
3. Kegagalan karena kesalahan desain awal sistem diabaikan.
4. Untuk peralatan yang tidak memiliki data kegagalan, diasumsikan nilai keandalannya sama dengan satu.
5. Kemampuan teknisi dalam melakukan pemeliharaan dan perbaikan pada peralatan dianggap sama dan telah sesuai dengan standar.
6. Perbaikan pada peralatan mampu mengembalikan kondisi peralatan seperti semula.
7. Bila terjadi kerusakan komponen pada saat aktivitas pemeliharaan pencegahan, maka hal ini dimasukkan ke dalam data kegagalan.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan dengan metode alokasi dan optimasi keandalan pada peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap di Blok 1 PT. XYZ.
2. Menentukan laju biaya total pemeliharaan pencegahan pada peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap di Blok 1 PT. XYZ.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian diharapkan dapat membantu PT. XYZ untuk melakukan analisis terhadap program pemeliharaan pencegahan pada sub unit sistem sirkulasi air dan uap di Blok 1.

1.5 Sistematika Penulisan

BAB 1 PENDAHULUAN

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

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori dasar yang dikembangkan dari berbagai teori dan referensi yang digunakan dalam proses penelitian.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Membahas metode pengerjaan pada penelitian untuk mencapai tujuan yang telah ditentukan dengan batasan dan asumsi yang telah ditentukan juga.

BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN PENILAIAN KEANDALAN

Pada bab ini menjelaskan analisis data yang meliputi penentuan distribusi data kegagalan, analisis keandalan, analisis laju kegagalan dan waktu rata-rata antar kegagalan sub unit sistem sirkulasi air dan uap.

BAB5 PENENTUAN INTERVAL WAKTU DAN LAJU BIAYA PEMELIHARAAN PENCEGAHAN

Bab ini menjelaskan bagaimana penentuan indeks kelayakan, optimasi keandalan masing-masing sub-sub-sub unit peralatan, dan penentuan interval pemeliharaan pencegahan yang optimal. Bab ini juga menjelaskan tentang biaya total pemeliharaan pencegahan yang optimal.

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan akhir dari penelitian ini dan saran untuk penelitian mendatang yang sekaligus menjadi penutup penelitian ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Manajemen Pemeliharaan

Pemeliharaan yang dilakukan secara rutin dan berulang diperlukan untuk menjaga peralatan agar berada dalam kondisi optimal, sehingga dapat dimanfaatkan sesuai dengan kapasitas rancangannya (Mishra dan Pathak, 2006). Menurut Mobley dkk. (2008), kegiatan pemeliharaan dibedakan menjadi tiga macam, yaitu:

a. Pemeliharaan Kerusakan (*Breakdown Maintenance*)

Pemeliharaan kerusakan atau *breakdown maintenance* merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan, kegagalan, atau kelainan fasilitas produksi. Pemeliharaan kerusakan biasanya digunakan pada peralatan yang tidak kritis, sehingga proses utama produksi tetap dapat berjalan normal.

b. Pemeliharaan Korektif (*Corrective Maintenance*)

Pemeliharaan korektif atau *corrective maintenance* merupakan jenis pemeliharaan yang dilakukan dengan cara mengidentifikasi penyebab kerusakan dan kemudian memperbaikinya sehingga mesin atau peralatan produksi dapat beroperasi secara normal kembali. Pemeliharaan korektif biasanya dilakukan pada mesin atau peralatan produksi yang sedang beroperasi secara abnormal, yaitu kondisi di mana peralatan masih dapat beroperasi tetapi tidak optimal.

c. Pemeliharaan Pencegahan (*Preventive Maintenance*)

Pemeliharaan pencegahan atau *preventive maintenance* merupakan jenis pemeliharaan yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan pada peralatan selama operasi berlangsung. Contoh aktivitas pemeliharaan pencegahan, yaitu melakukan penjadwalan untuk pelumasan (*lubrication*), pengecekan (*inspection*) dan pembersihan (*cleaning*) atau pergantian suku cadang secara rutin dan berkala. Pemeliharaan pencegahan biasanya dilakukan dalam harian, mingguan, bulanan ataupun tahunan.

2.2 Konsep Keandalan (*Reliability*)

Keandalan dapat diartikan sebagai peluang dimana sebuah komponen akan mampu melakukan suatu fungsi yang spesifik dalam kondisi operasi dan periode waktu tertentu (Lewis, 1998). Keandalan digunakan untuk menentukan penjadwalan pemeliharaan yang termasuk dalam salah satu ukuran keberhasilan sistem pemeliharaan itu sendiri. Dalam dunia industri, konsep keandalan digunakan dalam penentuan interval waktu penggantian komponen mesin. Menurut Ebeling (1997), fungsi keandalan terhadap waktu (t) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.1)$$

dengan:

$R(t)$ = keandalan pada waktu t

$F(t)$ = peluang kegagalan pada waktu t

$f(t)$ = fungsi padat peluang pada waktu t

Analisis keandalan, baik untuk proses, sistem ataupun peralatan menurut David (2011) secara umum dapat didekati dengan dua metode analisis yakni analisis kuantitatif dan analisis kualitatif. Analisis kuantitatif dibedakan menjadi dua bagian, yaitu menggunakan metode simulasi dan metode analisis statistik seperti *weibull analysis*. Dan dalam analisis kualitatif dapat dilakukan dengan beberapa cara, salah satunya dengan menggunakan metode *failure mode effect analysis (FMEA)*. Menurut Carlson (2012), metode ini dirancang untuk mengidentifikasi dan memahami potensi model kegagalan dan penyebabnya, serta dampaknya bagi sistem. Tujuan utama dilakukannya FMEA adalah untuk meningkatkan desain sistem, sub-sistem dan proses manufaktur.

2.3 Mean Time Between Failure (MTBF)

MTBF adalah rata-rata waktu operasi komponen atau sistem tanpa mengalami kegagalan. Rata-rata waktu ini tidak termasuk waktu yang diperlukan untuk melakukan perbaikan, saat perbaikan dan aktivitas lainnya seperti inspeksi, pemeliharaan pencegahan, dan lain-lain (Ebeling, 1997). Secara matematis MTBF dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$MTBF = \frac{\text{Waktu Operasi}}{\text{Jumlah Kegagalan}} \quad (2.2)$$

atau,

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.3)$$

Jika pemeliharaan yang dilakukan dapat mengembalikan keadaan peralatan ke kondisi seperti sebelum kegagalan terjadi, maka digunakan persamaan (2.2). Namun jika mampu mengembalikan peralatan seperti peralatan dengan kondisi baru, yang digunakan adalah persamaan (2.3).

2.4 Mean Time To Repair (MTTR)

MTTR adalah waktu rata-rata yang diperlukan untuk melakukan suatu perbaikan atau pemeliharaan yang dibutuhkan untuk mengembalikan suatu komponen ke kondisi dapat beroperasi kembali. MTTR ini diperoleh dengan menghitung total waktu pada setiap kali dilakukan suatu perbaikan dibagi dengan jumlah perbaikan yang dilakukan (Ebeling, 1997).

$$MTTR = \frac{\text{Waktu Perbaikan}}{\text{Jumlah Perbaikan}} \quad (2.4)$$

atau

$$MTTR = \int_0^{\infty} t h(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - H(t)) dt \quad (2.5)$$

dengan

t = waktu perbaikan

$h(t)$ = fungsi padat peluang

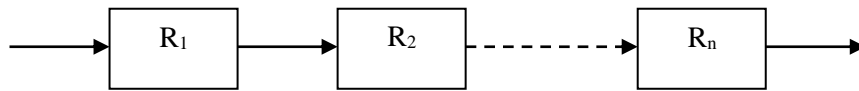
2.5 Pemodelan Sistem Keandalan

Sistem keandalan dapat dimodelkan dalam 3 bentuk yakni pemodelan sistem seri, sistem paralel dan sistem kombinasi yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

A. Sistem Seri

Sistem seri dapat menjalankan fungsinya jika seluruh komponen dalam sistem tersebut beroperasi. Apabila salah satu komponen pada sistem tidak beroperasi akibat kegagalan, maka keseluruhan sistem tidak akan bisa beroperasi. Blok diagram dengan susunan seri ditunjukkan pada

Gambar 2.1.



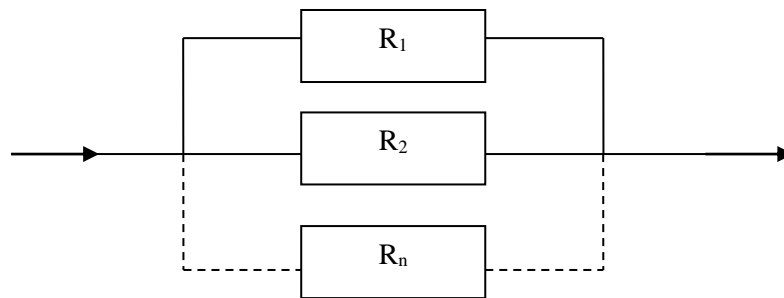
Gambar 2.1 Model keandalan sistem seri

Jika keandalan masing-masing komponen adalah R_1, R_2, \dots, R_n , maka keandalan dari sistem yang tersusun seri (R_s) adalah:

$$R_s = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.6)$$

B. Sistem Paralel

Sistem paralel dapat menjalankan fungsinya jika minimal satu komponen penyusunnya beroperasi. Sistem ini hanya gagal jika seluruh komponen penyusunnya mengalami kegagalan. Blok diagram dengan susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 2.2.



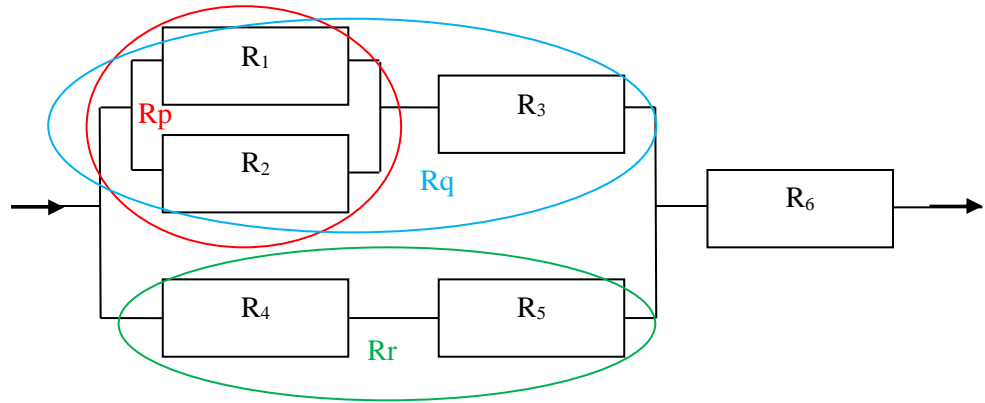
Gambar 2.2 Model keandalan sistem paralel

Jika keandalan masing-masing komponen adalah R_1, R_2, \dots, R_n , maka keandalan dari sistem yang tersusun paralel (R_p) adalah:

$$\begin{aligned} R_p &= 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \end{aligned} \quad (2.7)$$

C. Sistem Kombinasi

Sistem kombinasi merupakan gabungan antara sistem seri dengan sistem paralel. Gambar 2.3 menunjukkan diagram blok dari sistem kombinasi.



Gambar 2.3 Model keandalan sistem kombinasi

Nilai keandalan dari sistem yang tersusun secara kombinasi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$R_p = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)$$

$$R_q = R_p(R_3)$$

$$R_r = R_4(R_5)$$

maka,

$$R_{total} = [1 - (1 - R_q)(1 - R_r)](R_6) \quad (2.8)$$

2.6 Analisis Variansi

Analisis variansi (ANOVA) bertujuan untuk menggabungkan data waktu antar kegagalan sub unit sistem sirkulasi air dan udara Blok 1, Blok 2 dan Blok 3 serta komponen-komponen sub-sub unit, jika data tersebut berasal dari populasi yang sama.

A. Analisis Variansi

Analisis dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variansi sehingga dapat mengidentifikasi kontributor faktor. Dengan begitu, maka akurasi model dapat ditentukan.

Analisis matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari satu faktor atau lebih dengan satu level atau lebih (Montgomery, 2012). Perhitungan ANAVA untuk satu faktor yang dipilih secara tetap ditunjukkan pada Tabel 2.1, dan meliputi derajat bebas (DB), jumlah kuadrat (*sum of square*, SS), kuadrat tengah (*mean of square*, MS) dan F_{hitung} .

Tabel 2.1 Tabel Analisis Variansi

Sumber Variansi	DB	SS	MS	F_{hitung}
Faktor A	\mathcal{V}_A	SS_A	MS_A	F_A
Error	\mathcal{V}_{error}	S_{seror}	MS_{error}	
Total	\mathcal{V}_T	SS_T		

Dengan,

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_T &= \text{derajat bebas total} \\ &= N-1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_A &= \text{derajat bebas faktor A} \\ &= k_A-1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_{error} &= \text{derajat bebas error} \\ &= \mathcal{V}_T - \mathcal{V}_A \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} T &= \text{jumlah keseluruhan} \\ &= \sum_{i=1}^N y_i \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} CF &= \text{faktor koreksi} \\ &= \frac{T^2}{N} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} SS_T &= \text{jumlah kuadrat total} \\ &= \sum_{i=1}^N Y_i - CF \\ &= \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{y})^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned}
SS_A &= \text{jumlah kuadrat faktor A} \\
&= [\sum_{i=1}^{k_A} (\frac{A_i^2}{n_{A_i}})] - CF \quad (2.15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SS_E &= \text{jumlah kuadrat error} \\
&= SS_T - SS_A \quad (2.16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
MS_A &= \text{kuadrat tengah faktor A} \\
&= \frac{SS_A}{v_A} \quad (2.17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
MS_E &= \text{kuadrat error tengah faktor A} \\
&= \frac{SS_E}{v_A} \quad (2.18)
\end{aligned}$$

k_A = jumlah level faktor A

N = jumlah total percobaan

n_{Ai} = jumlah total pengamatan faktor A

B. Uji F

Tujuan dari uji F adalah untuk menunjukkan bukti adanya perbedaan pengaruh dari masing-masing faktor dalam eksperimen (Soejanto, 2009). Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan variansi *error* dan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor. Variansi *error* adalah variansi dari setiap individu dalam pengamatan yang timbul karena faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini untuk faktor yang tetap (*fixed*) adalah:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

H_1 : Sedikitnya ada satu pasangan μ yang tidak sama

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan bahwa tidak ada perbedaan rata-rata dari nilai respon yang dihasilkan dari perlakuan yang berbeda, akan tetapi penolakan H_0 mengindikasikan adanya perbedaan rata-rata dari nilai respon tersebut. Selain itu karena respon pada eksperimen tersebut dapat dimodelkan dalam bentuk (Montgomery, 2012):

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijkn} \quad (2.19)$$

Selain persamaan 2.19 hipotesis yang juga dapat digunakan pada pengujian ini adalah:

Untuk taraf faktor A $\rightarrow H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$

H_1 : paling sedikit ada satu τ tidak sama dengan 0

Kegagalan menolak H_0 mengindikasikan bahwa tidak ada pengaruh faktor A terhadap respon, sedangkan penolakan H_0 mengindikasikan ada pengaruh faktor A terhadap respon. Kegagalan menolak ataupun penolakan terhadap H_0 didasarkan pada nilai F_{hitung} yang dirumuskan (Soejanto, 2009):

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.20)$$

Kegagalan menolak H_0 pada masing-masing kasus dilakukan jika mengalami kondisi sebagai berikut:

$$\text{Untuk taraf faktor A} \rightarrow F_{hitung} < F_{\alpha, v_a, v_e} \quad (2.21)$$

Jika menggunakan perangkat komputasi statistik, kegagalan menolak H_0 dilakukan jika *P-Value* lebih besar daripada α (tingkat signifikansi) (Park, 1996).

C. Uji Asumsi *Residual*

Residual dapat didefinisikan sebagai (Montgomery, 2012):

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (2.22)$$

dengan

e_i = *residual*

Y_i = nilai pengamatan

\hat{Y}_i = nilai dugaannya

Pada analisis variansi terdapat asumsi bahwa *residual* bersifat bebas satu sama lain, mempunyai *mean* nol dan variansi yang konstan (identik), serta berdistribusi normal. Oleh karena itu, dalam setiap pendugaan model harus dilakukan pemeriksaan asumsi tersebut terpenuhi atau tidak.

1. Pengujian Independen

Uji ini digunakan untuk menjamin bahwa pengamatan telah dilakukan secara acak. Pengujian dilakukan dengan menggunakan plot *auto correlation function* (ACF). *Residual* dikatakan independen jika nilai korelasinya berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$.

2. Pengujian Identik

Uji ini digunakan untuk memenuhi apakah *residual* mempunyai penyebaran yang sama. Pengujian dilakukan dengan memeriksa plot e_i dan \hat{Y}_i (secara visual). Jika penyebaran datanya acak disekitar garis nol dan tidak menunjukkan pola tertentu, maka asumsi identik terpenuhi.

3. Pengujian Distribusi Normal

Normal probability plot pada perangkat komputasi statistik dapat digunakan untuk menyatakan *residual* suatu respon berdistribusi normal atau tidak. *Kolmogorov-Smirnov normality test* digunakan pada pengujian kenormalan *residual*. Hipotesis yang digunakan adalah:

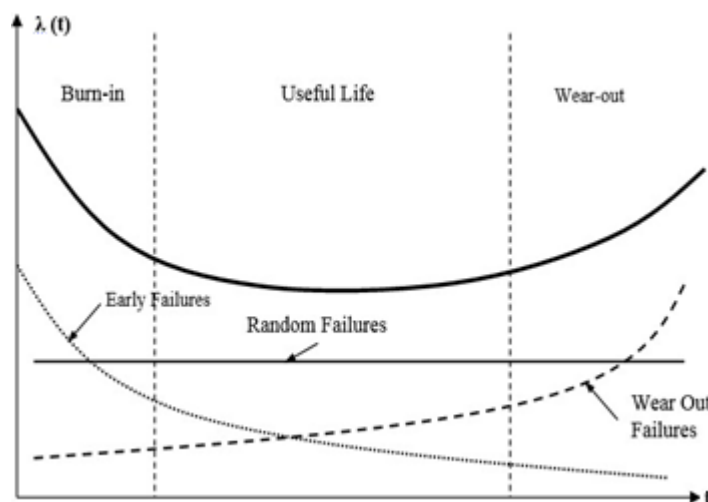
H_0 : *Residual* berdistribusi normal

H_1 : *Residual* tidak berdistribusi normal

Gagal menolak H_0 apabila $P\text{-Value} > \alpha$.

2.7 Karakteristik Kegagalan

Kegagalan pada sebagian besar operasi merupakan fungsi waktu (Slack, 2001). Pada banyak kasus, penggambaran laju kegagalan terhadap waktu kontinu akan menghasilkan *bathtub curve* seperti pada Gambar 2.4. *Bathtub curve* tidak menggambarkan tingkat kegagalan satu unit alat, tetapi menggambarkan tingkat kegagalan relatif seluruh populasi produk dari waktu ke waktu (Wilkins, 2002).



Gambar 2.4 *Bathtub curve* (Ebeling, 1997)

Pada Gambar 2.4 ditunjukkan tiga daerah laju kegagalan dari suatu sistem, yaitu:

A. Daerah Kegagalan Awal (*Burn In Zone*)

Pada daerah ini laju kerusakan menurun seiring dengan bertambahnya waktu. Kerusakan yang terjadi secara umum disebabkan karena munculnya kesalahan pada proses produksi, fabrikasi, pengoperasian yang tidak tepat dan ketrampilan operator yang belum memadai, sehingga dibutuhkan beberapa penyesuaian. Dibandingkan dua daerah yang lain, periode daerah ini berlangsung paling cepat.

B. Daerah Kegagalan Konstan (*Useful Life Time Zone*)

Pada periode ini terjadi laju kerusakan yang paling rendah dan cenderung konstan, disebut dengan istilah *constant failure rate (CFR)*. Selain itu pada periode ini kerusakan yang terjadi bersifat acak dan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dimana alat bekerja.

C. Daerah Kegagalan Meningkat (*Wear Out Zone*)

Pada periode ini terjadi peningkatan laju kerusakan yang cepat seiring bertambahnya waktu pemakaian, disebut dengan istilah *increasing failure rate (IFR)*. Peningkatan kerusakan pada alat disebabkan oleh keausan peralatan dan pola kerusakannya tidak dapat diprediksi.

Dengan menggunakan analisis *Weibull* diperoleh nilai β yang berbeda-beda untuk ketiga daerah tersebut. Nilai β merupakan parameter bentuk atau *slope parameter* yang menggambarkan kemiringan garis plot dalam grafik *Weibull*. Daerah *burn in zone* memiliki nilai $\beta < 1$, sedangkan *useful life time zone* memiliki nilai $\beta = 1$. Nilai β pada *wear-out zone* berkisar antara 1 dan 4 ($1 < \beta < 4$) dan *old age wear-out zone* bernilai lebih dari 4 ($\beta > 4$) (Nurmala, 2015).

2.8 Distribusi Data Kegagalan

Menurut teori keandalan, penentuan model probabilitas peralatan yang umumnya dinyatakan dalam distribusi statistik, merupakan langkah awal dalam menghitung keandalan suatu peralatan. Distribusi statistik yang umumnya digunakan berupa distribusi kontinu karena sangat sesuai untuk sistem yang beroperasi secara kontinu. Terdapat beberapa jenis distribusi kontinu yang

biasanya digunakan dalam analisis keandalan, yaitu distribusi *Weibull*, distribusi eksponensial, distribusi normal, dan distribusi lognormal. Dari beberapa distribusi statistik tersebut, akan didapatkan parameter distribusi yang selanjutnya digunakan untuk menentukan fungsi padat peluang atau *probability density function (pdf)*, keandalan dan rata-rata waktu antar kegagalan atau *mean time between failure (MTBF)*.

2.8.1 Distribusi *Weibull*

Distribusi *Weibull* diperkenalkan pertama kali oleh seorang professor asal Swedia yang bernama Waloddi Weibull pada tahun 1951. Ia menunjukkan kemampuan distribusi *Weibull* untuk digunakan dengan sampel berukuran kecil dan fleksibilitasnya untuk memberikan model yang baik untuk berbagai macam set data. Hal ini yang membuat distribusi *Weibull* menjadi sangat populer di kalangan insinyur dan praktisi kualitas dalam memodelkan data keandalan (Dodson, 2002). Fungsi padat peluang dari distribusi *Weibull* adalah (Ebeling, 1997):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2.23)$$

dimana, $f(t) \geq 0$ dan $t \geq 0$

η = parameter skala (*scale parameter*), $\eta > 0$

β = parameter bentuk (*shape parameter*), $\beta > 0$

Apabila distribusi waktu antar kegagalan suatu komponen atau sistem mengikuti distribusi *Weibull*, fungsi keandalan dan MTBF-nya dapat dinyatakan dalam persamaan-persamaan berikut (Ebeling, 1997):

a. Fungsi Keandalan

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.24)$$

b. *Mean Time Between Failure (MTBF)*

$$\text{MTBF} = \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (2.25)$$

Notasi Γ adalah fungsi gamma, dengan $\Gamma(n)$ dapat diperoleh melalui perhitungan dengan bantuan *Microsoft Excel*.

2.8.2 Distribusi Eksponensial

Distribusi eksponensial biasanya digunakan dalam pembentukan model distribusi umur pakai (*lifetime*) dan proses stokastik secara umum. Distribusi eksponensial menggambarkan distribusi umur pakai dengan *hazard rate* konstan (Balakrishnan dan Basu, 1995). Fungsi padat peluang dari distribusi eksponensial adalah (Ebeling, 1997):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0, \lambda > 0 \quad (2.26)$$

Apabila distribusi waktu antar kegagalan suatu komponen atau sistem mengikuti distribusi eksponensial, fungsi keandalan dan MTBF-nya dapat dinyatakan dalam persamaan-persamaan berikut (Ebeling, 1997):

- a. Fungsi Keandalan

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.27)$$

- b. *Mean Time Between Failure* (MTBF)

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.28)$$

2.8.3 Distribusi Normal

Distribusi normal adalah model utama untuk semua statistik terapan. Distribusi normal disebut juga sebagai distribusi Gauss yang ditemukan oleh Carl Friedrich Gauss (1777-1855). Fungsi padat peluang dari distribusi normal (Ebeling, 1997):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.29)$$

dengan:

σ = deviasi standar

μ = rata-rata (*mean*)

Apabila distribusi waktu antar kegagalan suatu komponen atau sistem mengikuti distribusi normal, fungsi keandalan dan MTBF-nya dapat dinyatakan dalam persamaan-persamaan berikut (Ebeling, 1997):

a. Fungsi Keandalan

$$R(t) = 1 - \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (2.30)$$

b. *Mean Time Between Failure* (MTBF)

$$\text{MTBF} = \mu \quad (2.31)$$

2.8.4 Distribusi Lognormal

Distribusi lognormal erat hubungannya dengan distribusi normal. Jika waktu kegagalan (t) adalah lognormal, maka $\ln t$ adalah normal. Analisis distribusi lognormal memanfaatkan hubungan tersebut dan kesederhanaan penggunaan *inverse* normal standar (Stephens, 2012). Fungsi padat peluang dari distribusi lognormal adalah (Ebeling, 1997):

$$f(t) = \frac{1}{t.\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [\ln t - \mu]^2\right\} \quad (2.32)$$

Apabila distribusi waktu antar kegagalan suatu komponen atau sistem mengikuti distribusi lognormal, fungsi keandalan dan MTBF-nya dapat dinyatakan dalam persamaan-persamaan berikut (Ebeling, 1997):

a. Fungsi Keandalan

$$R(t) = 1 - \Phi\left[\frac{1}{\sigma} \ln\left(\frac{t}{e^\mu}\right)\right] \quad (2.33)$$

dengan notasi Φ adalah *cumulative probability distribution function* dari fungsi lognormal.

b. *Mean Time Between Failure* (MTBF)

$$\text{MTBF} = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (2.34)$$

2.9 Pengujian Distribusi

Pada 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*.

2.9.1 Average Goodness of Fit (AvGOF)

AvGOF merupakan parameter uji yang memberikan nilai terhadap data waktu antar kegagalan berdasarkan *normalized index* dari *goodness of fit* (kesesuaian). Menurut Ebeling (1997), uji *goodness of fit* (kesesuaian) antara frekuensi hasil pengamatan dengan frekuensi yang diharapkan dapat digunakan untuk menganalisis kesesuaian data. Selain cara ini, terdapat pula alternatif lain yaitu uji *Kolgomorov-Smirnov* (KS), yang beranggapan bahwa distribusi variabel yang sedang diuji bersifat kontinu dan sampel diambil dari populasi sederhana. Dari uji KS 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.

2.9.2 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).

2.9.3 Likelihood Function 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).

Setelah melakukan pengujian terhadap model distribusi dengan ketiga metode pengujian tersebut, selanjutnya dilakukan pembobotan terhadap masing-masing parameter pengujian. Untuk menetapkan besaran bobot pada setiap parameter tersebut

digunakan nilai baku yang telah ditetapkan pada perangkat lunak *Weibull++6*.

2.10 Metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

AHP yang diperkenalkan oleh Thomas Saaty adalah suatu alat yang efektif dalam menghadapi pengambilan keputusan yang kompleks dan dapat membantu pengambilan keputusan untuk menetapkan prioritas dan membuat keputusan terbaik. Hal ini dilakukan dengan cara mengurangi kompleksitas keputusan menjadi serangkaian perbandingan berpasangan, kemudian mensintesis hasilnya. AHP membantu untuk menangkap kedua aspek subjektif dan objektif dari sebuah keputusan.

Tahapan-tahapan dalam menggunakan metode AHP adalah sebagai berikut (Saaty, 1998):

1. Pengidentifikasian Sistem

Mengidentifikasi sistem sesuai dengan tujuan dari penelitian.

2. Penyusunan Hirarki

Abstraksi struktur suatu sistem yang mempelajari fungsi interaksi antara komponen dan dampak yang ditimbulkan pada sistem disebut sebagai hirarki. Penyusunan hirarki atau struktur keputusan dilakukan untuk menggambarkan elemen sistem atau alternatif keputusan yang teridentifikasi.

3. Penentuan Prioritas

Penentuan prioritas dilakukan dengan cara membandingkan setiap elemen dengan elemen yang lainnya sehingga didapatkan nilai tingkat kepentingan elemen dalam bentuk kualitatif. Teknik ini disebut sebagai perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*). Untuk mengkonversikan hal tersebut ke dalam bentuk kuantitatif, digunakan skala kepentingan yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Skala Kepentingan AHP

Tingkat Kepentingan	Definisi	Penjelasan
1	Sama pentingnya	Kedua elemen sama pentingnya
3	Tidak jauh berbeda	Elemen yang satu sedikit lebih penting daripada yang lain (elemen yang satu, 3 kali lebih penting)
5	Lebih kuat dan jelas perbedaannya	Elemen yang satu lebih penting atau sangat penting daripada elemen yang lain (elemen yang satu, 5 kali lebih penting)
7	Lebih kuat dan mendominasi yang lain	Satu elemen jelas lebih penting daripada elemen yang lain (elemen yang satu, 7 kali lebih penting)
9	Mutlak lebih penting	Satu elemen mutlak lebih penting daripada elemen yang lain (elemen yang satu, 9 kali lebih penting)
2, 4, 6, 8	Nilai-nilai diantara dua pertimbangan yang berdekatan	Kolom tingkat kepentingan dapat diisi dua tanda silang (x) diantara dua kolom yang dimaksud

4. Pemeriksaan Indeks Konsistensi

Menurut Saaty (1998), tahapan-tahapan yang dilakukan pada pemeriksaan indeks konsistensi adalah:

- a. Menentukan hasil sintesis pertimbangan.
- b. Mengalikan setiap *entry* pada tiap-tiap kolom dari matriks dengan hasil sintesis pertimbangan.
- c. Membagi setiap *entry* dalam kolom jumlah baris dengan *entry* yang sesuai dari vektor prioritas untuk mendapatkan λ_{maks} .
- d. Menghitung *consistency index* (CI) dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$CI = \frac{\lambda_{maks} - n}{(n-1)} \quad (2.35)$$

dengan:

λ_{maks} = nilai eigen maksimum

n = ukuran matriks

e. Menghitung *consistency ratio* (*CR*)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.36)$$

dengan:

CI = *consistency index*

RI = *random index*

5. Penentuan Bobot Prioritas

Bobot prioritas hasil perbandingan berpasangan AHP mencerminkan relatif pentingnya elemen-elemen dalam hirarki. Terdapat 3 jenis bobot prioritas, yaitu:

- a. *Local priority weights* (LPW) menyatakan relatif pentingnya sebuah elemen dibandingkan dengan induknya.
- b. *Average priority weights* (APW) menyatakan relatif pentingnya sebuah elemen dibandingkan dengan satu set induknya.
- c. *Global priority weights* (GPW) menyatakan relatif pentingnya sebuah elemen terhadap tujuan keseluruhan.

2.11 Penetapan Target Keandalan yang Optimal

Setelah melakukan penilaian terhadap keandalan sistem maka dapat diketahui tercapai atau tidaknya keandalan sistem aktual dalam memenuhi target keandalan yang telah ditetapkan. Apabila belum tercapai, perlu dilakukan upaya untuk meningkatkan keandalan sistem tersebut. Menurut Mettas (2000), keandalan sistem ditentukan oleh keandalan dari masing-masing komponen atau sub sistem penyusun sistem tersebut. Keandalan sistem akan tinggi apabila keandalan komponen atau sub sistem penyusun sistem tersebut juga tinggi. Untuk mengalokasikan keandalan pada sub sistem penyusun suatu sistem, dapat digunakan *non linear programming* dan formulasi fungsi biaya.

Pengalokasian keandalan menghasilkan nilai keandalan sistem yang optimal dengan biaya minimal. Hal ini dapat dilakukan dengan memodelkan permasalahan menggunakan *non linear programming* sebagai berikut:

$$P: \min C = \sum_{i=1}^n C_i(R_i) \quad (2.37)$$

batasan: $R_S \geq R_G$, dan $R_{i,min} \leq R_i \leq R_{i,max}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$

dengan:

- P = permasalahan
- C = biaya sistem
- $C_i(R_i)$ = biaya sub sistem i
- R_i = keandalan sub sistem i
- n = jumlah sub sistem yang dipertimbangkan dalam optimasi
- $R_{i,min}$ = keandalan minimum sub sistem i
- $R_{i,max}$ = keandalan maksimum sub sistem i
- R_S = keandalan sistem
- R_G = keandalan sistem yang ingin dicapai

Persamaan 2.37 menunjukkan bahwa biaya komponen atau sub sistem sangat menentukan hasil optimasi. Namun pada kenyataannya, data mengenai biaya relatif sulit untuk didapatkan. Hal ini dikarenakan data historis dari komponen atau sub sistem tidak ada maupun alokasi biaya pada komponen atau sub sistem tersebut sulit untuk dilakukan. Menurut Mettas (2000), apabila hal tersebut terjadi, dengan memandang sifat-sifat dari fungsi biaya maka dapat diformulasikan hubungan antara biaya dengan fungsi keandalan sebagai berikut:

$$c_i(R_i, f_i, R_{i,min}, R_{i,max}) = e^{[(1-f_i)\frac{R_i-R_{i,min}}{R_{i,max}-R_i}]}$$
 (2.38)

Pada persamaan 2.38, terdapat tiga variabel yang bersifat eksponensial, yaitu:

1. f_i adalah indeks kelayakan (*feasibility index*) untuk peningkatan keandalan sistem. Indeks kelayakan menunjukkan tingkat kesulitan peningkatan keandalan dari sistem. f_i diasumsikan bernilai antara 0-1. Nilai ini tergantung pada kompleksitas dari desain, tingkat kekritisannya, ketersediaan suku cadang, kondisi operasi, dan lain-lain. Biaya yang dibutuhkan akan semakin besar apabila peningkatan keandalan suatu sistem semakin sulit. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.38, dimana besarnya biaya akan semakin mendekati tak terhingga apabila nilai f_i semakin kecil.
2. $R_{i,min}$ adalah nilai keandalan awal atau nilai keandalan sistem terkini. Nilai keandalan dari sistem ke- i untuk waktu operasi tertentu didapatkan dari

fungsi keandalan yang sesuai dengan distribusi data kegagalan komponen atau sub sistem yang bersangkutan.

3. $R_{i,max}$ adalah nilai keandalan maksimum yang mungkin dicapai oleh sistem. Besarnya nilai keandalan maksimum yang mungkin dicapai adalah 1. Biaya peningkatan keandalan sistem akan semakin cepat mencapai nilai tak terhingga apabila nilai keandalan maksimum yang mungkin dicapai suatu sistem semakin kecil.

Berdasarkan hasil pengamatan terhadap biaya peningkatan keandalan komponen, model fungsi biaya pada persamaan 2.38 dapat ditentukan. Adapun hal-hal yang perlu diamati, yaitu:

- a. Peningkatan biaya sebagai fungsi dari alokasi keandalan berawal dari keandalan minimum ($R_{i,min}$), nilai keandalan sekarang sampai keandalan maksimum yang mungkin dicapai oleh sistem ($R_{i,max}$).
- b. Biaya sebagai fungsi dari selang peningkatan dimana terdapat perbedaan antara nilai $R_{i,min}$ dan $R_{i,max}$.
- c. Nilai eksponen pada persamaan 2.38 mendekati tak terhingga saat keandalan mendekati titik maksimum yang mungkin dicapai. Biaya selalu meningkat seiring dengan peningkatan keandalan komponen.

Persamaan 2.38 memiliki peranan hanya sebagai pembobot biaya peningkatan nilai keandalan suatu sistem. Nilai keandalan yang dinilai meliputi nilai sekarang terhadap sistem lain dalam suatu sistem yang dioptimasi. Asumsi-asumsi yang digunakan pada penggunaan persamaan 2.38 adalah:

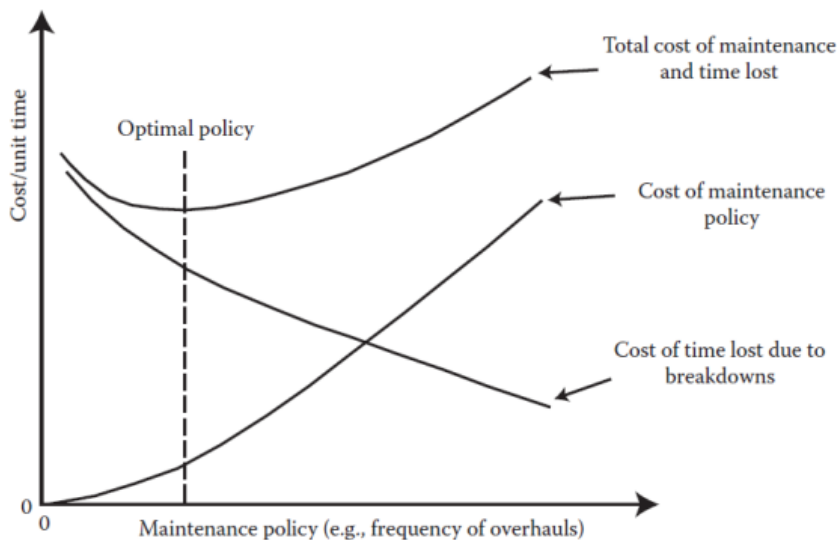
- a. Peningkatan biaya merupakan fungsi dari nilai keandalan sistem.
- b. Sistem keandalan yang tinggi memiliki biaya yang tinggi pula.
- c. Sistem keandalan yang rendah memiliki biaya yang rendah.

Untuk menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan ini, algoritma *non linear programming* pada perangkat lunak *Lingo* akan digunakan. Hal ini bertujuan sebagai alat bantu dalam optimasi alokasi keandalan dengan fungsi biaya yang dapat dilihat pada persamaan 2.38.

2.12 Optimasi Biaya Interval Pemeliharaan

Selama proses operasi, seluruh peralatan akan mengalami penurunan kinerja sehingga perlu dilakukan perencanaan interval waktu pemeliharaan pencegahan untuk menghindari kegagalan. Hal ini dilakukan agar perusahaan dapat meminimalkan pengeluaran biaya akibat terjadinya kegagalan. Oleh karena itu, dibutuhkan kegiatan pemeliharaan yang terjadwal dengan baik untuk menghindari pengeluaran biaya yang tidak diperlukan akibat kegagalan.

Pemeliharaan pencegahan dapat dilakukan apabila nilai laju kegagalan semakin tinggi. Pada *bathub curve*, hal ini ditunjukkan dengan distribusi *Weibull* yang bernilai $\beta > 1$. Daerah tersebut disebut juga sebagai *wear-out zone* (tahap kegagalan meningkat). Menurut Jardine (2013), kegagalan sistem atau peralatan yang terjadi di daerah ini dapat dicegah dengan pemeliharaan pencegahan. Oleh karena itu, penentuan interval waktu pemeliharaan pencegahan yang menghasilkan laju biaya pemeliharaan pencegahan yang minimal mutlak diperlukan. Hal ini dapat dilakukan dengan meminimalkan total biaya per unit waktu yang ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Grafik pengaruh interval waktu pemeliharaan pencegahan terhadap laju biaya pemeliharaan pencegahan (Jardine, 2013).

Persamaan yang digunakan untuk total biaya per unit waktu tersebut adalah:

$$C(t) = \frac{C_p \times R(t) + C_f \times (1 - R(t))}{T_p \times R(t) + M(t) \times (1 - R(t))} \quad (2.39)$$

dimana $M(t) = \int_0^{T_p} \frac{tf(t)dt}{(1-R(t))}$ sehingga persamaan 2.39 menjadi:

$$C(t) = \frac{C_p \times R(t) + C_f \times (1 - R(t))}{tR(t) + \int_0^t tf(t)dt} \quad (2.40)$$

dengan:

- C = total biaya per unit waktu
- C_p = biaya pemeliharaan pencegahan
- C_f = biaya perbaikan kegagalan
- R = nilai keandalan
- f = fungsi padat peluang dari kegagalan peralatan
- M = waktu rata-rata antar kegagalan
- t = umur pemeliharaan pencegahan peralatan

2.13 Posisi Penelitian

Sutanto (2011) melakukan penelitian yang berjudul “Optimalisasi Interval Waktu Penggantian Komponen Mesin Packer Tepung Terigu Kemasan 25 kg di PT. X.” Penelitian ini bertujuan untuk menentukan interval waktu optimal untuk *preventive maintenance* pada sub unit mesin packer. Hasil dari penelitian ini adalah didapatkannya waktu optimal untuk melakukan *preventive maintenance* dengan laju biaya terendah dan dapat menghemat biaya pemeliharaan hingga 14,6%.

Nurmala (2015) melakukan penelitian yang berjudul “Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan serta Laju Biayanya Berdasarkan Alokasi dan Optimasi Keandalan pada Sub Unit Sintesa Unit Urea di PT. X.” Penelitian ini bertujuan untuk menentukan interval waktu dan laju biaya total pemeliharaan pencegahan pada peralatan sub unit sintesa unit urea di PT. X. Hasil dari penelitian ini adalah didapatkannya interval waktu pemeliharaan pencegahan peralatan yang terpanjang dimiliki oleh sub-sub-sub unit pemanas amoniak, yaitu sebesar 98,3 hari, dan yang terpendek dimiliki oleh sub-sub-sub unit karbamat kondensat 1, yaitu sebesar 27,2

hari dan laju biaya pemeliharaan pencegahan terendah didapatkan pada saat target keandalan sub unit sintesa sebesar 0,9, yaitu sebesar Rp. 28.115.726.

Kristianto (2017) melakukan penelitian yang berjudul “Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dan Jumlah Tenaga Kerja pada Peralatan Sub Unit RKC 3 di PT. X Pabrik Tuban.” Penelitian ini bertujuan untuk menentukan interval waktu pencegahan dan jumlah tenaga kerja pada sub unit RKC 3 yang dapat meminimalkan laju biaya pemeliharaan pencegahan. Hasil dari penelitian ini adalah didapatkannya interval waktu pemeliharaan pencegahan untuk sub unit RKC 3 adalah sebesar 3743,28 jam. Jumlah tenaga kerja yang dapat meminimalkan laju biaya pemeliharaan pencegahan adalah sebanyak 4 orang. Laju biaya pemeliharaan pencegahan yang minimum yaitu sebesar 33.100/jam dengan keandalan dan ketersediaan sub unit RKC 3 sebesar 96,7% dan 99,86%.

BAB 3

METODE PENELITIAN

Proses penelitian harus memiliki metode yang terstruktur agar mendapatkan hasil yang benar sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Secara garis besar langkah-langkah dalam melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi lapangan dan identifikasi permasalahan.
2. Studi pustaka.
3. Penetapan perumusan masalah dan tujuan penelitian.
4. Pengumpulan data.
5. Pengolahan data, penilaian keandalan, penentuan interval waktu pemeliharaan pencegahan dan penentuan laju biaya total pemeliharaan pencegahan.
6. Penarikan kesimpulan dan pemberian saran.

Tahapan dari penelitian ini secara rinci dapat dilihat pada Gambar 3.1.

3.1 Studi Lapangan dan Identifikasi Permasalahan

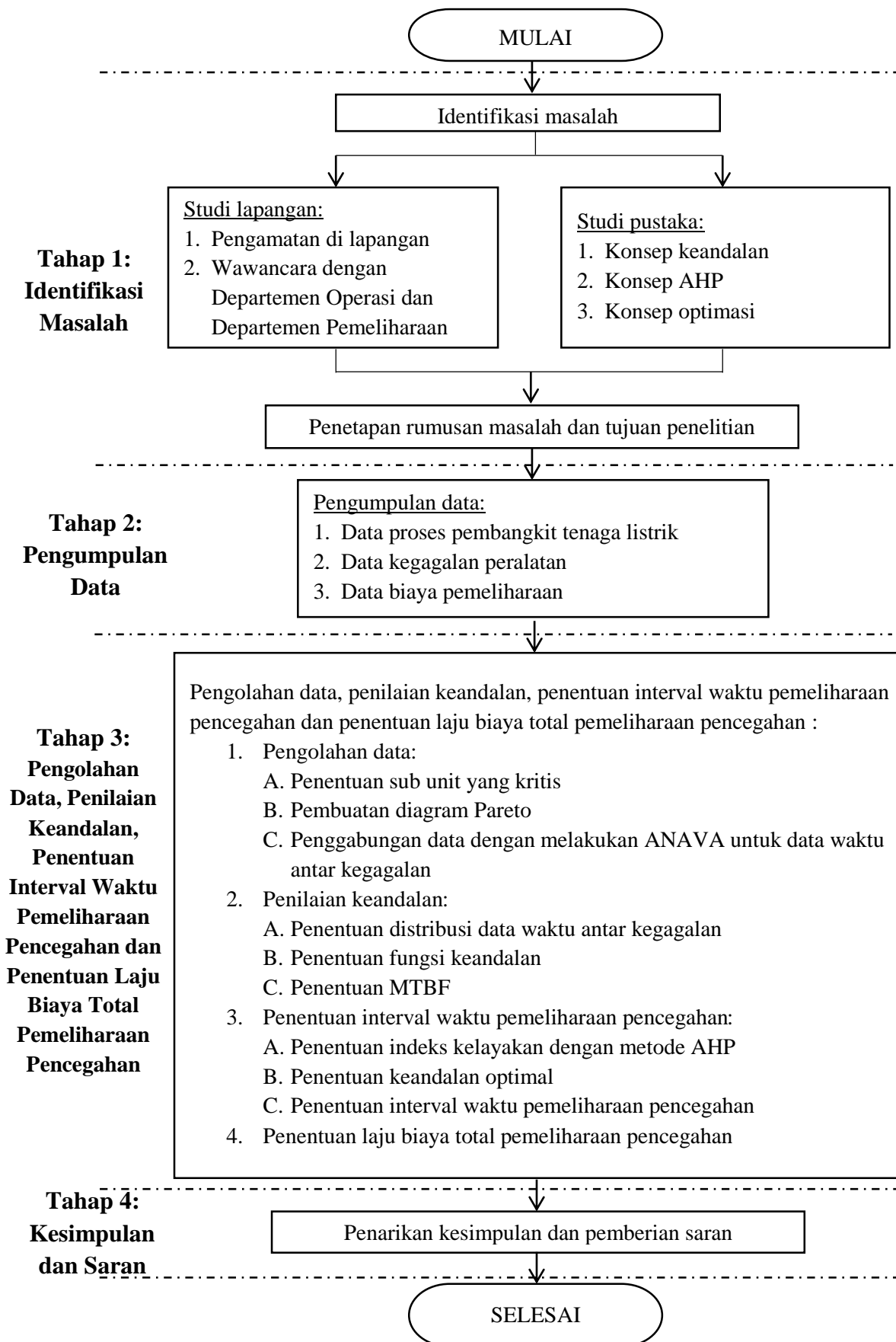
Studi lapangan dilakukan pada peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap di PT XYZ. Untuk melakukan identifikasi permasalahan yang terjadi maka dikumpulkan data kegagalan yang diperoleh dari *Work Order* pada bagian pemeliharaan.

3.2 Studi Pustaka

Studi pustaka merupakan langkah yang penting dalam melakukan penelitian ini agar mendapatkan teori yang berkaitan dengan permasalahan yang dihadapi oleh perusahaan. Teori tersebut didapatkan dari *text book* maupun jurnal-jurnal yang berhubungan dengan penelitian ini.

3.3 Penetapan Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Berdasarkan studi lapangan, identifikasi permasalahan dan studi pustaka yang telah dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah menetapkan perumusan masalah dan tujuan dari penelitian.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.4 Pengumpulan Data

Data yang perlu dikumpulkan untuk mengerjakan penelitian ini adalah data *Work Order*. Data ini berisi pekerjaan yang harus dilakukan oleh bagian pemeliharaan dimana di dalamnya terdapat data kegagalan dan biaya pemeliharaan.

3.5 Pengolahan Data, Penilaian Keandalan, Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dan Penentuan Laju Biaya Total Pemeliharaan Pencegahan

Langkah pertama pada tahap ini adalah melakukan konversi data *downtime* menjadi data waktu antar kegagalan atau *Time Between Failure* (TBF). Kemudian melakukan ANAVA untuk data TBF Blok 1, Blok 2 dan Blok 3. Selanjutnya melakukan ANAVA lagi untuk data TBF dari komponen dari sub-sub-sub unit sehingga didapatkan jumlah data TBF persub-sub-sub unit sebanyak lebih dari 10 data. Langkah berikutnya adalah melakukan pengolahan data yang dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* untuk analisa keandalan dengan langkah sebagai berikut:

1. Memasukkan data kegagalan yang telah diperoleh.
2. Menentukan distribusi data waktu antar kegagalan dengan membandingkan *Goodness of Fit*, *Plot Fit* dan *Likelihood Function Value*.
3. Menentukan fungsi padat peluang (pdf) untuk kegagalan, keandalan peralatan dan fungsi padat peluang untuk peralatan.

Pengolahan data pada penelitian ini juga diperlukan bantuan perangkat lunak *Expert Choice* untuk menentukan indeks kelayakan peralatan dengan menggunakan metode *analytical hierarchy process* (AHP). Diperlukan juga perangkat lunak *Lingo* untuk menentukan alokasi keandalan masing-masing sub-sub peralatan sirkulasi air dan uap supaya keandalan sistem yang diinginkan dapat dicapai dengan biaya yang minimal. Dan yang terakhir diperlukan juga perangkat lunak *Microsoft Excel* untuk melakukan interpolasi saat menentukan alokasi keandalan pada masing-masing sub-sub peralatan sirkulasi air dan uap.

3.6 Penarikan Kesimpulan dan Pemberian Saran

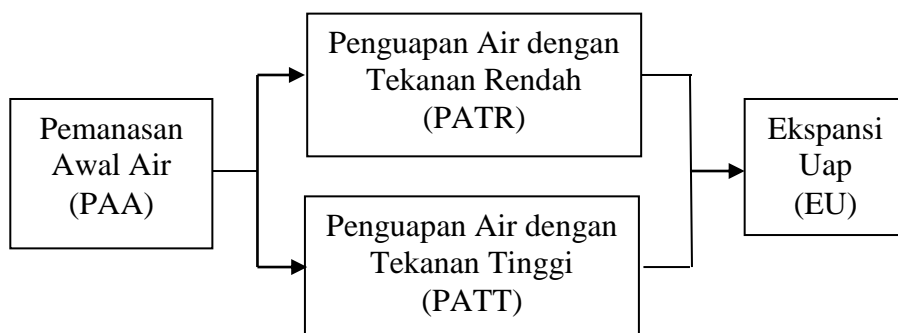
Pada langkah ini akan dipaparkan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan pemberian saran untuk penelitian yang akan datang.

BAB 4

PENGOLAHAN DATA DAN PENILAIAN KEANDALAN

4.1 Pemodelan Sistem Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap

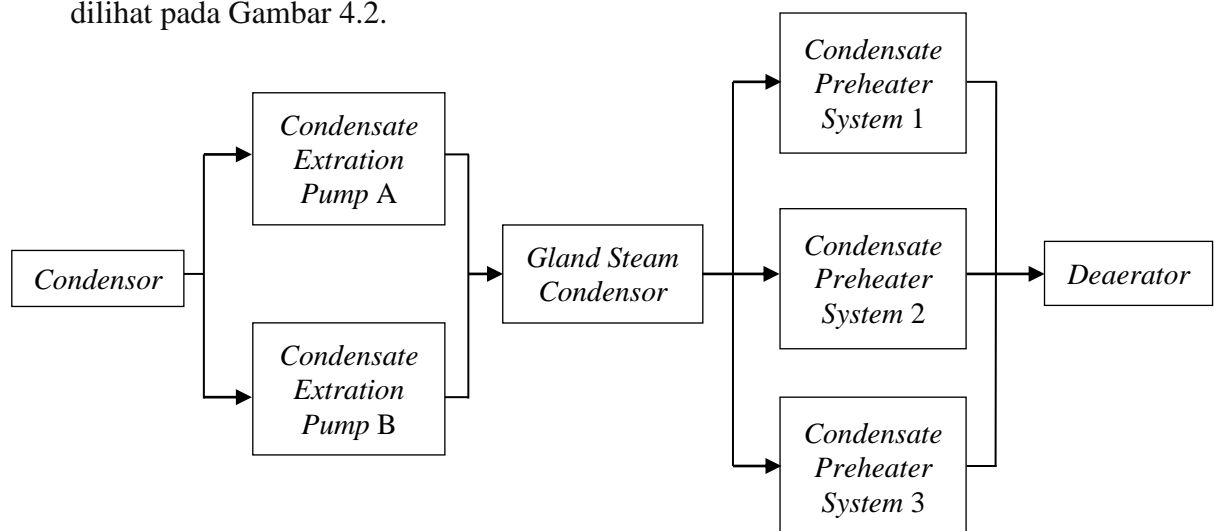
Sub unit sistem sirkulasi air dan uap disusun oleh sub-sub unit pemanasan awal air (PAA), sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah (PATR), sub-sub unit penguapan air dengan tekanan tinggi (PATT) dan sub-sub unit ekspansi uap (EU) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Sub-sub unit penyusun sub unit sistem sirkulasi air dan uap

4.1.1 Pemodelan Sub-Sub Unit Pemanasan Awal Air

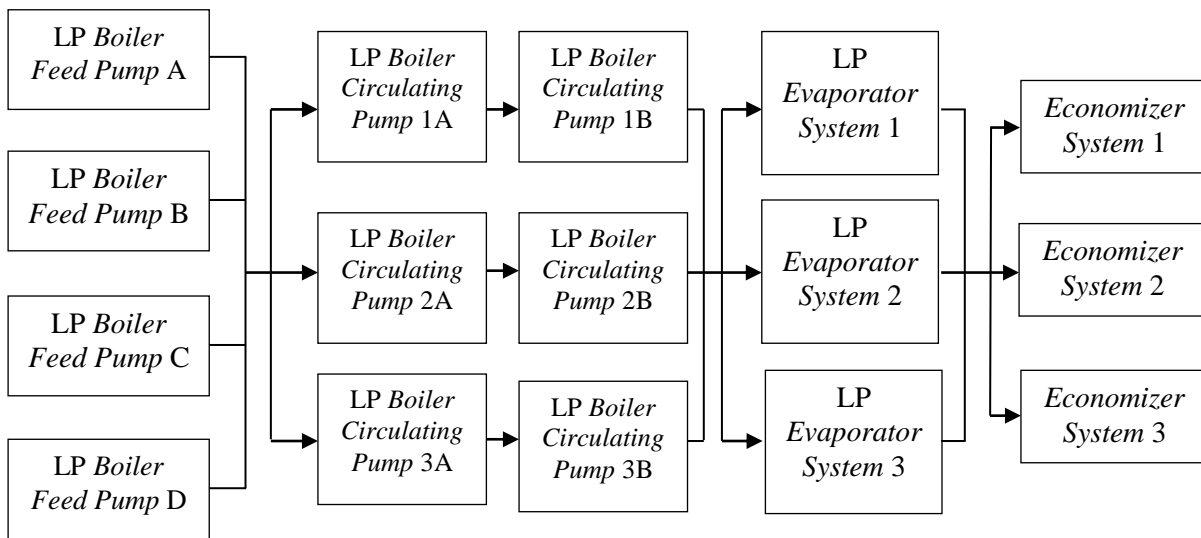
Sub-sub unit pemanasan awal air berfungsi untuk memanaskan air yang berasal dari kondensor menuju *deaerator*, sehingga siap dipakai untuk proses selanjutnya. Peralatan yang berperan pada sub-sub unit pemanasan awal air dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Sub-sub-sub unit penyusun sub-sub unit pemanasan awal air

4.1.2 Pemodelan Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Rendah

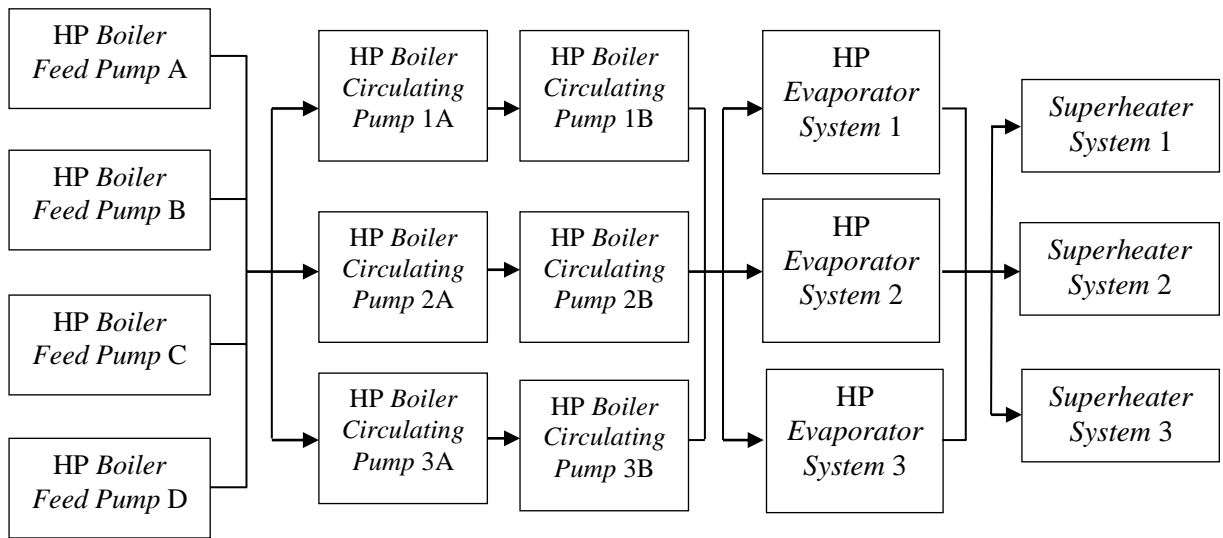
Sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah berfungsi untuk merubah air yang sudah dipanaskan di proses sebelumnya menjadi uap dengan tekanan rendah, sehingga uap siap dipakai untuk proses selanjutnya. Peralatan yang berperan pada sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Sub-sub-sub unit penyusun sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah

4.1.3 Pemodelan Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Tinggi

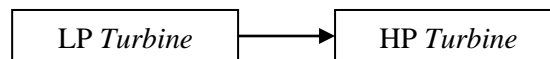
Sub-sub unit penguapan air dengan tekanan tinggi berfungsi untuk merubah air yang sudah dipanaskan di proses sebelumnya menjadi uap dengan tekanan tinggi, sehingga uap siap dipakai untuk proses selanjutnya. Peralatan yang berperan pada sub-sub unit penguapan air dengan tekanan tinggi dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Sub-sub-sub unit penyusun sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah

4.1.4 Pemodelan Sub-Sub Unit Ekspansi Uap

Sub-sub unit ekspansi uap berfungsi untuk merubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Peralatan yang berperan pada sub-sub unit ekspansi uap dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Sub-sub-sub unit penyusun sub-sub unit ekspansi uap

4.2 Pembuatan Diagram Pareto

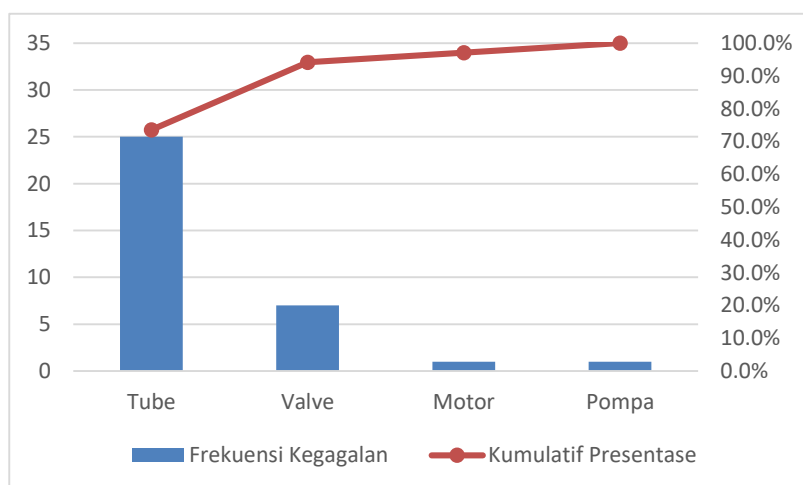
Diagram Pareto berfungsi untuk menentukan komponen penyusun sub-sub-sub unit dari frekuensi kegagalan komponen sub-sub-sub unit. Data kegagalan komponen setiap sub-sub-sub unit dikumpulkan dan dihitung frekuensi kegagalan komponen sub-sub-sub unit. Frekuensi kegagalan komponen sub-sub-sub unit *condensor* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Frekuensi Kegagalan Komponen Sub-Sub-Sub Unit *Condensor*

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Tube</i>	25	73.5%	73.5%
2	<i>Valve</i>	7	20.6%	94.1%
3	<i>Motor</i>	1	2.9%	97.1%
4	Pompa	1	2.9%	100.0%
Total		34	100%	

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*

Langkah selanjutnya adalah membuat diagram Pareto dengan data frekuensi kegagalan komponen sub-sub-sub unit. Dari hasil diagram Pareto tersebut diambil 20% komponen penyebab kegagalan yang mengakibatkan 80% kegagalan sub-sub-sub unit. Diagram Pareto dari komponen sub-sub-sub unit *condensor* ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Diagram Pareto komponen sub-sub-sub unit *condensor*

Dari Gambar 4.6 didapatkan dua komponen yang menyebabkan 80% kegagalan sub-sub-sub unit *condensor*, yaitu *tube* dengan frekuensi kegagalan sebanyak 25 kali dan *valve* dengan frekuensi kegagalan sebanyak 7 kali. Diagram Pareto dari 42 sub-sub-sub unit lainnya ditunjukkan pada Lampiran A. Tabel 4.2 menunjukkan hasil diagram Pareto untuk menentukan komponen penyusun sub-sub-sub unit.

Tabel 4.2 Hasil Diagram Pareto untuk Penentuan Komponen Penyusun Sub-Sub-Sub Unit

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen
1	<i>Condensor</i>	<i>Tube</i>
		<i>Valve</i>
2	<i>Condensate Extraction Pump A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
3	<i>Condensate Extraction Pump B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
4	<i>Gland Steam Condensor</i>	<i>Motor</i>
5	<i>Condensate Preheater System 1</i>	<i>Valve</i>
		<i>Tube</i>
6	<i>Condensate Preheater System 2</i>	<i>Tube</i>
		<i>Valve</i>
7	<i>Condensate Preheater System 3</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
8	<i>Deaerator</i>	<i>Tube</i>
9	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	Pompa
		<i>Motor</i>
		<i>Mechanical Seal</i>
		<i>Valve</i>
10	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	Pompa
		<i>Tube</i>
11	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	Pompa
		<i>Mechanical Seal</i>
12	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	Pompa
		<i>Tube</i>
13	<i>LP Boiler Circulating Pump 1A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
14	<i>LP Boiler Circulating Pump 1B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
15	<i>LP Boiler Circulating Pump 2A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
16	<i>LP Boiler Circulating Pump 2B</i>	<i>Motor</i>
17	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
18	<i>LP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Motor</i>
19	<i>LP Evaporator System 1</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
20	<i>LP Evaporator System 2</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
21	<i>LP Evaporator System 3</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
22	<i>Economizer System 1</i>	<i>Valve</i>
23	<i>Economizer System 2</i>	<i>Tidak terdapat kegagalan (R=1)</i>
24	<i>Economizer System 3</i>	<i>Tidak terdapat kegagalan (R=1)</i>
25	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Valve</i>
		<i>Tube</i>

Tabel 4.2 Hasil Diagram Pareto untuk Penentuan Komponen Penyusun Sub-Sub-Sub Unit (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen
26	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	<i>Tube</i>
		Pompa
27	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	<i>Motor</i>
		<i>Valve</i>
28	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	Motor
		Pompa
29	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	<i>Mechanical Seal</i>
30	<i>HP Boiler Circulating Pump 1B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
31	<i>HP Boiler Circulating Pump 2A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
32	<i>HP Boiler Circulating Pump 2B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
33	<i>HP Boiler Circulating Pump 3A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
34	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Mechanical Seal</i>
35	<i>HP Evaporator System 1</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
36	<i>HP Evaporator System 2</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
37	<i>HP Evaporator System 3</i>	<i>Valve</i>
38	<i>Superheater System 1</i>	<i>Tube</i>
39	<i>Superheater System 2</i>	<i>Tube</i>
		<i>Valve</i>
40	<i>Superheater System 3</i>	<i>Tube</i>
41	<i>LP Turbin</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
42	<i>HP Turbin</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)

Hasil dari diagram Pareto menentukan komponen penyusun sub-sub-sub unit yang akan diolah data waktu antar kegagalannya pada tahapan selanjutnya. Pada sub-sub-sub unit yang tidak memiliki data kegagalan pada komponennya, maka tidak dilakukan analisis pada tahap selanjutnya, dikarenakan diasumsikan bahwa nilai keandalannya sama dengan satu.

4.3 Pengolahan Data Waktu Antar Kegagalan

Tahap setelah didapatkan komponen penyebab kegagalan dari sub-sub-sub unit adalah melakukan perhitungan waktu antar kegagalan atau *time between failure* (TBF) dari masing-masing komponen sub-sub-sub unit. Akan tetapi pada blok 1 terdapat beberapa sub-sub-sub unit yang hanya memiliki 3 sampai 8 data

untuk data TBF komponen sub-sub-sub unit, oleh karena itu dilakukan analisis variansi (ANOVA) untuk menggabungkan data TBF dari blok 1, 2 dan 3. Asumsi-asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Blok 1, 2 dan 3 memiliki rangkaian peralatan yang sama.
2. Peralatan pada blok 1, 2 dan 3 memiliki spesifikasi yang sama.
3. Blok 1, 2 dan 3 memiliki waktu awal operasi yang sama.
4. Blok 1, 2 dan 3 memiliki perlakuan pemeliharaan dan operasional yang sama.

Penggabungan data TBF blok 1, 2 dan 3 dilakukan berdasarkan hasil ANOVA. Apabila data TBF dari blok 1, 2 dan 3 dapat dianggap dari populasi yang sama, maka dapat dilakukan penggabungan data sehingga jumlah data yang akan ditentukan distribusi dan parameternya dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++ 6* bisa menjadi lebih dari 10 data. Sebagai contoh, pada Tabel 4.3 ditampilkan data TBF komponen *tube* sub-sub-sub unit *condensor* dari sub-sub unit pemanasan awal air dari blok 1, 2 dan 3.

Tabel 4.3 Data TBF Komponen *Tube* Sub-Sub-Sub Unit *Condensor* dari Sub-Sub Unit Pemanasan Awal Air dari Blok 1, 2 dan 3

Komponen	Blok 1				Blok 2		Blok 3			
	No	TBF	No	TBF	No	TBF	No	TBF	No	TBF
<i>Tube</i>	1	2.232	13	4.056	1	4.248	1	6.840	13	720
	2	11.592	14	1.296	2	10.896	2	10.656	14	528
	3	2.544	15	1.800	3	1.440	3	4.536	15	2.112
	4	504	16	4.464	4	4.872	4	4.104	16	312
	5	336	17	624	5	1.920	5	2.952	17	2.256
	6	168	18	192	6	6.792	6	120	18	2.616
	7	1.632	19	2.832	7	5.664	7	168	19	264
	8	5.352	20	816	8	6.144	8	1.416	20	1.008
	9	744	21	7.656	9	13.920	9	3.600	21	11.448
	10	2.016	22	3.288			10	768		
	11	3.768	23	888			11	576		
	12	2.784	24	1.632			12	384		

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*

Sebelum dilakukan pengujian ANAVA, terlebih dahulu dilakukan pengujian kesamaan variansi dengan menggunakan uji *Levene* dengan hipotesis sebagai berikut:

$$H_0: \sigma_{BLOK 1}^2 = \sigma_{BLOK 2}^2 = \sigma_{BLOK 3}^2$$

H_1 : Paling sedikit ada satu variansi yang berbeda

P-Value dari uji *Levene* untuk TBF pada komponen *tube* sub-sub-sub unit *condensor* adalah 0,535. Dengan tingkat signifikansi (α) sebesar 5%, maka H_0 gagal ditolak, yang berarti tidak ada perbedaan variansi dari blok 1, blok 2 dan blok 3 pada komponen *tube* sub-sub-sub unit *condensor*. Hasil pengujian kesamaan variansi dari data waktu antar kegagalan komponen sub-sub-sub unit lainnya dapat dilihat pada Lampiran A.

Setelah dilakukan pengujian kesamaan variansi, kemudian dilakukan pengujian ANAVA dengan hipotesis sebagai berikut:

$$H_0: \mu_{Blok 1} = \mu_{Blok 2} = \mu_{Blok 3}$$

H_1 : Paling sedikit ada satu yang berbeda

Hasil ANAVA sub unit sistem sirkulasi air dan uap dari data waktu antar kegagalan komponen sub-sub-sub unit dengan tingkat signifikansi 5% dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil ANAVA Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap dari Data Waktu Antar Kegagalan Komponen Sub-Sub-Sub Unit dengan Tingkat Signifikansi 5%

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Hasil ANAVA	
			P-Value	Kesimpulan
1	<i>Condensor</i>	<i>Tube</i>	0,013	Menolak H_0
		<i>Valve</i>	0,22	Gagal menolak H_0
2	<i>Condensate Preheater System 1</i>	<i>Valve</i>	0,642	Gagal menolak H_0
		<i>Tube</i>	0,153	Gagal menolak H_0
3	<i>Condensate Preheater System 2</i>	<i>Tube</i>	0,540	Gagal menolak H_0
		<i>Valve</i>	0,387	Gagal menolak H_0
4	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	Pompa	0,333	Gagal menolak H_0
		<i>Motor</i>	0,957	Gagal menolak H_0
		<i>Mech Seal</i>	0,680	Gagal menolak H_0

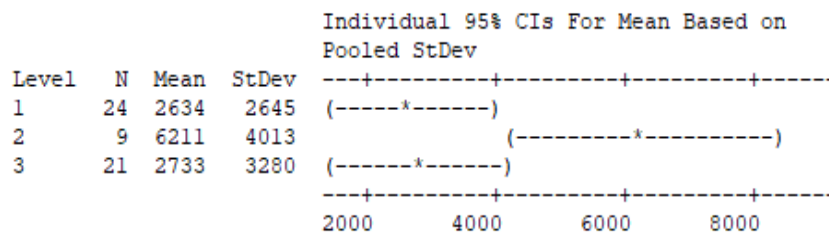
Tabel 4.4 Hasil ANAVA Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap dari Data Waktu Antar Kegagalan Komponen Sub-Sub-Sub Unit dengan Tingkat Signifikansi 5% (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Hasil ANAVA	
			P-Value	Kesimpulan
5	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	Pompa	0,152	Gagal menolak H_0
		<i>Tube</i>	0,173	Gagal menolak H_0
6	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	Pompa	0,589	Gagal menolak H_0
		<i>Mech Seal</i>	0,262	Gagal menolak H_0
7	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	Pompa	0,116	Gagal menolak H_0
		<i>Tube</i>	0,222	Gagal menolak H_0
8	<i>LP Boiler Circulating Pump 2B</i>	<i>Motor</i>	0,535	Gagal menolak H_0
9	<i>LP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Motor</i>	0,594	Gagal menolak H_0
10	<i>Economizer System 1</i>	<i>Valve</i>	0,290	Gagal menolak H_0
11	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Valve</i>	0,511	Gagal menolak H_0
		<i>Tube</i>	0,196	Gagal menolak H_0
12	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	<i>Tube</i>	0,495	Gagal menolak H_0
		Pompa	0,977	Gagal menolak H_0
13	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	<i>Mech Seal</i>	0,78	Gagal menolak H_0
14	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Mech Seal</i>	0,935	Gagal menolak H_0
15	<i>HP Evaporator System 3</i>	<i>Valve</i>	0,579	Gagal menolak H_0
16	<i>Superheater System 1</i>	<i>Tube</i>	0,467	Gagal menolak H_0
17	<i>Superheater System 2</i>	<i>Tube</i>	0,533	Gagal menolak H_0
		<i>Valve</i>	0,804	Gagal menolak H_0
18	<i>Superheater System 3</i>	<i>Tube</i>	0,943	Gagal menolak H_0

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Minitab*

Didapatkan bahwa TBF komponen *tube* pada sub-sub-sub unit *condensor* menolak H_0 , dikarenakan P-Value 0,013 (lebih kecil dari 5%). Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa *mean* dan *standard deviation* TBF blok 1 dan blok 3 memiliki perbedaan yang mencolok dengan blok 2. Oleh karena itu, data TBF komponen *tube* pada sub-sub-sub unit *condensor* tidak dapat digabungkan.

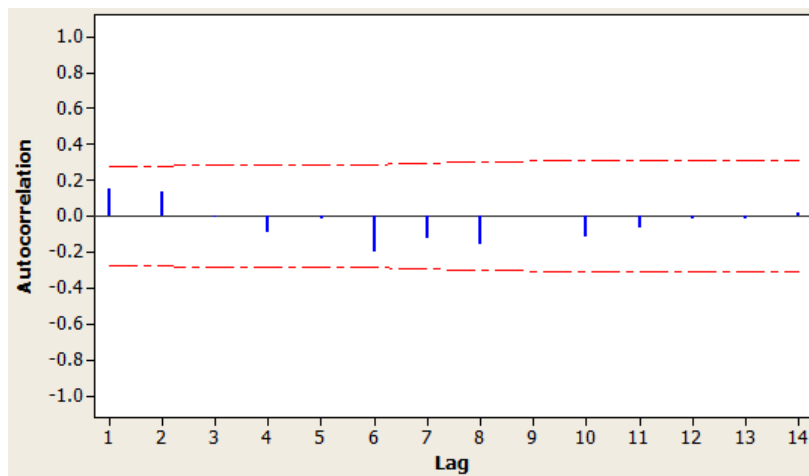
Setelah melakukan ANAVA, maka akan dilakukan pengujian asumsi *residual*. Jika H_0 gagal ditolak, maka data TBF dapat digabungkan. Berikut ini adalah pengujian *residual* dari data TBF komponen *tube* sub-sub-sub unit *condensor* dari sub-sub unit pemanasan awal air:



Gambar 4.7 Rentang *mean* dan *standard deviation* pada TBF komponen *tube* sub-sub-sub unit *condensor* blok 1, blok 2 dan blok 3

A. Uji Independen

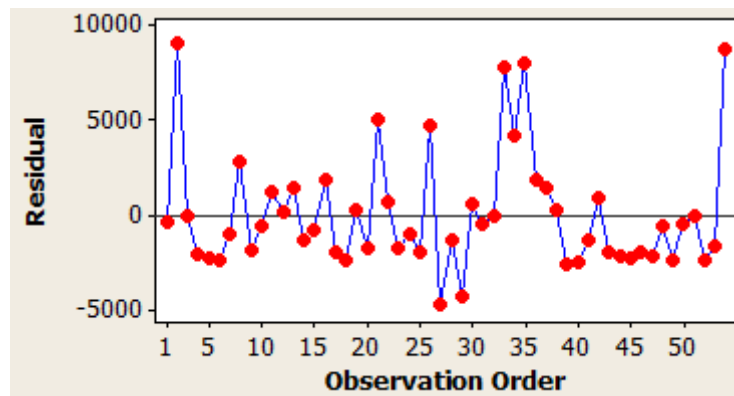
Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4.8, tidak ada nilai ACF pada setiap *lag* yang berada di luar batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar *residual* yang berarti *residual* bersifat independen.



Gambar 4.8 Plot ACF

B. Uji Identik

Asumsi *residual* bersifat identik pada penelitian ini dilakukan secara visual, yaitu dengan menggambarkan plot antara *residual* dan *observation order* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Plot tersebut menunjukkan bahwa data tersebar secara acak dan tidak membentuk tren atau pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi *residual* bersifat identik terpenuhi.



Gambar 4.9 Plot *residual versus observation order*

C. Uji Kenormalan

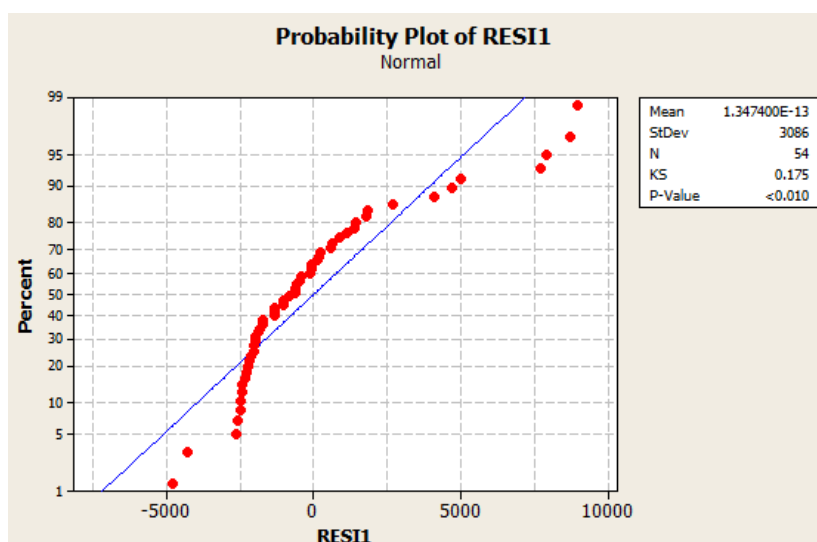
Pengujian asumsi *residual* normal $(0, \sigma^2)$ dilakukan melalui uji *Kolmogorov-Smirnov*. Hipotesis yang digunakan adalah:

H_0 : *Residual* berdistribusi normal

H_1 : *Residual* tidak berdistribusi normal

H_0 ditolak jika *P-Value* lebih kecil dari pada $\alpha = 0,05$.

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa dengan uji *Kolmogorov-Smirnov* diperoleh *P-Value* $< 0,010$ yang berarti lebih kecil dari $\alpha = 0,05$. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa H_0 ditolak atau *residual* tidak berdistribusi normal.



Gambar 4.10 Plot uji distribusi normal

Dikarenakan pengujian ANAVA dan terdapat pengujian asumsi *residual* yang tidak terpenuhi, maka komponen *tube* sub-sub-sub unit *condensor* tidak dapat dilakukan penggabungan data waktu antar kegagalan dari blok 1, blok 2 dan blok 3. Hasil pengujian asumsi *residual* dari data waktu antar kegagalan komponen sub-sub-sub unit lainnya dapat dilihat pada Lampiran A.

Pada komponen sub-sub-sub unit yang memiliki kesimpulan gagal menolak H_0 , maka dilakukan penggabungan data dari blok 1, blok 2 dan blok 3. Dan sebaliknya, pada komponen sub-sub-sub unit yang memiliki kesimpulan menolak H_0 , maka tidak dapat dilakukan penggabungan data dari blok 1, blok 2 dan blok 3. Dikarenakan jumlah data masih kurang dari 10, maka dilakukan lagi ANAVA untuk komponen-komponen dari sub-sub-sub unit. Jika komponen-komponen penyusun sub-sub-sub unit berasal dari populasi yang sama, maka data dari komponen-komponen sub-sub-sub unit dapat digabungkan, sehingga jumlah data lebih dari 10 untuk satu sub-sub-sub unit. Pada Tabel 4.5 ditampilkan data waktu antar kegagalan komponen-komponen sub-sub-sub unit *condensor*.

Tabel 4.5 Data Waktu Antar Kegagalan Komponen Sub-Sub-Sub Unit *Condensor*

No.	Condensor		No.	Condensor	
	Tube	Valve		Tube	Valve
1	2.232	23.472	13	4.056	
2	11.592	10.752	14	1.296	
3	2.544	840	15	1.800	
4	504	528	16	4.464	
5	336	15.816	17	624	
6	168	8.832	18	192	
7	1.632		19	2.832	
8	5.352		20	816	
9	744		21	7.656	
10	2.016		22	3.288	
11	3.768		23	888	
12	2.784		24	1.632	

H_0 : Semua rata-rata dari komponen-komponen penyusun sub-sub unit adalah sama.

H_1 : Paling sedikit ada satu rata-rata dari komponen-komponen penyusun sub-sub unit yang berbeda.

Pada Tabel 4.6 ditampilkan hasil ANAVA komponen dari data waktu antar kegagalan dan waktu perbaikan sub-sub unit dengan tingkat signifikansi 5%. Sebelum dilakukan pengujian ANAVA, harus dilakukan pengujian kesamaan variansi terlebih dahulu, hasil pengujian dapat dilihat pada Lampiran A.

Tabel 4.6 Hasil ANAVA Komponen Sub-Sub-Sub Unit dari Data Waktu Antar Kegagalan Sub-Sub-Sub Unit dengan Tingkat Signifikansi 5%

No	Sub-Sub-Sub Unit	Hasil ANAVA	
		P-Value	Kesimpulan
1	<i>Condensor</i>	0,001	Menolak H_0
2	<i>Condensate Preheater System 1</i>	0,798	Gagal menolak H_0
3	<i>Condensate Preheater System 2</i>	0,061	Gagal menolak H_0
4	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	0,492	Gagal menolak H_0
5	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	0,093	Gagal menolak H_0
6	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	0,941	Gagal menolak H_0
7	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	0,675	Gagal menolak H_0
8	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	0,450	Gagal menolak H_0
9	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	0,885	Gagal menolak H_0
10	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	0,348	Gagal menolak H_0
11	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	0,804	Gagal menolak H_0
12	<i>Superheater System 2</i>	0,084	Gagal menolak H_0

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Minitab*

Condensor memiliki P-Value sebesar 0,001, sehingga H_0 ditolak. Hal ini menyebabkan TBF pada komponen *tube* dan *valve* sub-sub-sub unit *condensor* tidak dapat digabungkan, sehingga analisis keandalan pada *tube* dan *valve* menjadi terpisah. Hasil uji asumsi *residual* dapat dilihat pada Lampiran A

4.4 Data Waktu Antar Kegagalan Sub-Sub-Sub Unit

Data waktu antar kegagalan sub-sub-sub unit didapatkan dari penggabungan data blok 1, blok 2 dan blok 3. Pada Tabel 4.7 ditampilkan waktu antar kegagalan dari sub-sub-sub unit.

Tabel 4.7 Data Waktu Antar Kegagalan Sub-Sub-Sub Unit

No	Condensor			Gland Steam Condensor	Condensate Preheater System 1	Condensate Preheater System 2
	Tube	Tube	Valve			
1	2.232	4.464	23.472	8.088	25.032	3.480
2	11.592	624	10.752	10.200	18.288	21.048
3	2.544	192	840	6.960	9.720	3.456
4	504	2.832	528	12.288	20.040	13.752
5	336	816	15.816	9.720	14.760	2.352
6	168	7.656	8.832		12.456	17.544
7	1.632	3.288			19.032	23.328
8	5.352	888			25.944	10.872
9	744	1.632			25.272	11.808
10	2.016				19.392	11.568
11	3.768				17.088	11.832
12	2.784				20.952	13.416
13	4.056				18.288	18.792
14	1.296				26.688	
15	1.800				21.264	

TBF dari sub-sub-sub unit lainnya dapat dilihat pada Lampiran A.

4.5 Distribusi Data Waktu Antar Kegagalan dan Parameter Keandalan

Dari hasil analisis data waktu antar kegagalan sub-sub-sub unit didapatkan distribusi waktu antar kegagalan dan parameter keandalan sub-sub unit. Rincian penentuan distribusi waktu antar kegagalan dan parameter ditunjukkan pada Lampiran B. Rekapitulasi distribusi data waktu antar kegagalan dan parameter keandalan ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Distribusi Data Waktu Antar Kegagalan dan Parameter Sub-Sub-Sub Unit

No	Sub-Sub-Sub Unit	Distribusi	β	η	ν
1	Condensor (Tube)	Weibull 3	1,0188	2.648,492	40,06
2	Condensor (Valve)	Weibull 3	2,0152	21.633	-8.631,8
3	Gland Steam Condensor	Weibull 3	1,9182	4.943,003	5.195,2
4	Condensate Preheater System 1	Weibull 2	4,1753	21.569	
5	Condensate Preheater System 2	Weibull 3	6,3011	42.036	-26.603
6	Deaerator	Weibull 2	5,895	9.595,254	

Tabel 4.8 Distribusi Data Waktu Antar Kegagalan dan Parameter Sub-Sub-Sub Unit (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Distribusi	β	η	γ
7	LP Boiler Feed Pump A	Weibull 2	1,1229	8.792,361	
8	LP Boiler Feed Pump B	Weibull 3	2,9968	9.996,543	-1.772,24
9	LP Boiler Feed Pump C	Weibull 3	2,7834	8.263,268	2.182
10	LP Boiler Feed Pump D	Weibull 3	0,9102	6.561,009	1.284,4
11	LP Boiler Circulating Pump 2B	Weibull 3	1,3233	11.401	9.143,92
12	LP Boiler Circulating Pump 3A	Weibull 3	1,1444	9.039,967	8.210,8
13	Economizer System 1	Weibull 3	4,7596	10.460	1.125,1
14	HP Boiler Feed Pump A	Weibull 3	0,9903	9.978,725	-256,46
15	HP Boiler Feed Pump B	Weibull 3	1,2166	7.874,672	3.275,92
16	HP Boiler Feed Pump C	Weibull 3	1,2314	3.702,884	7.932,52
17	HP Boiler Feed Pump D	Weibull 3	1,7166	11.595	-2.222,54
18	HP Boiler Circulating Pump 1A	Weibull 3	3,4112	10.295	206,2
19	HP Boiler Circulating Pump 3B	Weibull 2	6,5439	11.094	
20	HP Evaporator System 3	Weibull 2	2,1006	16.148	
21	Superheater System 1	Weibull 2	1,2552	11.925	
22	Superheater System 2	Weibull 3	2,8336	20.188	-5.021
23	Superheater System 3	Weibull 3	2,1056	25.213	-6.666,92

Sumber: Hasil pengolahan data dengan perangkat lunak Weibull++ 6

4.6 Fungsi Padat Peluang (*pdf*) Sub-Sub-Sub Unit

Berdasarkan parameter keandalan yang ditunjukkan pada Tabel 4.8, maka didapatkan fungsi padat peluang (*pdf*) waktu antar kegagalan sub-sub-sub unit. Fungsi padat peluang (*pdf*) tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Fungsi Padat Peluang (*pdf*) Sub-Sub-Sub Unit

No	Sub-Sub-Sub Unit	Distribusi	Fungsi Padat Peluang (<i>pdf</i>)
1	Condensor (Tube)	Weibull 3	$\frac{1,0188}{2.648,4} \left(\frac{t - 40,06}{2.648,4} \right)^{1,0188-1} \exp \left[- \left(\frac{t - 40,06}{2.648,4} \right)^{1,0188} \right]$
2	Condensor (Valve)	Weibull 3	$\frac{2,0152}{21.633} \left(\frac{t + 8.631}{21.633} \right)^{2,0152-1} \exp \left[- \left(\frac{t + 8.631}{21.633} \right)^{2,0152} \right]$
3	Gland Steam Condensor	Weibull 3	$\frac{1,9182}{4.943} \left(\frac{t - 5.195,2}{4.943} \right)^{1,9182-1} \exp \left[- \left(\frac{t - 5.195,2}{4.943} \right)^{1,9182} \right]$

Tabel 4.9 Fungsi Padat Peluang (*pdf*) Sub-Sub-Sub Unit (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Distribusi	Fungsi Padat Peluang (<i>pdf</i>)
4	Condensate Preheater System 1	Weibull 2	$\frac{4,1753}{21.569} \left(\frac{t}{21.569}\right)^{4,1753-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{21.569}\right)^{4,1753}\right]$
5	Condensate Preheater System 2	Weibull 3	$\frac{6,3011}{42.036} \left(\frac{t + 26.603}{42.036}\right)^{6,3011-1} \exp \left[-\left(\frac{t + 26.603}{42.036}\right)^{6,3011}\right]$
6	Deaerator	Weibull 2	$\frac{5,895}{9.595,25} \left(\frac{t}{9.595,25}\right)^{5,895-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{9.595,25}\right)^{5,895}\right]$
7	LP Boiler Feed Pump A	Weibull 2	$\frac{1,1229}{8.792,3} \left(\frac{t}{8.792,3}\right)^{1,1229-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{8.792,3}\right)^{1,1229}\right]$
8	LP Boiler Feed Pump B	Weibull 3	$\frac{2,9968}{9.996,5} \left(\frac{t + 1.772,2}{9.996,5}\right)^{2,9968-1} \exp \left[-\left(\frac{t + 1.772,2}{9.996,5}\right)^{2,9968}\right]$
9	LP Boiler Feed Pump C	Weibull 3	$\frac{2,783}{8.263,2} \left(\frac{t - 2.182}{8.263,2}\right)^{2,783-1} \exp \left[-\left(\frac{t - 2.182}{8.263,2}\right)^{2,783}\right]$
10	LP Boiler Feed Pump D	Weibull 3	$\frac{0,9102}{6.561} \left(\frac{t - 1.284,4}{6.561}\right)^{0,9102-1} \exp \left[-\left(\frac{t - 1.284,4}{6.561}\right)^{0,9102}\right]$
11	LP Boiler Circulating Pump 2B	Weibull 3	$\frac{1,3233}{11.401} \left(\frac{t - 9.143,9}{11.401}\right)^{1,3233-1} \exp \left[-\left(\frac{t - 9.143,9}{11.401}\right)^{1,3233}\right]$
12	LP Boiler Circulating Pump 3A	Weibull 3	$\frac{1,1444}{9.039,9} \left(\frac{t - 8.201,8}{9.039,9}\right)^{1,1444-1} \exp \left[-\left(\frac{t - 8.201,8}{9.039,9}\right)^{1,1444}\right]$
13	Economizer System 1	Weibull 3	$\frac{4,7596}{10.460} \left(\frac{t - 1.125,1}{10.460}\right)^{4,7596-1} \exp \left[-\left(\frac{t - 1.125,1}{10.460}\right)^{4,7596}\right]$
14	HP Boiler Feed Pump A	Weibull 3	$\frac{0,9903}{9.978,7} \left(\frac{t + 256,46}{9.978,7}\right)^{0,9903-1} \exp \left[-\left(\frac{t + 256,46}{9.978,7}\right)^{0,9903}\right]$
15	HP Boiler Feed Pump B	Weibull 3	$\frac{1,216}{7.874,6} \left(\frac{t - 3.275,9}{7.874,6}\right)^{1,216-1} \exp \left[-\left(\frac{t - 3.275,9}{7.874,6}\right)^{1,216}\right]$
16	HP Boiler Feed Pump C	Weibull 3	$\frac{1,2314}{3.702,8} \left(\frac{t - 7.932,5}{3.702,8}\right)^{1,2314-1} \exp \left[-\left(\frac{t - 7.932,5}{3.702,8}\right)^{1,2314}\right]$
17	HP Boiler Feed Pump D	Weibull 3	$\frac{1,716}{11.595} \left(\frac{t + 2.222,5}{11.595}\right)^{1,716-1} \exp \left[-\left(\frac{t + 2.222,5}{11.595}\right)^{1,716}\right]$
18	HP Boiler Circulating Pump 1A	Weibull 3	$\frac{3,4112}{10.295} \left(\frac{t - 206,2}{10.295}\right)^{3,4112-1} \exp \left[-\left(\frac{t - 206,2}{10.295}\right)^{3,4112}\right]$

Tabel 4.9 Fungsi Padat Peluang (*pdf*) Sub-Sub-Sub Unit (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Distribusi	Fungsi Padat Peluang (<i>pdf</i>)
19	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Weibull 2</i>	$\frac{6,5439}{11.094} \left(\frac{t}{11.094}\right)^{6,5439-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{11.094}\right)^{6,5439}\right]$
20	<i>HP Evaporator System 3</i>	<i>Weibull 2</i>	$\frac{2,1}{16.148} \left(\frac{t}{16.148}\right)^{2,1-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{16.148}\right)^{2,1}\right]$
21	<i>Superheater System 1</i>	<i>Weibull 2</i>	$\frac{1,2552}{11.925} \left(\frac{t}{11.925}\right)^{1,2552-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{11.925}\right)^{1,2552}\right]$
22	<i>Superheater System 2</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{2,8336}{20.188} \left(\frac{t + 5.021}{20.188}\right)^{2,8336-1} \exp \left[-\left(\frac{t + 5.021}{20.188}\right)^{2,8336}\right]$
23	<i>Superheater System 3</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{2,1056}{25.213} \left(\frac{t + 6.666}{25.213}\right)^{2,1056-1} \exp \left[-\left(\frac{t + 6.666}{25.213}\right)^{2,1056}\right]$

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Weibull++6*

4.7 Laju Kegagalan (λ) Sub-Sub-Sub Unit

Berdasarkan parameter keandalan yang pada Tabel 4.8, didapatkan laju kegagalan (λ) sub-sub-sub unit. Laju kegagalan (λ) tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Laju Kegagalan (λ) Sub-Sub-Sub Unit

No	Sub-Sub-Sub Unit	Distribusi	Laju Kegagalan (λ)
1	<i>Condensor (Tube)</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{1,0188}{2.648,4} \left(\frac{t - 40,06}{2.648,4}\right)^{1,0188-1}$
2	<i>Condensor (Valve)</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{2,0152}{21.633} \left(\frac{t + 8.632}{21.633}\right)^{2,0152-1}$
3	<i>Gland Steam Condensor</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{1,9182}{4.943} \left(\frac{t - 5.195,2}{4.943}\right)^{1,9182-1}$
4	<i>Condensate Preheater System 1</i>	<i>Weibull 2</i>	$\frac{4,1753}{21.569} \left(\frac{t}{21.569}\right)^{4,1753-1}$

Tabel 4.10 Laju Kegagalan (λ) Sub-Sub-Sub Unit (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Distribusi	Laju Kegagalan (λ)
5	<i>Condensate Preheater System 2</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{6,3011}{42.036} \left(\frac{t + 26.603}{42.036} \right)^{6,3011-1}$
6	<i>Deaerator</i>	<i>Weibull 2</i>	$\frac{5,895}{9.595,3} \left(\frac{t}{9.595,3} \right)^{5,895-1}$
7	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Weibull 2</i>	$\frac{1,1229}{8.792,3} \left(\frac{t}{8.792,3} \right)^{1,1229-1}$
8	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{2,9968}{9.996,54} \left(\frac{t + 1.772,24}{9.996,54} \right)^{2,9968-1}$
9	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{2,7834}{8.263,26} \left(\frac{t - 2.182}{8.263,26} \right)^{2,7834-1}$
10	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{0,9102}{1.284,4} \left(\frac{t - 1.284,4}{1.284,4} \right)^{0,9102-1}$
11	<i>LP Boiler Circulating Pump 2B</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{1,3233}{11.401} \left(\frac{t - 9.143,9}{11.401} \right)^{1,3233-1}$
12	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{1,144}{9.030,9} \left(\frac{t - 8.210,8}{9.030,9} \right)^{1,144-1}$
13	<i>Economizer System 1</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{4,759}{10.460} \left(\frac{t - 1.125,1}{10.460} \right)^{4,759-1}$
14	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{0,9903}{9.978,7} \left(\frac{t + 256,4}{9.978,7} \right)^{0,9903-1}$
15	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{1,2166}{7.874,6} \left(\frac{t - 3.275,9}{7.874,6} \right)^{1,2166-1}$
16	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{1,2314}{3.702,8} \left(\frac{t - 7.932,5}{3.702,8} \right)^{1,2314-1}$

Tabel 4.10 Laju Kegagalan (λ) Sub-Sub-Sub Unit (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Distribusi	Laju Kegagalan (λ)
17	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{1,7166}{11.595} \left(\frac{t + 2.222,5}{11.595} \right)^{1,7166-1}$
18	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{3,4112}{10.295} \left(\frac{t - 206,2}{10.295} \right)^{3,4112-1}$
19	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Weibull 2</i>	$\frac{6,5439}{11.094} \left(\frac{t}{11.094} \right)^{6,5439-1}$
20	<i>HP Evaporator System 3</i>	<i>Weibull 2</i>	$\frac{2,1006}{16.148} \left(\frac{t}{16.148} \right)^{2,1006-1}$
21	<i>Superheater System 1</i>	<i>Weibull 2</i>	$\frac{1,2552}{11.925} \left(\frac{t}{11.925} \right)^{1,2552-1}$
22	<i>Superheater System 2</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{2,8336}{20.188} \left(\frac{t + 5.021}{20.188} \right)^{2,8336-1}$
23	<i>Superheater System 3</i>	<i>Weibull 3</i>	$\frac{2,1056}{25.213} \left(\frac{t - 6.666,9}{25.213} \right)^{2,1056-1}$

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Weibull++6*

4.8 Mean Time Between Failure (MTBF) dan Keandalan pada saat MTBF Sub-Sub-Sub Unit

Berdasarkan parameter keandalan yang ditunjukkan pada Tabel 4.8, didapatkan Mean Time Between Failure (MTBF) dan keandalan pada saat MTBF sub-sub-sub unit yang dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 *Mean Time Between Failure (MTBF)* dan Keandalan pada Saat *MTBF* Sub-Sub-Sub Unit

No	Sub-Sub-Sub Unit	MTBF	R (MTBF)
1	Condensor (Tube)	2.668,2	0,371
2	Condensor (Valve)	10.537,4	0,457
3	Gland Steam Condensor	9.580,2	0,452
4	Condensate Preheater System 1	19.598,2	0,512
5	Condensate Preheater System 2	39.102,3	0,531
6	Deaerator	8.892,7	0,528
7	LP Boiler Feed Pump A	8.428,0	0,385
8	LP Boiler Feed Pump B	7.154,0	0,491
9	LP Boiler Feed Pump C	9.538,4	0,485
10	LP Boiler Feed Pump D	8.145,9	0,353
11	LP Boiler Circulating Pump 2B	19.637,0	0,408
12	LP Boiler Circulating Pump 3A	16.826,5	0,388
13	Economizer System 1	10.701,7	0,518
14	HP Boiler Feed Pump A	9.764,0	0,366
15	HP Boiler Feed Pump B	10.657,6	0,397
16	HP Boiler Feed Pump C	11.393,4	0,398
17	HP Boiler Feed Pump D	8.116,4	0,440
18	HP Boiler Circulating Pump 1A	9.456,6	0,499
19	HP Boiler Circulating Pump 3B	10.340,9	0,532
20	HP Evaporator System 3	14.302,2	0,461
21	Superheater System 1	11.096,3	0,401
22	Superheater System 2	12.963,7	0,486
23	Superheater System 3	15.663,7	0,461

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Weibull++6* dan *Microsoft Excel*

4.9 Keandalan (*Reliability*) Sistem

Berdasarkan model keandalan sistem, sub unit sistem sirkulasi air dan uap mengikuti permodelan kombinasi. Keandalan sistem sub unit sistem sirkulasi air dan uap disusun oleh keandalan sub-sub unit dan sub-sub-sub unit penyusun. Nilai t sebesar 8.760 jam merupakan waktu yang digunakan untuk menentukan nilai keandalan.

4.9.1 Keandalan (*Reliability*) Sub-Sub Unit Pemanasan Awal Air

Sub-sub-sub unit *condensate extraction pump A*, *condensate extraction pump B* dan *condensate preheater system 3* memiliki nilai keandalan sama dengan satu, karena sub-sub-sub unit tersebut tidak memiliki data kegagalan. Hasil penghitungan nilai keandalan sub-sub unit pemanasan awal air dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Nilai Keandalan Sub-Sub Unit Pemanasan Awal Air

t (jam)	Condensor (Tube)	Condensor (Valve)	Gland Steam Condensor	Condensate Preheater System 1	Condensate Preheater System 2	Deaerator	R (t)
0	1	0,855	1	1	1	1	0,855
24	1	0,854	1	1	1	1	0,854
168	0,955	0,849	1	1	1	1	0,812
744	0,772	0,831	1	1	1	1	0,641
1.416	0,599	0,808	1	1	1	1	0,484
2.160	0,451	0,782	1	1	1	1	0,352
2.880	0,342	0,755	1	1	1	0,999	0,258
3.624	0,256	0,727	1	0,999	1	0,997	0,186
4.344	0,194	0,700	1	0,999	1	0,991	0,134
5.088	0,145	0,671	1	0,998	1	0,977	0,095
5.832	0,109	0,641	0,981	0,996	1	0,948	0,065
6.552	0,082	0,613	0,920	0,993	1	0,900	0,042
7.296	0,061	0,583	0,824	0,989	1	0,820	0,024
8.016	0,046	0,554	0,711	0,984	1	0,707	0,013
8.760	0,034	0,525	0,586	0,977	1	0,557	0,006

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

4.9.2 Keandalan (*Reliability*) Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Rendah

Sub-sub-sub unit *LP boiler circulating pump 1A*, *LP boiler circulating pump 1B*, *LP boiler circulating pump 2A*, *LP boiler circulating pump 2B*, *LP boiler circulating pump 3B*, *LP evaporator system 1*, *LP evaporator system 2*, *LP evaporator system 3*, *economizer system 2* dan *economizer system 3* memiliki nilai keandalan sama dengan satu, karena sub-sub-sub unit tersebut

tidak memiliki data kegagalan. Hasil penghitungan nilai keandalan sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Nilai Keandalan Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Rendah

t (jam)	LP Boiler Feed Pump A	LP Boiler Feed Pump B	LP Boiler Feed Pump C	LP Boiler Feed Pump D	LP Boiler Circulating Pump 3A	Economizer System 1	R (t)
0	1	0,994	1	1	1	1	1
24	0,999	0,994	1	1	1	1	1
168	0,988	0,993	1	1	1	1	1
744	0,939	0,984	1	1	1	1	1
1.416	0,879	0,968	1	0,972	1	1	1
2.160	0,813	0,941	1	0,852	1	1	1
2.880	0,752	0,904	0,999	0,759	1	1	1
3.624	0,691	0,854	0,992	0,676	1	0,999	1
4.344	0,636	0,795	0,976	0,607	1	0,996	0,999
5.088	0,582	0,724	0,947	0,544	1	0,990	0,997
5.832	0,532	0,644	0,902	0,489	1	0,978	0,992
6.552	0,487	0,561	0,844	0,441	1	0,957	0,980
7.296	0,444	0,474	0,769	0,397	1	0,922	0,959
8.016	0,406	0,391	0,684	0,359	1	0,872	0,927
8.760	0,369	0,311	0,589	0,324	0,960	0,800	0,879

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

4.9.3 Keandalan (*Reliability*) Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Tinggi

Sub-sub-sub unit *HP boiler circulating pump 1B*, *HP boiler circulating pump 2A*, *HP boiler circulating pump 2B*, *HP boiler circulating pump 3A*, *HP evaporator system 1* dan *HP evaporator system 2* memiliki nilai keandalan sama dengan satu, karena sub-sub-sub unit tersebut tidak memiliki data kegagalan. Hasil penghitungan nilai keandalan sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Nilai Keandalan Sub-Sub Unit Penguapan Air dengan Tekanan Tinggi

t (jam)	HP Boiler Feed Pump A	HP Boiler Feed Pump B	HP Boiler Feed Pump C	HP Boiler Feed Pump D	HP BCP 1A	HP BCP 3B	HP ES 3	SS 1	SS 2	SS 3	R
0	0,974	1	1	0,943	1	1	1	1	0,981	0,941	1
24	0,971	1	1	0,942	1	1	1	1	0,981	0,941	1
168	0,957	1	1	0,936	1	1	1	0,995	0,979	0,938	1
744	0,903	1	1	0,908	1	1	0,998	0,970	0,972	0,927	1
1.416	0,843	1	1	0,872	0,999	1	0,994	0,933	0,962	0,913	1
2.160	0,782	1	1	0,828	0,997	1	0,985	0,889	0,948	0,896	0,999
2.880	0,728	1	1	0,783	0,990	1	0,974	0,845	0,932	0,879	0,999
3.624	0,675	0,978	1	0,734	0,977	0,999	0,958	0,799	0,914	0,859	0,998
4.344	0,628	0,916	1	0,686	0,956	0,998	0,939	0,755	0,893	0,840	0,996
5.088	0,583	0,846	1	0,636	0,925	0,994	0,915	0,709	0,869	0,818	0,993
5.832	0,542	0,775	1	0,586	0,880	0,985	0,889	0,665	0,842	0,796	0,989
6.552	0,504	0,709	1	0,538	0,825	0,969	0,860	0,624	0,813	0,774	0,984
7.296	0,468	0,643	1	0,490	0,756	0,938	0,828	0,583	0,781	0,750	0,977
8.016	0,436	0,583	0,991	0,446	0,677	0,888	0,795	0,545	0,749	0,726	0,967
8.760	0,405	0,525	0,854	0,402	0,588	0,808	0,758	0,507	0,713	0,701	0,934

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

4.9.4 Keandalan (*Reliability*) Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap

Keandalan sub unit sistem sirkulasi air dan uap disusun oleh sub-sub unit pemanasan awal air, penguapan air dengan tekanan rendah dan penguapan air dengan tekanan tinggi. Hasil penghitungan nilai keandalan sub unit sistem sirkulasi air dan uap dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Nilai Keandalan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap

t (jam)	R PAA	R PATR	R PATT	Rtotal
0	0,855	1	1	0,855
24	0,854	1	1	0,854
168	0,812	1	1	0,812
744	0,641	1	1	0,641
1.416	0,484	1	1	0,484
2.160	0,352	1	0,999	0,352

Tabel 4.15 Nilai Keandalan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap (lanjutan)

t (jam)	R PAA	R PATR	R PATT	R total
2.880	0,258	1,000	0,999	0,258
3.624	0,186	1,000	0,998	0,186
4.344	0,134	0,999	0,996	0,134
5.088	0,095	0,997	0,993	0,095
5.832	0,065	0,992	0,989	0,065
6.552	0,042	0,980	0,984	0,042
7.296	0,024	0,959	0,977	0,024
8.016	0,013	0,927	0,967	0,013
8.760	0,006	0,879	0,934	0,006

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

Tabel 4.15 menunjukkan bahwa pada saat t sebesar 8.760 jam, ada perbedaan nilai keandalan untuk masing-masing sub-sub unit. Nilai keandalan tersebut nantinya akan dipakai di dalam sub bab 5.2 untuk menghitung alokasi keandalan yang optimal dengan menggunakan persamaan 2.38 sebagai input parameter keandalan aktual ($R_{i,min}$).

BAB 5

PENENTUAN INTERVAL WAKTU DAN LAJU BIAYA PEMELIHARAAN PENCEGAHAN

Keandalan aktual dari sub unit sistem sirkulasi air dan uap telah didapatkan pada bab sebelumnya (bab 4). Keandalan tersebut akan dibandingkan dengan target keandalan yang telah ditetapkan. Jika nilainya lebih kecil, maka akan dilakukan upaya untuk meningkatkan keandalan sub unit tersebut sampai mencapai target yang telah ditetapkan. Keandalan sub unit ditentukan oleh keandalan sub-sub unit dan keandalan masing-masing sub-sub-sub unit penyusun. Sub unit sistem sirkulasi air dan uap bekerja secara kombinasi.

Optimasi keandalan dihitung dengan menggunakan persamaan 2.38. Untuk penghitungan optimasi keandalan dari suatu sub-sub unit diperlukan indeks kelayakan (f_i), yaitu konstanta peningkatan keandalan sub sistem relatif terhadap seluruh sub sistem penyusun dalam suatu sistem yang dioptimasi. Indeks kelayakan tersebut dicari dengan menggunakan metode *analytical hierarchy process* (AHP), dimana perhitungannya menggunakan bantuan perangkat lunak *Expert Choice*.

5.1 Penentuan Indeks Kelayakan

Penyusunan hirarki keputusan diperlukan untuk mendefinisikan masalah, sehingga menjadi lebih jelas dan rinci. Struktur hirarki dari sistem ini adalah:

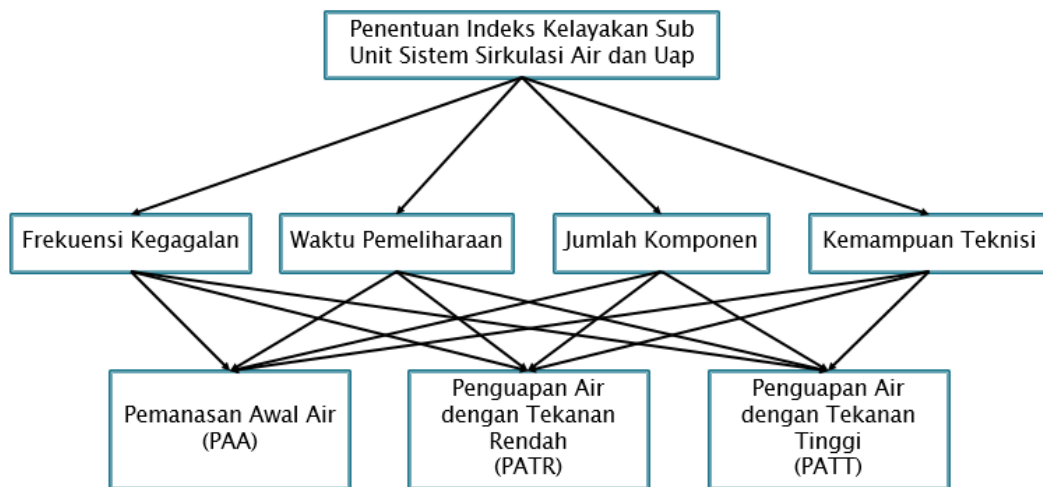
- Level 1
Tujuan: Penentuan indeks kelayakan sub unit sistem sirkulasi air dan uap
- Level 2
Kriteria:
 1. Frekuensi kegagalan
 2. Waktu pemeliharaan
 3. Waktu operasional
 4. Kemampuan teknisi

- Level 3

Sub kriteria:

1. Sub-sub unit pemanasan awal air (PAA)
2. Sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah (PATR)
3. Sub-sub unit penguapan air dengan tekanan tinggi (PATT)

Level 2 dan level 3 adalah aspek-aspek yang mempengaruhi penentuan indeks kelayakan sub unit sistem sirkulasi air dan uap. Sub-sub unit ekspansi uap (EU) tidak dimasukkan ke dalam sub kriteria dikarenakan telah memiliki nilai keandalan satu. Sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah (PATR) dan sub-sub unit penguapan air dengan tekanan tinggi (PATT) berada di level yang sama dengan sub-sub unit pemanasan awal air (PAA) dikarenakan memiliki kesamaan pada fungsionalnya. Susunan hirarki keputusan tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.1 berikut:



Gambar 5.1 Struktur hirarki indeks kelayakan peralatan

Kriteria-kriteria yang berada pada struktur hirarki tersebut diatas berdasarkan hasil dari wawancara dengan para ahli di Departemen Pemeliharaan di PT. XYZ. Wawancara tersebut bertujuan untuk menentukan kriteria-kriteria apa saja yang dapat mempengaruhi nilai keandalan sub unit, dengan mempertimbangkan unsur biaya menurut para ahli. Pengambil keputusan terdiri dari karyawan-karyawan yang kompeten dan menguasai masalah operasional serta

masalah pemeliharaan pencegahan. Hasil *input* kuisioner seluruh responden untuk kriteria dan sub kriteria dapat dilihat pada Lampiran C. Hasil kuisioner dari tiap responden tersebut digunakan untuk melakukan perbandingan berpasangan kriteria dengan menggunakan perangkat lunak *Expert Choice* yang ditunjukkan pada Tabel 5.1

Nilai yang berwarna hitam mempunyai arti bahwa kriteria yang berada di bagian baris mempunyai tingkat yang lebih tinggi daripada kriteria yang berada di bagian kolom. Nilai yang berwarna merah mempunyai arti bahwa kriteria yang berada di bagian kolom mempunyai tingkat yang lebih tinggi daripada kriteria yang berada di bagian baris.

Tabel 5.1 Perbandingan Berpasangan Antar Kriteria Seluruh Responden

Kriteria	Frekuensi Kegagalan	Waktu Pemeliharaan	Jumlah Komponen	Kemampuan Teknisi
Frekuensi Kegagalan		1,91	5,59	1,70
Waktu Pemeliharaan			5,59	2,46
Waktu Operasional				3,97
Kemampuan Teknisi				

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Expert Choice*

Dengan cara yang sama, perbandingan berpasangan antara sub kriteria dengan kriteria untuk seluruh responden ditunjukkan pada Tabel 5.2, Tabel 5.3, Tabel 5.4, dan Tabel 5.5.

Tabel 5.2 Perbandingan Berpasangan Antar Sub Kriteria dengan Kriteria Frekuensi Kegagalan Seluruh Responden

Sub Kriteria	PAA	PATR	PATT
PAA		1,28	1,70
PATR			1,61
PATT			

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Expert Choice*

Tabel 5.3 Perbandingan Berpasangan Antar Sub Kriteria dengan Kriteria Waktu Pemeliharaan Seluruh Responden

Sub Kriteria	PAA	PATR	PATT
PAA		2,13	1,91
PATR			1,70
PATT			

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Expert Choice*

Tabel 5.4 Perbandingan Berpasangan Antar Sub Kriteria dengan Kriteria Jumlah Komponen Seluruh Responden

Sub Kriteria	PAA	PATR	PATT
PAA		1,61	1,70
PATR			1,18
PATT			

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Expert Choice*

Tabel 5.5 Perbandingan Berpasangan Antar Sub Kriteria dengan Kriteria Kemampuan Teknisi Seluruh Responden

Sub Kriteria	PAA	PATR	PATT
PAA		1,44	1,28
PATR			1,70
PATT			

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Expert Choice*

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak *Expert Choice* didapatkan indeks kriteria sub unit sistem sirkulasi air dan uap dengan nilai *Overall Inconsistency Ratio* sebesar 0,04. Indeks kriteria sub unit sistem sirkulasi air dan uap ditunjukkan pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6 Indeks Kriteria

Kriteria	Indeks
Frekuensi Kegagalan	0,415
Waktu Pemeliharaan	0,330
Jumlah Komponen	0,059
Kemampuan Teknisi	0,196

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Expert Choice*

Dari perhitungan juga didapatkan indeks sub kriteria di sub unit sistem sirkulasi air dan uap dengan nilai *overall inconsistency ratio* sebesar 0,04. Indeks sub kriteria peralatan di sub unit sistem sirkulasi air dan uap ditunjukkan pada Tabel 5.7.

Tabel 5.7 Indeks Sub Kriteria

Sub Kriteria	Bobot Frekuensi Kegagalan (0,415)	Bobot Waktu Pemeliharaan (0,330)	Bobot Jumlah Komponen (0,059)	Bobot Kemampuan Teknisi (0,196)
PAA	0,294	0,196	0,453	0,337
PATR	0,253	0,338	0,260	0,240
PATT	0,453	0,466	0,286	0,423

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Expert Choice* dan *Microsoft Excel*

Indeks kelayakan sub kriteria dihitung dengan persamaan berikut:

Indeks kelayakan sub kriteria PAA = (bobot frekuensi kegagalan x nilai sub kriteria PAA) + (bobot waktu pemeliharaan x nilai sub kriteria PAA) + (bobot jumlah komponen x nilai sub kriteria PAA) + (bobot kemampuan teknisi x nilai sub kriteria PAA)

Indeks kelayakan untuk sub kriteria yang lain ditunjukkan pada Tabel 5.8.

Tabel 5.8 Indeks Kelayakan Peralatan

Sub-Sub Unit	Indeks Kelayakan
PAA	0,279
PATR	0,278
PATT	0,441

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Expert Choice*

5.2 Optimasi Keandalan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap

Keandalan sub unit dapat ditingkatkan dengan melakukan pemeliharaan pencegahan terhadap sub unit agar tanda-tanda terjadinya kerusakan dapat diketahui sedini mungkin. Pemeliharaan pencegahan ini harus dilakukan berdasarkan interval waktu yang optimal dengan mempertimbangkan peningkatan tambahan biaya yang diakibatkan oleh frekuensi pemeliharaan pencegahan yang tinggi.

Keandalan aktual ($R_{i,min}$) ditetapkan berdasarkan waktu operasi $t = 8.760$ jam, dan digunakan penghitungan peningkatan keandalan yang optimal ($R_{i,opt}$). Waktu operasi $t = 8.760$ jam ditetapkan berdasarkan jumlah jam kerja peralatan yang direncanakan dalam waktu 1 tahun. Nilai $R_{i,min}$ tersebut ditunjukkan pada Tabel 5.9.

Tabel 5.9 Keandalan Aktual ($t = 8.760$ jam)

Sub-Sub Unit	$R_{i,min}$
PAA	0,0059
PATR	0,8791
PATT	0,9339

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

Untuk mengoptimalkan keandalan masing-masing sub-sub unit peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap digunakan perangkat lunak *Lingo* dengan target keandalan (R_G) adalah 0,7, 0,8, dan 0,9. Target tersebut merupakan salah satu kriteria yang ditetapkan oleh manajemen yang pelaksanaannya membutuhkan upaya secara bertahap.

Persamaan 2.37 dan 2.38 digunakan untuk menghitung optimasi keandalan sub-sub unit pada sub unit sirkulasi air dan uap. Parameter-parameter yang digunakan dalam fungsi obyektif adalah keandalan aktual ($R_{i,min}$), indeks kelayakan sub-sub sistem peralatan (f_i), keandalan maksimal ($R_{i,maks}$) dan keandalan yang dialokasikan (R_i).

Parameter-parameter yang digunakan dalam fungsi batasan adalah target keandalan (R_G), keandalan aktual ($R_{i,min}$), keandalan maksimal ($R_{i,maks}$) dan

keandalan yang dialokasikan (R_i). Berikut adalah contoh perhitungan yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Lingo* bila target keandalan adalah (R_G) sebesar 0,7.

Fungsi Obyektif:

$$\text{Min } C = \sum_{i=1}^3 c_i(R_i) = e^{[(1-f_i)x\left(\frac{R_1-R_{i,\min}}{R_{i,\max}-R_1}\right)]}$$

$$\text{Min } C = e^{[(1-0,279)x\left(\frac{R_1-0,0059}{1-R_1}\right)]} + e^{[(1-0,278)x\left(\frac{R_2-0,8791}{1-R_2}\right)]} + e^{[(1-0,441)x\left(\frac{R_3-0,9339}{1-R_3}\right)]}$$

Fungsi Batasan:

$$R_1 \times R_2 \times R_3 \geq 0,7$$

$$0,0059 \leq R_1 \leq 1$$

$$0,8791 \leq R_2 \leq 1$$

$$0,9339 \leq R_3 \leq 1$$

Hasil optimasi keandalan dengan fungsi batasan R_G sebesar 0,7 ditunjukkan pada Tabel 5.10.

Tabel 5.10 Keandalan Optimal dengan Keandalan Sub-Sub Unit, $R_G = 0,7$

Sub-Sub Unit	Variabel	Keandalan Optimal ($R_{i,\text{opt}}$)
PAA	R_1	0,7590
PATR	R_2	0,9495
PATT	R_3	0,9712

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Lingo*

Dengan cara yang sama, dapat dilakukan perhitungan optimasi keandalan dengan fungsi batasan $R_G = 0,8$ dan $R_G = 0,9$. Rincian perhitungan optimasi untuk fungsi batasan $R_G = 0,7$, $R_G = 0,8$ dan $R_G = 0,9$ dapat dilihat pada Lampiran D. Rekapitulasi alokasi keandalan sub-sub unit peralatan di sub unit sistem sirkulasi air dan uap ditunjukkan pada Tabel 5.11.

Tabel 5.11 Rekapitulasi Alokasi Keandalan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap

Keandalan Sub Unit (R_G)	Alokasi Keandalan		
	PAA (R_1)	PATR (R_2)	PATT (R_3)
0,7	0,7590	0,9495	0,9712
0,8	0,8374	0,9704	0,9843
0,9	0,9170	0,9873	0,9939

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Lingo*

Dari Tabel 5.11 diketahui bahwa untuk jam kerja peralatan yang sama, terdapat perbedaan keandalan untuk masing-masing sub-sub unit di sub unit sistem sirkulasi air dan uap. Sub-sub unit dengan tingkat keandalan yang rendah merupakan kelemahan yang dapat mengganggu pencapaian keandalan sub unit sistem sirkulasi air dan uap. Oleh karena itu, sub-sub unit yang keandalannya rendah dapat ditingkatkan dengan mengalokasikan interval waktu pemeliharaan pencegahan yang optimal.

5.3 Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap

Keandalan peralatan dapat ditingkatkan dengan melakukan pemeliharaan pencegahan. Kegiatan pemeliharaan pencegahan harus dilaksanakan berdasarkan interval waktu yang optimal dengan mempertimbangkan peningkatan biaya akibat meningkatnya frekuensi pemeliharaan pencegahan. Manajemen perusahaan menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan berdasarkan keandalan sub unit yang hendak dicapai, yaitu keandalan (R_G) sebesar 0,7, 0,8 dan 0,9.

Langkah pertama dalam menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan adalah mengkonversi alokasi keandalan sub-sub unit menjadi alokasi keandalan sub-sub-sub unit. Proses pengkonversian tersebut dilakukan melalui interpolasi terhadap keandalan yang optimal dari sub-sub unit (R_i), yang telah didapat pada perhitungan dan ditunjukkan pada Tabel 5.11. Pengkonversian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Microsoft Excel*. Hasil rekapitulasi

alokasi keandalan sub-sub-sub unit peralatan di sub unit sistem sirkulasi air dan uap ditunjukkan pada Tabel 5.12.

Tabel 5.12 Rekapitulasi Alokasi Keandalan Sub-Sub-Sub Unit di Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap

Sub-Sub Unit	Sub-Sub-Sub Unit	Alokasi Keandalan		
		0,7	0,8	0,9
PAA	<i>Condensor (Tube)</i>	0,7659	0,8421	0,9194
	<i>Condensor (Valve)</i>	0,8849	0,9223	0,9603
	<i>Gland Steam Condensor</i>	0,8997	0,9323	0,9654
	<i>Condensate Preheater System 1</i>	0,9944	0,9962	0,9981
	<i>Condensate Preheater System 2</i>	1,0000	1,0000	1,0000
	<i>Deaerator</i>	0,8927	0,9276	0,9630
PATR	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	0,7365	0,8456	0,9337
	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	0,7119	0,8311	0,9276
	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	0,8281	0,8992	0,9568
	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	0,7177	0,8345	0,9290
	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	0,9834	0,9903	0,9958
	<i>Economizer System 1</i>	0,9163	0,9509	0,9790
PATT	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	0,7404	0,8585	0,9450
	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	0,7929	0,8871	0,9561
	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	0,9363	0,9653	0,9865
	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	0,7392	0,8578	0,9448
	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	0,8202	0,9020	0,9619
	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	0,9163	0,9544	0,9823
	<i>HP Evaporator System 3</i>	0,8946	0,9425	0,9777
	<i>Superheater System 1</i>	0,7850	0,8828	0,9545
	<i>Superheater System 2</i>	0,8746	0,9316	0,9734
	<i>Superheater System 3</i>	0,8695	0,9289	0,9724

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

Penentuan interval waktu pemeliharaan pencegahan ditentukan dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* untuk $t = 8.760$ jam dan keandalan optimal (R_i) yang telah didapatkan pada perhitungan (Tabel 5.12). Hasil perhitungan interval waktu pemeliharaan pencegahan sub-sub-sub unit pada sub unit sistem sirkulasi air dan uap yang optimal ditunjukkan dalam Tabel 5.13.

Tabel 5.13 Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan yang Optimal

Sub-Sub Unit	Sub-Sub-Sub Unit	Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan					
		$R_G = 0,7$		$R_G = 0,8$		$R_G = 0,9$	
		Jam	Hari	Jam	Hari	Jam	Hari
PAA	<i>Condensor (Tube)</i>	766	32	510	21	273	11
	<i>Condensor (Valve)</i>	-	-	-	-	-	-
	<i>Gland Steam Condensor</i>	6.707	279	6.402	267	6.070	253
	<i>Condensate Preheater System 1</i>	6.226	259	5.665	236	4.821	201
	<i>Condensate Preheater System 2</i>	-	-	-	-	-	-
	<i>Deaerator</i>	6.634	276	6.186	258	5.502	229
PATR	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	3.061	128	1.793	75	808	34
	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	5.200	217	3.920	163	2.444	102
	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	6.720	280	5.874	245	4.855	202
	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	3.237	135	2.287	95	1.658	69
	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	9.830	410	9.126	380	8.606	359
	<i>Economizer System 1</i>	7.392	308	6.705	279	5.780	241
PATT	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	2.707	113	1.238	52	292	12
	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	5.646	235	4.652	194	3.890	162
	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	8.339	347	8.178	341	8.045	335
	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	3.551	148	1.668	70	-	-
	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	6.612	276	5.495	229	4.178	174
	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	7.645	319	6.946	289	5.999	250
	<i>HP Evaporator System 3</i>	5.681	237	4.204	175	2.657	111
	<i>Superheater System 1</i>	3.851	160	2.270	95	1.037	43
	<i>Superheater System 2</i>	4.910	205	2.908	121	612	26
	<i>Superheater System 3</i>	3.238	135	603	25	-	-

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Weibull++6* dan *Microsoft Excel*

Tabel 5.13 menunjukkan interval waktu pemeliharaan pencegahan optimal yang terpanjang dimiliki oleh sub-sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah selama 9.830 jam atau 410 hari pada saat target keandalan 0,7. Interval waktu pemeliharaan pencegahan terpendek dimiliki oleh sub-sub-sub unit pemanasan awal air selama 273 jam atau 11 hari pada saat target keandalan 0,9. Pada beberapa sub-sub-sub unit sudah memiliki nilai keandalan satu, sehingga tidak memiliki interval waktu pemeliharaan pencegahan dan hal ini ditandai dengan simbol setrip (-) pada tabel.

5.4 Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan

Laju biaya pemeliharaan pencegahan yang dihitung adalah laju biaya pemeliharaan pencegahan sebelum optimasi dan laju biaya pemeliharaan pencegahan setelah optimasi. Laju biaya pemeliharaan pencegahan pada penelitian ini, adalah laju biaya pemeliharaan pencegahan pada saat keandalan sub unit sudah mencapai target yang ditentukan, yaitu sebesar 0,7, 0,8, dan 0,9. Optimasi laju biaya pemeliharaan pencegahan dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.40.

5.4.1 Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan Sub-Sub-Sub Unit *Condensor (Tube)* Sebelum Optimasi

Berdasarkan laju kegagalan sub-sub-sub unit *condensor (tube)*, maka model pemeliharaan dapat digolongkan sebagai pemeliharaan pencegahan (*preventive maintenance*). Sehubungan dengan kegiatan pemeliharaan pencegahan tersebut, laju biaya pemeliharaan pencegahan per unit waktu dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.40, yaitu:

$$C(t) = \frac{C_p R(t) + C_f(1 - R(t))}{tR(t) + \int_0^t tf(t)dt}$$

$$= \frac{(2.265.000 \times 0,371) + (29.707.068 \times (1 - 0,371))}{(2.668 \times 0,371) + \int_0^t tf(t)dt}$$

Parameter fungsi *Weibull 3* sub-sub-sub unit *condensor* adalah $\beta = 1,0188$, $\eta = 2.648,492$ dan $\gamma = 40,06$. Fungsi padat peluang sebelum optimasi ($t = \text{MTBF} = 2.668,2$) adalah:

$$f(2.668,2) = \frac{1,0188}{2.648,492} \left(\frac{2.668,2 - 40,06}{2.648,492} \right)^{1,0188-1} \exp \left[- \left(\frac{2.668,2 - 40,06}{2.648,492} \right)^{1,0188} \right]$$

Dari penghitungan diperoleh laju biaya sebesar Rp. 19.736/jam.

5.4.2 Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan Sub-Sub-Sub Unit yang Lain

Dengan cara yang sama maka didapatkan laju biaya ($C(t)$) per jam untuk setiap sub-sub-sub unit yang lain, untuk sebelum dan setelah optimasi, dan ditunjukkan pada Tabel 5.14. Rincian perhitungan optimasi untuk sub-sub-sub unit lainnya dapat dilihat pada Lampiran 4.

Tabel 5.14 Laju Biaya (C(t)) per Jam untuk Setiap Sub-Sub-Sub Unit

No	Sub-Sub-Sub Unit	Laju Biaya [(C(t)) per jam]			
		Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi		
			70%	80%	90%
1	<i>Condensor (Tube)</i>	19.736	16.155	15.360	14.991
2	<i>Condensor (Valve)</i>	3.974	-	-	-
3	<i>Gland Steam Condensor</i>	3.743	648	505	359
4	<i>Condensate Preheater System 1</i>	1.598	571	566	550
5	<i>Condensate Preheater System 2</i>	667	-	-	-
6	<i>Deaerator</i>	3.015	702	558	421
7	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	5.496	3.968	3.444	3.304
8	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	4.334	2.468	1.801	1.421
9	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	3.347	1.091	780	547
10	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	6.625	3.890	3.055	2.102
11	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	2.776	186	178	170
12	<i>Economizer System 1</i>	2.973	823	725	681
13	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	5,461	4.625	4.478	4.153
14	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	4.308	1.641	1.154	771
15	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	4.121	507	400	325
16	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	4.541	3.046	2.904	-
17	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	3.146	1.117	770	540
18	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	2.756	660	539	477
19	<i>HP Evaporator System 3</i>	2.406	777	665	643
20	<i>Superheater System 1</i>	5.585	4.737	4.430	4.171
21	<i>Superheater System 2</i>	2.481	1.163	1.107	972
22	<i>Superheater System 3</i>	2.550	2.345	2.319	-
Total		95.637	51.120	45.736	36.598

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

5.4.3 Penurunan Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan per Siklus

Komponen-komponen biaya yang dihitung adalah laju biaya pemeliharaan pencegahan per siklus dan penurunan laju biaya pemeliharaan pencegahan per siklus. Berdasarkan persamaan 2.40, nilai laju biaya sebelum optimasi diperoleh dari biaya pemeliharaan pencegahan (C_p dan C_f) dibagi rata-rata waktu antar kegagalan atau MTBF masing-masing sub-sub-sub unit peralatan. Nilai laju biaya setelah optimasi adalah hasil pengolahan data dengan perangkat lunak *Microsoft Excel* sesuai dengan target keandalan (R_G). Nilai laju biaya adalah biaya pemeliharaan pencegahan (C_p dan C_f) dibagi waktu interval waktu pemeliharaan pencegahan optimal sesuai dengan Tabel 5.14.

Laju biaya ini dihitung dalam satu siklus pemeliharaan pencegahan, yaitu saat selesai dilakukannya pemeliharaan pencegahan sampai saat pemeliharaan pencegahan berikutnya dari sub-sub-sub unit. Interval waktu pemeliharaan pencegahan dan jumlah pemeliharaan pencegahan per tahun sebelum dan setelah optimasi dapat dilihat pada Tabel 5.15.

Tabel 5.15 Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dan Jumlah Pemeliharaan Pencegahan per Tahun

No	Sub-Sub-Sub Unit	Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan (Jam)				Jumlah Interval Pemeliharaan Pencegahan Per Tahun			
		Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi			Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi		
			0,7	0,8	0,9		0,7	0,8	0,9
1	<i>Condensor (Tube)</i>	2.668	766	510	273	3	11	17	32
2	<i>Condensor (Valve)</i>	10.537	-	-	-	1	-	-	-
3	<i>Gland Steam Condensor</i>	9.580	6.707	6.402	6.070	1	1	1	1
4	<i>Condensate Preheater System 1</i>	19.598	6.226	5.665	4.821	0	1	2	2
5	<i>Condensate Preheater System 2</i>	39.102	-	-	-	0	-	-	-
6	<i>Deaerator</i>	8.893	6.634	6.186	5.502	1	1	1	2
7	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	8.428	3.061	1.793	808	1	3	5	11
8	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	7.154	5.200	3.920	2.444	1	2	2	4
9	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	9.538	6.720	5.874	4.855	1	1	1	2
10	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	8.146	3.237	2.287	1.658	1	3	4	5
11	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	16.826	9.830	9.126	8.606	1	1	1	1

Tabel 5.15 Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dan Jumlah Pemeliharaan Pencegahan per Tahun (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan (Jam)				Jumlah Interval Pemeliharaan Pencegahan Per Tahun			
		Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi			Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi		
			0,7	0,8	0,9		0,7	0,8	0,9
12	<i>Economizer System 1</i>	10.702	7.392	6.705	5.780	1	1	1	2
13	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	9.764	2.707	1.238	292	1	3	7	30
14	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	10.658	5.646	4.652	3.890	1	2	2	2
15	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	11.393	8.339	8.178	8.045	1	1	1	1
16	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	8.116	3.551	1.668	-	1	2	5	-
17	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	9.457	6.612	5.495	4.178	1	1	2	2
18	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	10.341	7.645	6.946	5.999	1	1	1	1
19	<i>HP Evaporator System 3</i>	14.302	5.681	4.204	2.657	1	2	2	3
20	<i>Superheater System 1</i>	11.096	3.851	2.270	1.037	1	2	4	8
21	<i>Superheater System 2</i>	12.964	4.910	2.908	612	1	2	3	14
22	<i>Superheater System 3</i>	15.664	3.238	603	-	1	3	15	-
TOTAL						20	45	78	124

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

Pada saat keandalan sub unit sistem sirkulasi air dan uap setelah optimasi ditargetkan sebesar 0,9, interval waktu pemeliharaan pencegahan peralatan yang terpanjang dimiliki oleh sub-sub-sub unit *LP boiler circulating pump 3A* selama 8.606 jam atau 359 hari. Interval waktu pemeliharaan pencegahan peralatan terpendek dimiliki oleh sub-sub-sub unit *condensor (tube)* selama 273 jam atau 11 hari.

Laju biaya pemeliharaan pencegahan dan penurunan laju biaya pemeliharaan pencegahan per siklus pada saat interval waktu pemeliharaan pencegahan sebelum dioptimasi dan setelah dioptimasi ditunjukkan oleh Tabel 5.16 dan Tabel 5.17.

Tabel 5.16 Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan per Siklus

No	Sub-sub-sub Unit	R Sebelum Optimasi	Laju Biaya per Siklus			
			Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi		
				70%	80%	90%
1	<i>Condensor (Tube)</i>	37,1%	52.659.529	12.374.969	7.833.460	4.092.630
2	<i>Condensor (Valve)</i>	45,7%	41.873.005	-	-	-
3	<i>Gland Steam Condensor</i>	45,2%	35.856.916	4.345.524	3.232.857	2.180.087
4	<i>Condensate Preheater System 1</i>	51,2%	31.324.423	3.553.177	3.205.631	2.653.424
5	<i>Condensate Preheater System 2</i>	53,1%	26.062.233	-	-	-
6	<i>Deaerator</i>	52,8%	26.815.549	4.660.012	3.451.881	2.314.825
7	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	38,5%	46.318.919	12.147.622	6.175.967	2.670.394
8	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	49,1%	31.007.920	12.836.175	7.059.293	3.473.750
9	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	48,5%	31.921.917	7.332.258	4.581.441	2.656.154
10	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	35,3%	53.970.561	12.592.272	6.986.893	3.485.481
11	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	38,8%	46.707.423	1.823.898	1.620.868	1.458.749
12	<i>Economizer System 1</i>	51,8%	31.810.716	6.082.688	4.861.864	3.937.832
13	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	36,6%	53.318.144	12.520.894	5.544.253	1.212.551
14	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	39,7%	45.908.378	9.264.992	5.368.144	2.999.874
15	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	39,8%	46.950.502	4.224.217	3.273.342	2.612.016
16	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	44,0%	36.853.032	10.815.665	4.843.077	-
17	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	49,9%	29.745.927	7.387.088	4.229.264	2.255.988
18	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	53,2%	28.503.785	5.041.916	3.745.834	2.859.809
19	<i>HP Evaporator System 3</i>	46,1%	34.408.765	4.415.272	2.794.426	1.707.577
20	<i>Superheater System 1</i>	40,1%	61.970.622	18.242.567	10.053.791	4.323.509
21	<i>Superheater System 2</i>	48,6%	32.165.965	5.709.015	3.218.915	595.023
22	<i>Superheater System 3</i>	46,1%	39.947.205	7.592.560	1.398.124	-
Total			866.101.435	162.962.784	93.479.325	47.489.673

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

Tabel 5.17 Penurunan Laju Biaya Pemeliharaan Pencegahan per Siklus

No	Sub-Sub-Sub Unit	Penurunan Laju Biaya per Siklus		
		R _G = 0,7	R _G = 0,8	R _G = 0,9
1	<i>Condensor (Tube)</i>	40.284.560	44.826.069	48.566.899
2	<i>Condensor (Valve)</i>	41.873.005	41.873.005	41.873.005
3	<i>Gland Steam Condensor</i>	31.511.391	32.624.059	33.676.828
4	<i>Condensate Preheater System 1</i>	27.771.246	28.118.793	28.670.999
5	<i>Condensate Preheater System 2</i>	26.062.233	26.062.233	26.062.233
6	<i>Deaerator</i>	22.155.537	23.363.668	24.500.724
7	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	34.171.297	40.142.952	43.648.526
8	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	18.171.745	23.948.627	27.534.171
9	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	24.589.659	27.340.476	29.265.763
10	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	41.378.289	46.983.668	50.485.080
11	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	44.883.525	45.086.554	45.248.674
12	<i>Economizer System 1</i>	25.728.028	26.948.852	27.872.884
13	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	40.797.250	47.773.891	52.105.593
14	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	36.643.386	40.540.234	42.908.504
15	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	42.726.285	43.677.160	44.338.487
16	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	26.037.366	32.009.955	36.853.032
17	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	22.358.839	25.516.664	27.489.939
18	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	23.461.869	24.757.951	25.643.976
19	<i>HP Evaporator System 3</i>	29.993.493	31.614.339	32.701.188
20	<i>Superheater System 1</i>	43.728.055	51.916.830	57.647.113
21	<i>Superheater System 2</i>	26.456.950	28.947.050	31.570.942
22	<i>Superheater System 3</i>	32.354.645	38.549.082	39.947.205
Total		703.138.652	772.622.110	818.611.762

Sumber: Hasil pengolahan data dengan *Microsoft Excel*

Biaya pemeliharaan pencegahan per siklus dari sub-sub-sub unit peralatan sub unit sistem sirkulasi air dan uap mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya keandalan. Besarnya laju biaya pemeliharaan pencegahan per siklus dan penurunan laju biaya pemeliharaan pencegahan per siklus berdasarkan target keandalan (R_G) adalah:

- Untuk $R_G = 0,7$, laju biaya adalah sebesar Rp. 162.962.784 per siklus dan penurunan laju biaya adalah sebesar Rp. 703.138.652 per siklus.
- Untuk $R_G = 0,8$, laju biaya adalah sebesar Rp. 93.479.325 per siklus dan penurunan laju biaya adalah sebesar Rp. 772.622.110 per siklus.
- Untuk $R_G = 0,9$, laju biaya adalah sebesar Rp. 47.489.673 per siklus dan penurunan laju biaya adalah sebesar Rp. 818.611.762 per siklus.

5.5 Pembahasan

Keandalan sub unit berbanding terbalik dengan laju biaya pemeliharaan pencegahan. Semakin tinggi keandalan sub unit maka semakin rendah laju biaya pemeliharaan pencegahan yang harus ditanggung oleh perusahaan. Hal ini sangat menguntungkan bagi perusahaan karena dengan tingginya nilai keandalan maka waktu operasi juga akan tinggi, sehingga target *output* akan tercapai. Tabel 5.16 menunjukkan bahwa laju biaya total pemeliharaan pencegahan persiklus terendah dimiliki pada saat target keandalan sub unit sebesar 0,9. Jika perusahaan dapat mengusahakan keandalan sub unit sebesar 0,9, maka laju biaya total pemeliharaan pencegahan yang harus ditanggung oleh perusahaan adalah sebesar Rp. 47.489.673/siklus. Laju biaya total pemeliharaan pencegahan persiklus tersebut lebih murah dibandingkan dengan laju biaya total pemeliharaan pencegahan persiklus keandalan sub unit pada saat ini.

Metode alokasi dan optimasi keandalan merupakan salah satu metode untuk menerapkan manajemen pemeliharaan pencegahan dengan pendekatan analisis keandalan. Penerapan metode tersebut membutuhkan dukungan dari pihak internal perusahaan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut terkait dengan perencanaan manajemen pemeliharaan di PT. XYZ.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan optimasi, analisis dan pembahasan yang dilakukan pada bab-bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Interval waktu pemeliharaan pencegahan pada saat target keandalan sub unit sistem sirkulasi air dan uap sebesar 0,9 adalah:
 - a. Interval waktu pemeliharaan pencegahan sub-sub unit terpanjang dimiliki oleh sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah (PATR) sebesar 8.606 jam (359 hari).
 - b. Interval waktu pemeliharaan pencegahan sub-sub unit terpendek dimiliki oleh sub-sub unit pemanasan awal air (PAA) sebesar 273 jam (11 hari).
2. Laju biaya pemeliharaan pencegahan per siklus pada saat target keandalan sub unit sistem sirkulasi air dan uap sebesar 0,9 adalah:
 - a. Laju biaya total pemeliharaan pencegahan per siklus adalah Rp. 47.489.673 per siklus.
 - b. Penurunan laju biaya total pemeliharaan pencegahan per siklus adalah Rp. 818.611.762 per siklus.

6.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah menggunakan teknik simulasi agar dapat menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan dengan menggunakan berbagai macam skenario yang berhubungan dengan perubahan-perubahan biaya, ketersediaan, keselamatan dan keuntungan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Balakrishnan, N., dan Basu, A. P., (1995), *The Exponential Distribution: Theory, Methods and Application*, First Edition, OPA, Amsterdam.
- Buwana, A. W., (2006), Analisa Keandalan Sebagai Dasar Optimasi Interval Waktu Pemeliharaan pada Sistem Fine Grinding Studi Kasus di PT. Central Proteinaprima, Tesis tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.
- Carlson, C. S., (2012), *Effective FMEAs Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effects Analysis*, First Edition, A John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- David, J. S., (2011), *Reliability, Maintainability, and Risk: Practical Methods for Engineers*, Eighth Edition, Butterworth-Heinemann, Boston.
- Dodson, B., (2002), *The Weibull Analysis Handbook*, First Edition, ASQ Quality Press, Milwaukee.
- Ebeling, C. E., (1997), *Reliability and Maintainability Engineering*, International Edition, McGraw-Hill, New York.
- Enders, C. K., (2010), *Applied Missing Data Analysis*, First Edition, The Guilford Press, New York.
- Jardine, A. K. S. dan Tsang, A. H. C., (2013), *Maintenance, Replacement, and Reliability*, Second Edition, CRC Press, New York.
- Kristianto, Y. R., (2017), Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dan Jumlah Tenaga Kerja pada Peralatan Sub Unit RKC 3 di PT. X Pabrik Tuban, Tesis tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.
- Lewis, E. E., (1998), *Introduction to Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, First Edition, New York.
- Malaiya, Y. K., (2005), Reliability Allocation, Colorado State University, Fort Collins.
- Mettas, A., (2000), Reliability Allocation and Optimization for Complex System, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Los Angeles.

- Mishra, R. dan Pathak, K., (2004), *Maintenance Engineering and Management*, First Edition, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi.
- Mobley, R. K., Higgins, L. R., dan Wikoff, D., (2008), *Maintenance Engineering Handbook*, Seventh Edition, McGraw-Hill Education, New York.
- Montgomery, D.C., (2012), *Design and Analysis of Experiment*, Eighth Edition, John Willey & Sons, Inc., New York.
- Nurmala, Y. R., (2015), Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan serta Laju Biayanya Berdasarkan Alokasi dan Optimasi Keandalan pada Peralatan Sub Unit Sintesa Unit Urea di PT. X, Tesis tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.
- Park, S.H., (1996). *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, First Edition, Springer, New Delhi.
- Saaty, T. L., (1998), *Decision Making For Leaders; The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*, RWS Publication, Pittsburgh.
- Slack, N., (2001), *Operations Management 3rd edition*, Prentice Hall, London.
- Soejanto, I., (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Edisi Pertama, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Stephens, K. S., (2012), *Reliability Data Analysis with Excel and Minitab*, First Edition, ASQ Quality Press, Milwaukee.
- 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.
- Wilkins, D. J., (2002), *Reliability Engineering Resources*, diakses tanggal 2 Maret 2018, <http://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm>

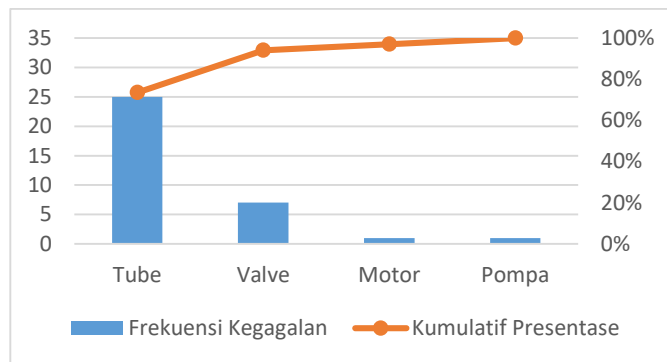
LAMPIRAN A

1. Diagram Pareto

1.1 Condensor

Tabel A.1 *Condensor*

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Tube</i>	25	73.5%	73.5%
2	<i>Valve</i>	7	20.6%	94.1%
3	<i>Motor</i>	1	2.9%	97.1%
4	Pompa	1	2.9%	100.0%
Total		34	100%	



Gambar A.1 Diagram Pareto *condensor*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Tube* dan *Valve*.

1.2 *Condensate Extraction Pump A*

Pada sub-sub-sub unit *condensate extration pump A* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

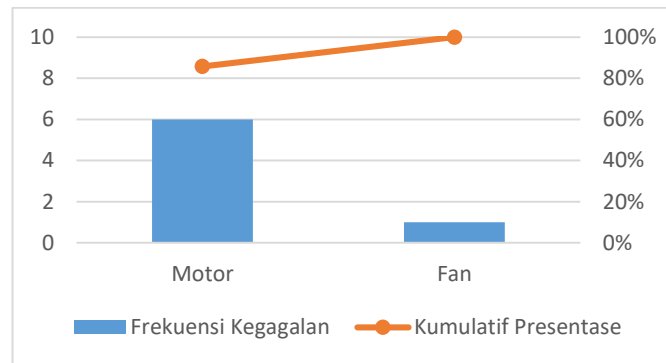
1.3 *Condensate Extraction Pump B*

Pada sub-sub-sub unit *condensate extration pump B* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.4 *Gland Steam Condensor*

Tabel A.2 *Gland Steam Condensor*

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Motor</i>	6	85.7%	85.7%
2	<i>Fan</i>	1	14.3%	100.0%
Total		7	100%	



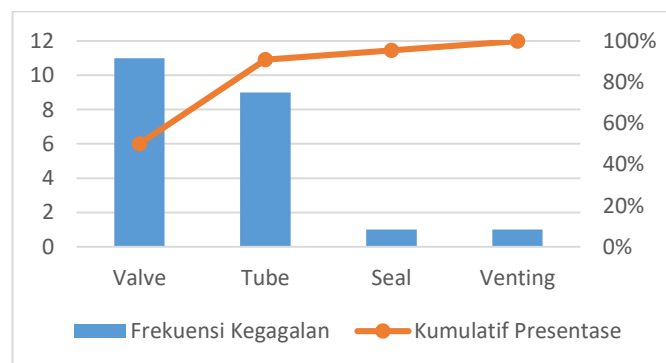
Gambar A.2 Diagram Pareto *gland steam condensor*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *motor*.

1.5 Condensate Preheater System 1

Tabel A.3 *Condensate Preheater System 1*

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Valve</i>	11	50.0%	50.0%
2	<i>Tube</i>	9	40.9%	90.9%
3	<i>Seal</i>	1	4.5%	95.5%
4	<i>Venting</i>	1	4.5%	100.0%
Total		22	100%	



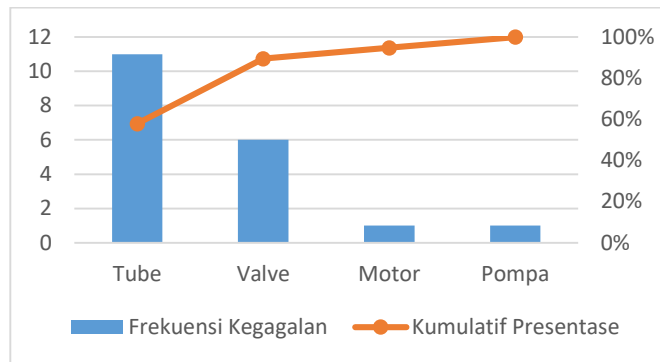
Gambar A.3 Diagram Pareto *condensate preheater system 1*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Valve* dan *Tube*.

1.6 Condensate Preheater System 2

Tabel A.4 Condensate Preheater System 2

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Tube</i>	11	57.9%	57.9%
2	<i>Valve</i>	6	31.6%	89.5%
3	<i>Motor</i>	1	5.3%	94.7%
4	<i>Pompa</i>	1	5.3%	100.0%
Total		19	100%	



Gambar A.4 Diagram Pareto Condensate Preheater System 2

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Tube* dan *Valve*.

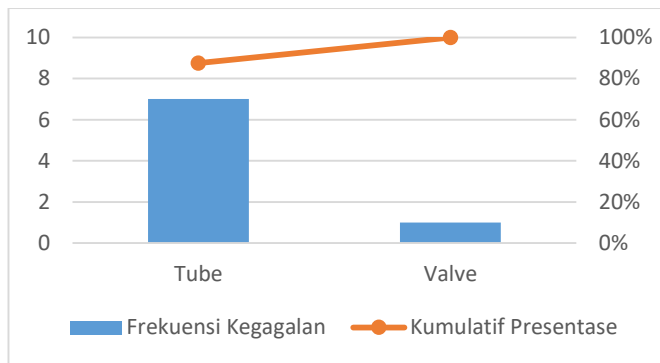
1.7 Condensate Preheater System 3

Pada sub-sub-sub unit *condensate preheater system 3* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.8 Deaerator

Tabel A.5 Deaerator

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Tube</i>	7	87.5%	87.5%
2	<i>Valve</i>	1	12.5%	100.0%
Total		8	100%	



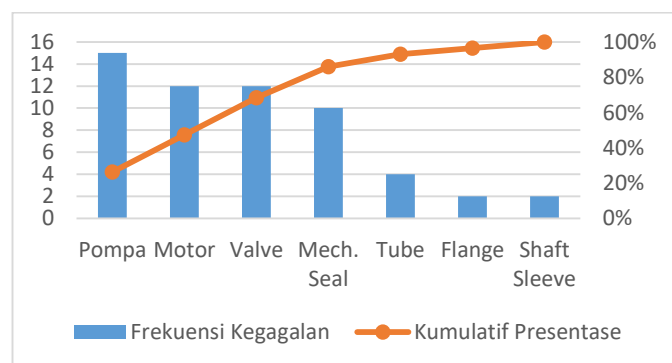
Gambar A.5 Diagram Pareto *deaerator*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Tube*.

1.9 LP Boiler Feed Pump A

Tabel A.6 LP Boiler Feed Pump A

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	Pompa	15	26.3%	26.3%
2	<i>Motor</i>	12	21.1%	47.4%
3	<i>Valve</i>	12	21.1%	68.4%
4	<i>Mech. Seal</i>	10	17.5%	86.0%
5	<i>Tube</i>	4	7.0%	93.0%
6	<i>Flange</i>	2	3.5%	96.5%
7	<i>Shaft Sleeve</i>	2	3.5%	100.0%
Total		57	100%	



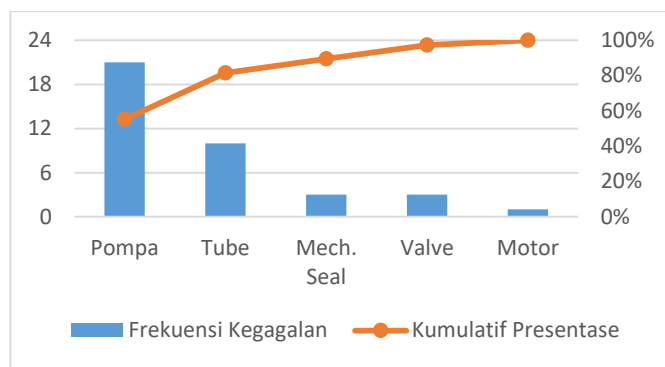
Gambar A.6 Diagram Pareto *LP boiler feed pump A*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen Pompa, *Motor*, *Valve* dan *Mech Seal*.

1.10 LP Boiler Feed Pump B

Tabel A.7 LP Boiler Feed Pump B

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	Pompa	21	55.3%	55.3%
2	<i>Tube</i>	10	26.3%	81.6%
3	<i>Mech. Seal</i>	3	7.9%	89.5%
4	<i>Valve</i>	3	7.9%	97.4%
5	<i>Motor</i>	1	2.6%	100.0%
Total		38	100%	



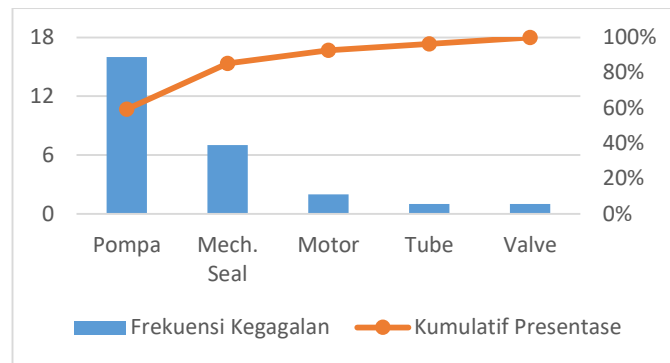
Gambar A.7 Diagram Pareto LP boiler feed pump B

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen Pompa dan *Tube*.

1.11 LP Boiler Feed Pump C

Tabel A.8 LP Boiler Feed Pump C

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	Pompa	16	59.3%	59.3%
2	<i>Mech. Seal</i>	7	25.9%	85.2%
3	<i>Motor</i>	2	7.4%	92.6%
4	<i>Tube</i>	1	3.7%	96.3%
5	<i>Valve</i>	1	3.7%	100.0%
Total		27	100%	



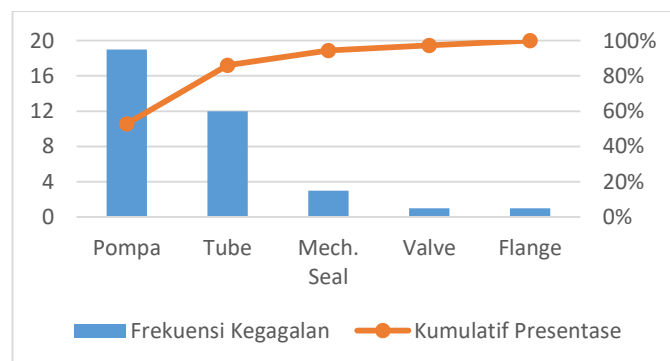
Gambar A.8 Diagram Pareto LP boiler feed pump C

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen Pompa dan Mech Seal.

1.12 LP Boiler Feed Pump D

Tabel A.9 LP Boiler Feed Pump D

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	Pompa	19	52.8%	52.8%
2	Tube	12	33.3%	86.1%
3	Mech. Seal	3	8.3%	94.4%
4	Valve	1	2.8%	97.2%
5	Flange	1	2.8%	100.0%
Total		36	100%	



Gambar A.9 Diagram Pareto LP boiler feed pump D

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen Pompa dan Tube.

1.13 LP Boiler Circulating Pump 1A

Pada sub-sub-sub unit LP boiler circulating pump 1A tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.14 LP Boiler Circulating Pump 1B

Pada sub-sub-sub unit *LP boiler circulating pump 1B* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

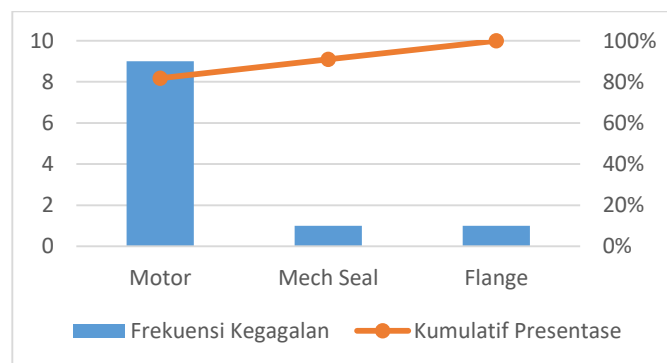
1.15 LP Boiler Circulating Pump 2A

Pada sub-sub-sub unit *LP boiler circulating pump 2A* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.16 LP Boiler Circulating Pump 2B

Tabel A.10 LP Boiler Circulating Pump 2B

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Motor</i>	9	81.8%	81.8%
2	<i>Mech Seal</i>	1	9.1%	90.9%
3	<i>Flange</i>	1	9.1%	100.0%
Total		11	100%	



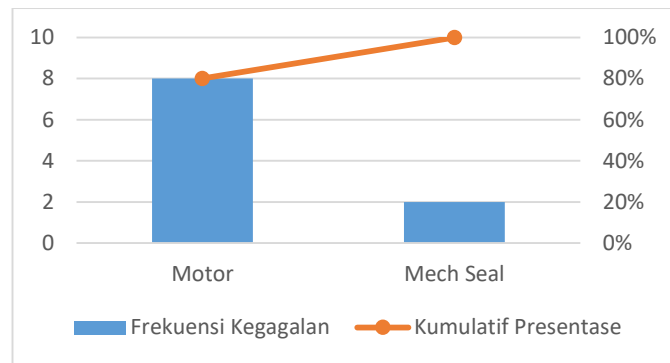
Gambar A.10 Diagram Pareto LP boiler circulating pump 2B

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Motor*.

1.17 LP Boiler Circulating Pump 3A

Tabel A.11 LP Boiler Circulating Pump 3A

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Motor</i>	8	80.0%	80.0%
2	<i>Mech Seal</i>	2	20.0%	100.0%
Total		10	100%	



Gambar A.11 Diagram Pareto *LP boiler circulating pump 3A*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen Motor.

1.18 *LP Boiler Circulating Pump 3B*

Pada sub-sub-sub unit *LP boiler circulating pump 3B* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.19 *LP Evaporator System 1*

Pada sub-sub-sub unit *LP evaporator system 1* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.20 *LP Evaporator System 2*

Pada sub-sub-sub unit *LP evaporator system 2* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

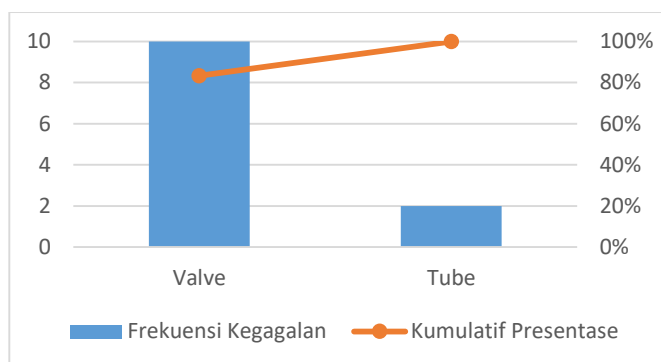
1.21 *LP Evaporator System 3*

Pada sub-sub-sub unit *LP evaporator system 3* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.22 *Economizer System 1*

Tabel A.12 *Economizer System 1*

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Valve</i>	10	83.3%	83.3%
2	<i>Tube</i>	2	16.7%	100.0%
Total		12	100%	



Gambar A.12 Diagram Pareto *economizer system 1*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Valve*.

1.23 *Economizer System 2*

Pada sub-sub-sub unit *economizer system 2* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

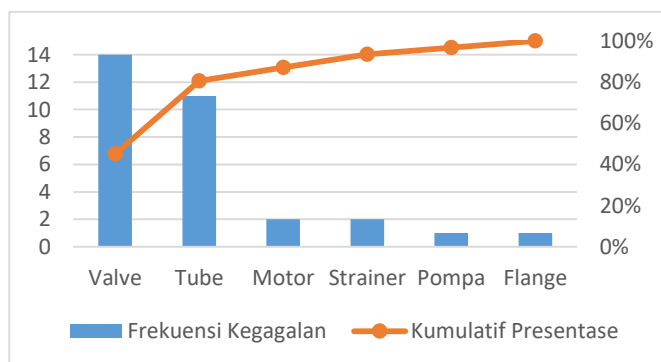
1.24 *Economizer System 3*

Pada sub-sub-sub unit *economizer system 3* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.25 *HP Boiler Feed Pump A*

Tabel A.13 *HP Boiler Feed Pump A*

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Valve</i>	14	45.2%	45.2%
2	<i>Tube</i>	11	35.5%	80.6%
3	<i>Motor</i>	2	6.5%	87.1%
4	<i>Strainer</i>	2	6.5%	93.5%
5	Pompa	1	3.2%	96.8%
6	<i>Flange</i>	1	3.2%	100.0%
Total		31	100%	



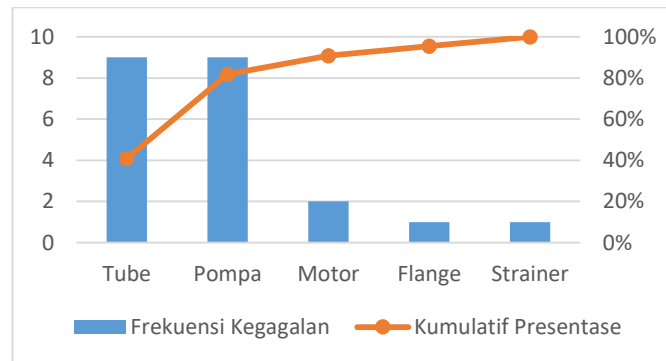
Gambar A.13 Diagram Pareto *HP boiler feed pump A*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Valve* dan *Tube*.

1.26 HP Boiler Feed Pump B

Tabel A.14 HP Boiler Feed Pump B

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Tube</i>	9	40.9%	40.9%
2	Pompa	9	40.9%	81.8%
3	<i>Motor</i>	2	9.1%	90.9%
4	<i>Flange</i>	1	4.5%	95.5%
5	<i>Strainer</i>	1	4.5%	100.0%
Total		22	100%	



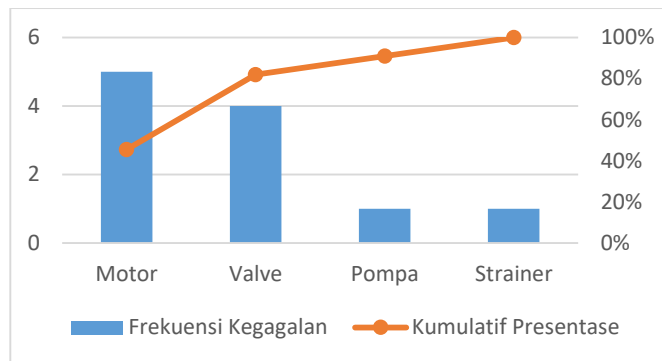
Gambar A.14 Diagram Pareto HP boiler feed pump B

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Tube* dan Pompa.

1.27 HP Boiler Feed Pump C

Tabel A.15 HP Boiler Feed Pump C

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Motor</i>	5	45.5%	45.5%
2	<i>Valve</i>	4	36.4%	81.8%
3	Pompa	1	9.1%	90.9%
4	<i>Strainer</i>	1	9.1%	100.0%
Total		11	100%	



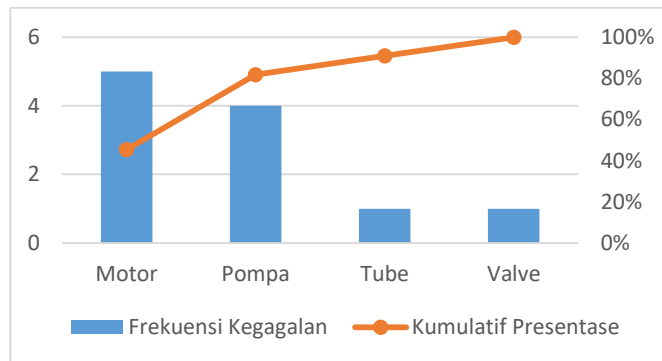
Gambar A.15 Diagram Pareto *HP boiler feed pump C*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Motor* dan *Valve*.

1.28 *HP Boiler Feed Pump D*

Tabel A.16 *HP Boiler Feed Pump D*

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Motor</i>	5	45.5%	45.5%
2	Pompa	4	36.4%	81.8%
3	<i>Tube</i>	1	9.1%	90.9%
4	<i>Valve</i>	1	9.1%	100.0%
Total		11	100%	



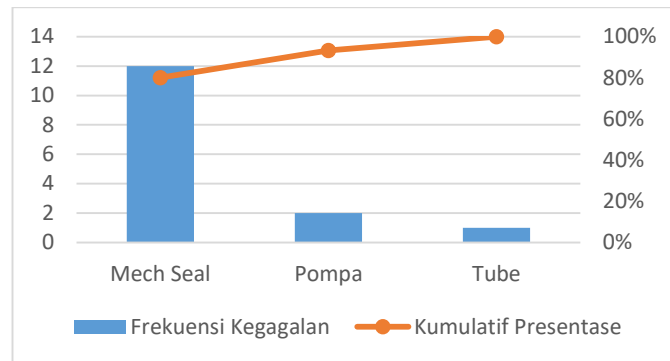
Gambar A.16 Diagram Pareto *HP boiler feed pump D*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Motor* dan Pompa.

1.29 HP Boiler Circulating Pump 1A

Tabel A.17 HP Boiler Circulating Pump 1A

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Mech Seal</i>	12	80.0%	80.0%
2	Pompa	2	13.3%	93.3%
3	<i>Tube</i>	1	6.7%	100.0%
Total		15	100%	



Gambar A.17 Diagram Pareto HP boiler circulating pump 1A

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Mech Seal*.

1.30 HP Boiler Circulating Pump 1B

Pada sub-sub-sub unit *HP boiler circulating pump 1B* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.31 HP Boiler Circulating Pump 2A

Pada sub-sub-sub unit *HP boiler circulating pump 2A* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.32 HP Boiler Circulating Pump 2B

Pada sub-sub-sub unit *HP boiler circulating pump 2B* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

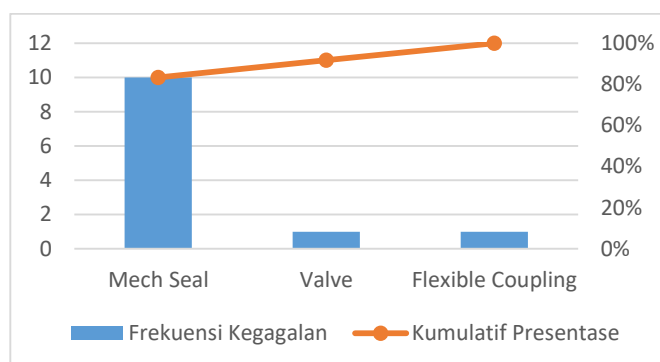
1.33 HP Boiler Circulating Pump 3A

Pada sub-sub-sub unit *HP boiler circulating pump 3A* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.34 HP Boiler Circulating Pump 3B

Tabel A.18 HP Boiler Circulating Pump 3B

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Mech Seal</i>	10	83.3%	83.3%
2	<i>Valve</i>	1	8.3%	91.7%
3	<i>Flexible Coupling</i>	1	8.3%	100.0%
Total		12	100%	



Gambar A.18 Diagram Pareto HP boiler circulating pump 3B

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Mech Seal*.

1.35 HP Evaporator System 1

Pada sub-sub-sub unit *HP evaporator system 1* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

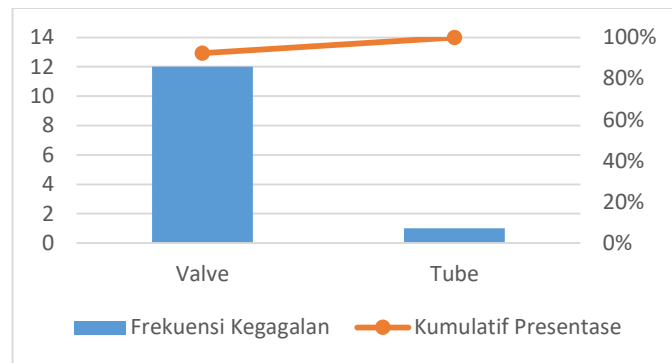
1.36 HP Evaporator System 2

Pada sub-sub-sub unit *HP evaporator system 2* tidak terdapat kegagalan, sehingga nilai keandalannya adalah 1.

1.37 HP Evaporator System 3

Tabel A.19 HP Evaporator System 3

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Valve</i>	12	92.3%	92.3%
2	<i>Tube</i>	1	7.7%	100.0%
Total		13	100%	



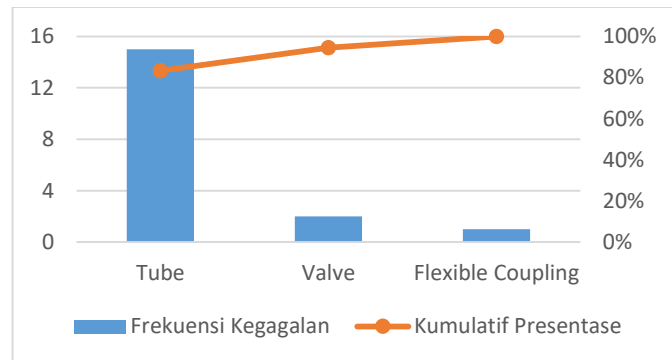
Gambar A.19 Diagram Pareto *HP evaporator system 3*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Valve*.

1.38 Superheater System 1

Tabel A.20 *Superheater System 1*

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Tube</i>	15	83.3%	83.3%
2	<i>Valve</i>	2	11.1%	94.4%
3	<i>Flexible Coupling</i>	1	5.6%	100.0%
Total		18	100%	



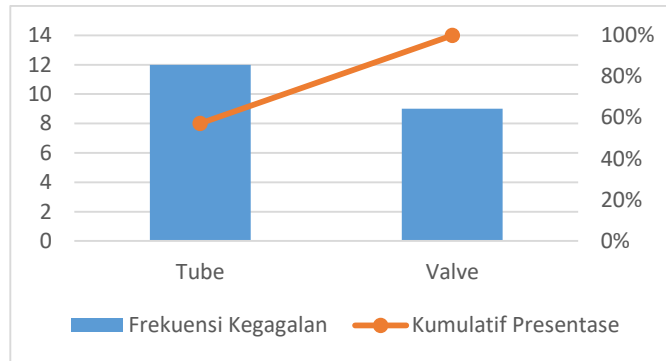
Gambar A.20 Diagram Pareto *superheater system 1*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Tube*.

1.39 Superheater System 2

Tabel A.21 Superheater System 2

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Tube</i>	12	57.1%	57.1%
2	<i>Valve</i>	9	42.9%	100.0%
Total		21	100%	



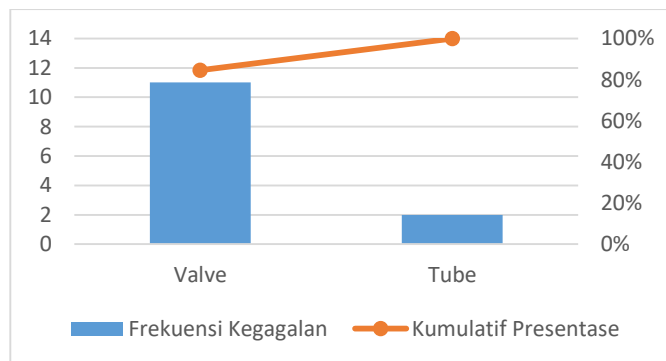
Gambar A.21 Diagram Pareto *superheater system 2*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Tube*.

1.40 Superheater System 3

Tabel A.22 Superheater System 3

No	Komponen	Frekuensi Kegagalan	Presentase	Kumulatif Presentase
1	<i>Valve</i>	11	84.6%	84.6%
2	<i>Tube</i>	2	15.4%	100.0%
Total		13	100%	



Gambar A.22 Diagram Pareto *superheater system 3*

Dengan menggunakan prinsip diagram Pareto 80/20, 20% dari penyebab kegagalan mengakibatkan 80% kegagalan peralatan, maka dipilihlah komponen *Valve*.

2. Analisis Variansi Blok 1, Blok 2 dan Blok 3

Tabel A.23 Data Waktu Antar Kegagalan dan Waktu Perbaikan Komponen-Komponen Sub-Sub Unit dari Sub Unit Blok 1, Blok 2 dan Blok 3.

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Time Between Failure (TBF)		
			Blok 1	Blok 2	Blok 3
1	<i>Condensor</i>	<i>Valve</i>	23.472	7.248	840
			10.752	4.224	2.112
			840	6.648	1.416
			528	24	13.296
			15.816	3.120	2.376
			840	21.000	456
				4.488	1.272
				216	6.840
		<i>Tube</i>	2.232	4.248	6.840
			11.592	10.896	10.656
			2.544	1.440	4.536
			504	4.872	4.104
			336	1.920	2.952
			168	6.792	120
			1.632	5.664	168
			5.352	6.144	1.416
			744	13.920	3.600
			2.016		768
			3.768		576
			2.784		384
			4.056		720
			1.296		528
			1.800		2.112
			4.464		312
			624		2.256
			192		2.616
			2.832		264
			816		1.008
			7.656		11.448
			3.288		
			888		
			1.632		

Tabel A.23 Data Waktu Antar Kegagalan dan Waktu Perbaikan Komponen-Komponen Sub-Sub Unit dari Sub Unit Blok 1, Blok 2 dan Blok 3 (Lanjutan).

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Time Between Failure (TBF)		
			Blok 1	Blok 2	Blok 3
2	<i>Gland Steam Condensor</i>	<i>Motor</i>	8.088		
			10.200		
			6.960		
			12.288		
			9.720		
3	<i>Condensate Preheater System 1</i>	<i>Valve</i>	25.032	19.032	17.088
			18.288	25.944	20.952
			9.720		18.288
		<i>Tube</i>	20.040	25.272	26.688
			14.760	19.392	21.264
			12.456		
4	<i>Condensate Preheater System 2</i>	<i>Tube</i>	3.480		10.872
			21.048		11.808
			3.456		11.568
			13.752		11.832
			2.352		
		<i>Valve</i>	17.544		13.416
			23.328		18.792
5	<i>Deaerator</i>	<i>Tube</i>	10.200		
			6.696		
			7.656		
			8.928		
			9.192		
			10.920		
6	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Pompa</i>	5.520		7.032
			7.368		5.448
			6.576		12.528
			1.512		
			11.616		
			2.592		
			2.256		
			816		
			11.064		
			8.280		
		<i>Motor</i>	7.848	984	14.904
			1.848	1.680	7.080
			28.584	27.216	
				10.224	

Tabel A.23 Data Waktu Antar Kegagalan dan Waktu Perbaikan Komponen-Komponen Sub-Sub Unit dari Sub Unit Blok 1, Blok 2 dan Blok 3 (lanjutan).

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Time Between Failure (TBF)		
			Blok 1	Blok 2	Blok 3
		<i>Valve</i>	4.680		
			20.136		
			5.736		
			288		
		<i>Mechanical Seal</i>	4.968	3.432	984
			14.616		13.056
			9.288		12.576
7	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	Pompa	9.864	9.096	
			9.648	5.136	
			9.048	13.224	
			3.936	8.760	
			8.304	8.472	
			2.208	5.904	
			3.168	1.896	
			3.144	4.992	
			3.696		
			6.048		
		<i>Tube</i>	5.424	11.088	8.856
			6.696	11.976	
			7.128		
			10.680		
8	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	Pompa	9.360	6.168	6.168
			10.296	10.824	13.104
			11.880	12.048	7.728
			10.440	9.912	
			8.400	6.960	
		<i>Mechanical Seal</i>	9.360	15.648	8.616
				4.800	
9	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	Pompa	3.024	3.696	17.544
			2.784	20.928	9.024
			1.656	3.528	
			3.072	16.824	
			1.632	1.992	
			7.080		
			6.120		

Tabel A.23 Data Waktu Antar Kegagalan dan Waktu Perbaikan Komponen-Komponen Sub-Sub Unit dari Sub Unit Blok 1, Blok 2 dan Blok 3 (lanjutan).

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Time Between Failure (TBF)		
			Blok 1	Blok 2	Blok 3
			9.816		9.048
			5.904		1.440
		<i>Tube</i>	10.272	6.504	8.880
			14.808	3.144	
				8.688	24.288
				10.464	
10	<i>LP Boiler Circulating Pump 2B</i>	<i>Motor</i>	11.376	28.944	
			17.544	13.752	
			17.880		
11	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	<i>Motor</i>	9.648	18.912	
			17.064	11.112	
			26.304	13.728	
12	<i>Economizer System 1</i>	<i>Valve</i>	12.456	11.544	
			9.816	7.560	
			12.864	8.904	15.312
				11.880	12.864
13	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Valve</i>	6.720	552	14.016
			24.984	1.128	
			2.544	8.496	
				96	1.512
				22.152	7.968
		<i>Tube</i>	6.120	11.592	2.424
			11.400	5.928	16.968
				11.616	
14	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	<i>Tube</i>	19.608	11.688	
			5.064	4.032	6.216
				5.640	14.928
		<i>Pompa</i>	10.992	7.128	
			8.784	12.264	
15	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	<i>Motor</i>	8.496		
			12.024		
			10.632		
			9.984		
		<i>Valve</i>	10.992		
			16.968		
			9.432		

Tabel A.23 Data Waktu Antar Kegagalan dan Waktu Perbaikan Komponen-Komponen Sub-Sub Unit dari Sub Unit Blok 1, Blok 2 dan Blok 3 (lanjutan).

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Time Between Failure (TBF)				
			Blok 1	Blok 2	Blok 3		
16	HP Boiler Feed Pump D	Motor	16.992				
			8.208				
			5.088				
				Pompa	2.976		
			8.760				
			792			7.896	
			11.808			8.328	
17	HP Boiler Circulating Pump 1A	Mechanical Seal	11.232	12.456			
			7.104	5.232	12.648		
			11.184	11.952	7.848		
18	HP Boiler Circulating Pump 3B	Mechanical Seal	10.392	9.192	10.992		
			9.504	12.120	14.376		
					17.568		
19	HP Evaporator System 3	Valve	19.848	25.752			
			15.504	4.080			
				9.696			
				10.536	9.288		
				9.648	19.872		
20	Superheater System 1	Tube	33.864	10.848			
			7.344	1.656			
			4.512	1.608			
				3.000			
				14.592			
				11.904			
				8.112	13.032		
				15.552			
21	Superheater System 2	Tube	19.320	11.424			
			1.800	5.640			
			16.944	4.824	9.216		
			11.496	9.408	29.568		
		Valve	18.384	12.600	28.608		
			15.240	14.616	9.504		
22	Superheater System 3	Valve	9.576	1.224	8.184		
			16.272	18.384			
				30.336			

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*.

Setelah melakukan ANAVA pada blok 1, blok 2 dan blok 3, dilakukan pengujian asumsi *residual*. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap *residual* data TBF dari komponen-komponen sub-sub-sub unit blok 1, blok 2 dan blok 3.

1. Uji Independen dan Uji Identik

Tabel A.24 Hasil Uji Independen dan Uji Identik TBF dari Komponen-Komponen Sub-Sub-Sub Unit Blok 1, Blok 2 dan Blok 3

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Residual Data	
			Uji Independen	Uji Identik
1	<i>Condensor</i>	<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
		<i>Valve</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
2	<i>Condensate Preheater System 1</i>	<i>Valve</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
		<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
3	<i>Condensate Preheater System 2</i>	<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
		<i>Valve</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
4	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	Pompa	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
		<i>Motor</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
		<i>Mech Seal</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
5	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	Pompa	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
		<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
6	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	Pompa	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
		<i>Mech Seal</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
7	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	Pompa	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak
		<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar lag	Tersebar secara acak

Tabel A.24 Hasil Uji Independen dan Uji Identik TBF dari Komponen-Komponen Sub-Sub-Sub Unit Blok 1, Blok 2 dan Blok 3 (lanjutan).

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Residual Data	
			Uji Independen	Uji Identik
8	<i>LP Boiler Circulating Pump 2B</i>	<i>Motor</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
9	<i>LP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Motor</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
10	<i>Economizer System 1</i>	<i>Valve</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
11	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Valve</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
		<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
12	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
		Pompa	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
13	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	<i>Mech Seal</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
14	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Mech Seal</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
15	<i>HP Evaporator System 3</i>	<i>Valve</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
16	<i>Superheater System 1</i>	<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
17	<i>Superheater System 2</i>	<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
		<i>Valve</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
18	<i>Superheater System 3</i>	<i>Tube</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Minitab*

Selain sub-sub-sub unit yang ada pada table tersebut, terdapat sub-sub-sub unit yang tidak perlu diuji *residual* dikarenakan sudah memiliki nilai keandalan

sama dengan satu atau dikarenakan kegagalan komponen hanya terjadi pada blok 1 saja. Hal ini dapat dilihat pada Tabel A.25.

Tabel A.25 Sub-Sub-Sub Unit yang tidak perlu dilakukan Uji *Residual*

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Keterangan
1	<i>Condensate Extraction Pump A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
2	<i>Condensate Extraction Pump B</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
3	<i>Gland Steam Condensor</i>	<i>Motor</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
4	<i>Condensate Preheater System 3</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
5	<i>Deaerator</i>	<i>Tube</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
6	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Valve</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
7	<i>LP Boiler Circulating Pump 1A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
8	<i>LP Boiler Circulating Pump 1B</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
9	<i>LP Boiler Circulating Pump 2A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
10	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
11	<i>LP Evaporator System 1</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
12	<i>LP Evaporator System 2</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
13	<i>LP Evaporator System 3</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
14	<i>Economizer System 2</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
15	<i>Economizer System 3</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
16	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	<i>Motor</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
		<i>Valve</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
17	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	<i>Motor</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
		<i>Pompa</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
18	<i>HP Boiler Circulating Pump 1B</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
19	<i>HP Boiler Circulating Pump 2A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
20	<i>HP Boiler Circulating Pump 2B</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
21	<i>HP Boiler Circulating Pump 3A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
22	<i>HP Evaporator System 1</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
23	<i>HP Evaporator System 2</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
24	<i>LP Turbin</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
25	<i>HP Turbin</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*.

2. Uji Kenormalan dan Uji Kesamaan Variansi

Hasil pengujian normal dari data TBF komponen-komponen sub-sub-sub unit blok 1, blok 2 dan blok 3 dengan metode *Kolmogorov-Smirnov* dan uji kesamaan variasi dengan data TBF dengan metode *Levene* dapat dilihat pada Tabel A.26.

Tabel A.26 Hasil Uji Kenormalan dan Uji Kesamaan TBF dari Komponen-Komponen Sub-Sub-Sub Unit Blok 1, Blok 2 dan Blok 3

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Uji Kenormalan	Uji Kesamaan Variasi
			P-Value	P-Value
1	<i>Condensor</i>	<i>Tube</i>	<0,010	0,535
		<i>Valve</i>	0,012	0,312
2	<i>Condensate Preheater System 1</i>	<i>Valve</i>	>0,150	0,366
		<i>Tube</i>	>0,150	0,971
3	<i>Condensate Preheater System 2</i>	<i>Tube</i>	0,086	0,211
		<i>Valve</i>	>0,150	0,953
4	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Pompa</i>	>0,150	0,552
		<i>Motor</i>	>0,150	0,784
		<i>Mech Seal</i>	>0,150	0,854
5	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	<i>Pompa</i>	0,085	0,620
		<i>Tube</i>	>0,150	0,480
6	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	<i>Pompa</i>	>0,150	0,443
		<i>Mech Seal</i>	>0,150	0,484
7	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	<i>Pompa</i>	>0,150	0,319
		<i>Tube</i>	0,142	0,994
8	<i>LP Boiler Circulating Pump 2B</i>	<i>Motor</i>	>0,150	0,127
9	<i>LP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Motor</i>	>0,150	0,408
10	<i>Economizer System 1</i>	<i>Valve</i>	>0,150	0,397
11	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Valve</i>	0,144	0,61
		<i>Tube</i>	>0,150	0,958
12	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	<i>Tube</i>	>0,150	0,136
		<i>Pompa</i>	>0,150	0,587
13	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	<i>Mech Seal</i>	>0,150	0,707
14	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	<i>Mech Seal</i>	>0,150	0,545
15	<i>HP Evaporator System 3</i>	<i>Valve</i>	0,077	0,787
16	<i>Superheater System 1</i>	<i>Tube</i>	>0,150	0,587
17	<i>Superheater System 2</i>	<i>Tube</i>	>0,150	0,228
		<i>Valve</i>	>0,150	0,167
18	<i>Superheater System 3</i>	<i>Tube</i>	>0,150	0,741

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Minitab*

Selain sub-sub-sub unit yang ada pada tabel tersebut, terdapat sub-sub-sub unit yang tidak perlu diuji kenormalan dan kesamaan variansi, dikarenakan sudah memiliki nilai keandalan sama dengan satu atau dikarenakan kegagalan komponen hanya terjadi pada blok 1 saja. Hal ini dapat dilihat pada Tabel A.27.

Tabel A.27 Sub-Sub-Sub Unit yang tidak perlu dilakukan Uji Kenormalan dan Kesamaan Variansi

No	Sub-Sub-Sub Unit	Komponen	Keterangan
1	<i>Condensate Extraction Pump A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
2	<i>Condensate Extraction Pump B</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
3	<i>Gland Steam Condensor</i>	<i>Motor</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
4	<i>Condensate Preheater System 3</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
5	<i>Deaerator</i>	<i>Tube</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
6	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	<i>Valve</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
7	<i>LP Boiler Circulating Pump 1A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
8	<i>LP Boiler Circulating Pump 1B</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
9	<i>LP Boiler Circulating Pump 2A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
10	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
11	<i>LP Evaporator System 1</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
12	<i>LP Evaporator System 2</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
13	<i>LP Evaporator System 3</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
14	<i>Economizer System 2</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
15	<i>Economizer System 3</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
16	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	<i>Motor</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
		<i>Valve</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
17	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	<i>Motor</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
		Pompa	Kegagalan hanya pada Blok 1
18	<i>HP Boiler Circulating Pump 1B</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
19	<i>HP Boiler Circulating Pump 2A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
20	<i>HP Boiler Circulating Pump 2B</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
21	<i>HP Boiler Circulating Pump 3A</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
22	<i>HP Evaporator System 1</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
23	<i>HP Evaporator System 2</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
24	<i>LP Turbin</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)
25	<i>HP Turbin</i>		Tidak terdapat kegagalan (R=1)

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*.

3. Analisis Variansi Komponen-Komponen Sub-Sub Unit

Setelah dilakukan ANAVA komponen-komponen sub-sub-sub unit dilakukan pengujian asumsi residual. Berikut ini adalah pengujian yang dilakukan terhadap *residual* data TBF dari komponen-komponen sub-sub-sub unit.

1. Uji Independen dan Uji Identik

Tabel A.28 Hasil Uji Independen dan Uji Identik TBF dari Komponen-Komponen Sub-Sub-Sub Unit

No	Sub-Sub-Sub Unit	Residual Data	
		Uji Independen	Uji Identik
1	<i>Condensor</i>	Terdapat korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
2	<i>Condensate Preheater System 1</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
3	<i>Condensate Preheater System 2</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
4	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
5	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
6	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
7	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
8	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
9	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
10	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
11	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak
12	<i>Superheater System 2</i>	Tidak ada korelasi antar <i>lag</i>	Tersebar secara acak

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Minitab*

Selain sub-sub-sub unit yang ada pada tabel tersebut, terdapat sub-sub-sub unit yang tidak perlu diuji *residual*, dikarenakan sudah memiliki nilai keandalan sama dengan satu atau dikarenakan kegagalan komponen hanya terjadi pada 1 komponen saja. Hal ini dapat dilihat pada Tabel A.29

Tabel A.29 Sub-Sub-Sub Unit yang tidak perlu dilakukan Uji *Residual*

No	Sub-Sub-Sub Unit	Keterangan
1	<i>Condensate Extraction Pump A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
2	<i>Condensate Extraction Pump B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
3	<i>Gland Steam Condensor</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
4	<i>Condensate Preheater System 3</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
5	<i>Deaerator</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
6	<i>LP Boiler Circulating Pump 1A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
7	<i>LP Boiler Circulating Pump 1B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
8	<i>LP Boiler Circulating Pump 2A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
9	<i>LP Boiler Circulating Pump 2B</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
10	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
11	<i>LP Boiler Circulating Pump 3B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
12	<i>LP Evaporator System 1</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
13	<i>LP Evaporator System 2</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
14	<i>LP Evaporator System 3</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
15	<i>Economizer System 1</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
16	<i>Economizer System 2</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
17	<i>Economizer System 3</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
18	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
19	<i>HP Boiler Circulating Pump 1B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
20	<i>HP Boiler Circulating Pump 2A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
21	<i>HP Boiler Circulating Pump 2B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
22	<i>HP Boiler Circulating Pump 3A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
23	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
24	<i>HP Evaporator System 1</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
25	<i>HP Evaporator System 2</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
26	<i>HP Evaporator System 3</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
27	<i>Superheater System 1</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
28	<i>Superheater System 3</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
29	<i>LP Turbin</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
42	<i>HP Turbin</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*.

2. Uji Kenormalan dan Uji Kesamaan Variansi

Hasil pengujian *residual* normal dari data TBF komponen-komponen sub-sub-sub unit blok 1, blok 2 dan blok 3 dengan metode *Kolmogorov-Smirnov* dan uji kesamaan variasi dengan data TBF dengan metode *Levene* dapat dilihat pada Tabel A.30

Tabel A.30 Hasil Uji Kenormalan dan Uji Kesamaan TBF dari Komponen-Komponen Sub-Sub-Sub Unit

No	Sub-Sub-Sub Unit	Uji Kenormalan	Uji Kesamaan Variasi
		P-Value	P-Value
1	<i>Condensor</i>	<0,010	0,001
2	<i>Condensate Preheater System 1</i>	>0,150	0,840
3	<i>Condensate Preheater System 2</i>	>0,150	0,545
4	<i>LP Boiler Feed Pump A</i>	>0,150	0,199
5	<i>LP Boiler Feed Pump B</i>	0,056	0,379
6	<i>LP Boiler Feed Pump C</i>	>0,150	0,318
7	<i>LP Boiler Feed Pump D</i>	0,142	0,330
8	<i>HP Boiler Feed Pump A</i>	>0,150	0,054
9	<i>HP Boiler Feed Pump B</i>	>0,150	0,077
10	<i>HP Boiler Feed Pump C</i>	>0,150	0,394
11	<i>HP Boiler Feed Pump D</i>	>0,150	0,853
12	<i>Superheater System 2</i>	>0,150	0,961

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Minitab*

Selain sub-sub-sub unit yang ada pada tabel tersebut, terdapat sub-sub-sub unit yang tidak perlu diuji kenormalan dan kesamaan variansi, dikarenakan sudah memiliki nilai keandalan sama dengan satu atau dikarenakan kegagalan komponen hanya terjadi pada 1 komponen saja. Hal ini dapat dilihat pada Tabel A.31

Tabel A.31 Sub-Sub-Sub Unit yang tidak perlu dilakukan Uji Kenormalan dan Kesamaan Variansi

No	Sub-Sub-Sub Unit	Keterangan
1	<i>Condensate Extraction Pump A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
2	<i>Condensate Extraction Pump B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
3	<i>Gland Steam Condensor</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
4	<i>Condensate Preheater System 3</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
5	<i>Deaerator</i>	Kegagalan hanya pada Blok 1
6	<i>LP Boiler Circulating Pump 1A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
7	<i>LP Boiler Circulating Pump 1B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
8	<i>LP Boiler Circulating Pump 2A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
9	<i>LP Boiler Circulating Pump 2B</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
10	<i>LP Boiler Circulating Pump 3A</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen

Tabel A.31 Sub-Sub-Sub Unit yang tidak perlu dilakukan Uji Kenormalan dan Kesamaan Variansi (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Keterangan
11	<i>LP Boiler Circulating Pump 3B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
12	<i>LP Evaporator System 1</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
13	<i>LP Evaporator System 2</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
14	<i>LP Evaporator System 3</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
15	<i>Economizer System 1</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
16	<i>Economizer System 2</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
17	<i>Economizer System 3</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
18	<i>HP Boiler Circulating Pump 1A</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
19	<i>HP Boiler Circulating Pump 1B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
20	<i>HP Boiler Circulating Pump 2A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
21	<i>HP Boiler Circulating Pump 2B</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
22	<i>HP Boiler Circulating Pump 3A</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
23	<i>HP Boiler Circulating Pump 3B</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
24	<i>HP Evaporator System 1</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
25	<i>HP Evaporator System 2</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
26	<i>HP Evaporator System 3</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
27	<i>Superheater System 1</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
28	<i>Superheater System 3</i>	Kegagalan hanya pada 1 komponen
29	<i>LP Turbin</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)
30	<i>HP Turbin</i>	Tidak terdapat kegagalan (R=1)

Sumber: Hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B

Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit

Tabel B.1 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit *Condensor (Tube)*

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	3.28E-05	2.07275346	-213.076s4	3
<i>Exponential 2</i>	0.27632139	3.043756	-214.48383	4
<i>Weibull 2</i>	0.00025023	1.56630693	-212.94133	2
<i>Weibull 3</i>	9.74E-06	1.6316399	-212.64096	1
<i>Normal</i>	40.6126346	7.9845406	-222.7436	6
<i>Lognormal</i>	5.7513104	3.05619412	-213.22967	5

Tabel B.2 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit *Condensor (Valve)*

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	3.73441307	7.57332215	-61.318975	3
<i>Exponential 2</i>	4.66042486	7.70768823	-61.28232	4
<i>Weibull 2</i>	1.32382384	6.96777689	-61.632153	2
<i>Weibull 3</i>	5.38E-07	4.03917778	-62.514842	1
<i>Normal</i>	4.83E-07	4.38915556	-62.679539	1
<i>Lognormal</i>	7.91451646	8.91002202	-62.009189	5

Tabel B.3 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit *ST 1.0 Gland Steam Condensor*

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	83.4154131	22.6974301	-50.876709	6
<i>Exponential 2</i>	0.0043476	6.09473789	-44.127169	4
<i>Weibull 2</i>	2.99E-08	3.8614164	-44.853528	3
<i>Weibull 3</i>	1.00E-10	2.6875166	-44.811217	1
<i>Normal</i>	4.04E-08	3.42733887	-44.905948	5
<i>Lognormal</i>	1.41E-08	2.77557515	-44.868616	2

Tabel B.4 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit *Condensate Preheater System 1*

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	99.8977493	26.1671119	-164.2887	6
<i>Exponential 2</i>	96.9228219	16.7809837	-153.32934	5
Weibull 2	0.05838533	3.99493071	-148.29891	1
<i>Weibull 3</i>	0.28527012	3.95091107	-148.21527	3
<i>Normal</i>	0.11286632	3.86650111	-148.37643	2
<i>Lognormal</i>	11.4158805	5.20446292	-149.4875	4

Tabel B.5 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit *Condensate Preheater System 2*

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	95.2770212	14.3764929	-135.88106	6
<i>Exponential 2</i>	90.2770757	11.3173213	-133.06651	5
<i>Weibull 2</i>	35.6941073	6.05701174	-132.69521	3
Weibull 3	0.51835918	4.5664107	-132.46119	1
<i>Normal</i>	2.66229131	4.89158663	-132.41683	2
<i>Lognormal</i>	67.6523138	8.81535415	-134.16075	4

Tabel B.6 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit *Deaerator*

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	94.6123298	25.3529886	-60.813345	6
<i>Exponential 2</i>	6.68228596	9.74584935	-52.274979	4
Weibull 2	1.00E-10	2.79298444	-52.258007	1
<i>Weibull 3</i>	4.98E-08	2.80621061	-52.33727	3
<i>Normal</i>	8.50E-09	3.08049938	-52.325643	2
<i>Lognormal</i>	5.43E-05	3.61139475	-52.437043	5

Tabel B.7 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit *LP Boiler Pump A*

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	29.8877559	4.03755633	-330.66121	4
<i>Exponential 2</i>	16.8292867	3.42658338	-329.48246	3
Weibull 2	0.34169837	2.37230773	-330.03868	1
<i>Weibull 3</i>	0.63396033	2.40412682	-330.06271	2
<i>Normal</i>	28.984263	5.87664569	-338.62861	5
<i>Lognormal</i>	40.1383514	4.94443531	-332.26029	6

Tabel B.8 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit LP Boiler Feed Pump B

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	99.4440758	19.2831567	-247.7542	6
<i>Exponential 2</i>	90.4785741	12.4312496	-239.47762	5
<i>Weibull 2</i>	12.0285298	2.83511639	-236.03719	3
<i>Weibull 3</i>	5.1459549	2.62407078	-236.06539	1
<i>Normal</i>	4.75319718	2.85452426	-236.43667	2
<i>Lognormal</i>	43.2288302	5.31624345	-238.00333	4

Tabel B.9 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit LP Boiler Feed Pump C

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	99.9725911	24.5135116	-173.6999	6
<i>Exponential 2</i>	82.2599992	12.8531802	-160.96058	5
<i>Weibull 2</i>	1.18E-07	2.22473772	-158.41658	2
<i>Weibull 3</i>	5.36E-08	2.17087159	-158.15939	1
<i>Normal</i>	5.17E-07	2.17821767	-158.42675	3
<i>Lognormal</i>	0.14242731	3.23743629	-158.42589	4

Tabel B.10 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit LP Boiler Feed Pump D

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	49.4999355	8.03048547	-248.20093	6
<i>Exponential 2</i>	12.6839435	4.52601918	-242.7985	2
<i>Weibull 2</i>	21.2363273	4.12675805	-245.6223	4
<i>Weibull 3</i>	3.03108564	3.72569802	-243.84252	1
<i>Normal</i>	34.9473759	5.96369837	-249.89053	5
<i>Lognormal</i>	14.5831973	4.43696542	-245.46184	3

Tabel B.11 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit LP Boiler Circulating Pump 2B

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	76.3408702	18.8442618	-65.17909	6
<i>Exponential 2</i>	0.00022822	5.49163899	-59.636254	3
<i>Weibull 2</i>	0.029023	4.82206733	-60.700175	4
<i>Weibull 3</i>	1.00E-10	3.18361341	-60.422364	1
<i>Normal</i>	0.05289	4.38835641	-60.901677	5
<i>Lognormal</i>	8.80E-08	3.55632994	-60.621888	2

Tabel B.12 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit LP Boiler Circulating Pump 3A

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	74.2617729	17.3810797	-64.188184	6
<i>Exponential 2</i>	8.92E-08	3.20180002	-59.148582	3
<i>Weibull 2</i>	1.00E-10	4.52710799	-60.17051	4
Weibull 3	1.00E-10	2.02914923	-59.590897	1
<i>Normal</i>	7.52E-08	4.98028119	-60.429062	5
<i>Lognormal</i>	1.00E-10	2.82590616	-59.980319	2

Tabel B.13 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit Economizer System 1

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	97.0515415	26.1255846	-72.289673	6
<i>Exponential 2</i>	24.3593395	12.5771396	-63.417968	5
<i>Weibull 2</i>	0.063963	4.52179928	-62.614305	2
Weibull 3	0.032636	4.18127867	-62.7536	1
<i>Normal</i>	0.54806088	5.45974226	-62.712685	3
<i>Lognormal</i>	1.78063774	5.60211845	-63.017781	4

Tabel B.14 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit HP Boiler Feed Pump A

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	27.1557107	5.30286182	-191.59866	4
<i>Exponential 2</i>	24.6504888	5.4573659	-191.38864	3
<i>Weibull 2</i>	19.0615485	4.9291962	-192.36028	3
Weibull 3	6.20494059	4.15018151	-192.2715	1
<i>Normal</i>	1.34387789	4.43629838	-194.9474	2
<i>Lognormal</i>	62.2922171	7.04070415	-194.94757	5

Tabel B.15 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit HP Boiler Feed Pump B

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	84.6613614	15.6336845	-123.01633	6
<i>Exponential 2</i>	1.89533396	4.02432213	-116.87273	3
<i>Weibull 2</i>	0.027505	4.20753581	-118.07569	4
Weibull 3	0.00080665	2.53713503	-117.49319	1
<i>Normal</i>	0.093829	4.41116149	-118.84076	5
<i>Lognormal</i>	0.0078747	3.13362344	-118.01035	2

Tabel B.16 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit HP Boiler Feed Pump C

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	97.3707869	23.1773549	-72.497597	5
<i>Exponential 2</i>	3.92E-06	5.00078893	-63.276885	1
<i>Weibull 2</i>	3.93217219	8.9647107	-66.1549	4
<i>Weibull 3</i>	2.14E-05	4.38919886	-63.238961	1
<i>Normal</i>	2.09645139	8.88446853	-64.939326	3
<i>Lognormal</i>	0.084059	6.58117906	-64.091135	2

Tabel B.17 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit HP Boiler Feed Pump D

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	0.42276562	5.80071674	-69.73664	5
<i>Exponential 2</i>	0.12087176	5.45324687	-68.995238	4
<i>Weibull 2</i>	2.89E-05	4.33374797	-69.612788	3
<i>Weibull 3</i>	1.00E-10	1.88979858	-69.529148	1
<i>Normal</i>	4.96E-09	3.38873387	-69.870029	2
<i>Lognormal</i>	0.15314141	6.43190835	-70.133941	6

Tabel B.18 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit HP Boiler Circulating Pump 1A

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	92.6049548	23.4068873	-81.499494	6
<i>Exponential 2</i>	24.2301752	12.2598799	-74.75066	5
<i>Weibull 2</i>	3.0857504	5.17132041	-73.906216	2
<i>Weibull 3</i>	1.41514092	4.93014161	-74.053754	1
<i>Normal</i>	5.25527957	5.60107342	-73.943844	3
<i>Lognormal</i>	7.19305982	5.67580008	-74.349166	4

Tabel B.19 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit HP Boiler Circulating Pump 3B

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	98.1297094	26.3073675	-72.081199	6
<i>Exponential 2</i>	6.04798844	10.4279105	-61.873237	5
<i>Weibull 2</i>	1.00E-10	2.80826032	-61.559909	1
<i>Weibull 3</i>	1.00E-10	2.4789833	-61.585882	2
<i>Normal</i>	5.64E-08	2.37129954	-61.623116	3
<i>Lognormal</i>	1.00E-10	2.99198515	-61.691442	4

Tabel B.20 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit HP Evaporator System 3

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	86.7212749	16.1364752	-95.101141	4
<i>Exponential 2</i>	50.2744034	10.334736	-91.933676	3
Weibull 2	0.017572	3.27646021	-91.225357	1
<i>Weibull 3</i>	0.0084601	3.33558582	-91.304677	1
<i>Normal</i>	0.00012391	3.4940491	-91.37172	1
<i>Lognormal</i>	0.92269565	4.86877508	-91.767481	2

Tabel B.21 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit Superheater System 1

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	4.39868518	5.05116859	-133.89655	6
<i>Exponential 2</i>	0.05598714	3.81499861	-132.29734	3
Weibull 2	1.35E-05	2.94824256	-133.18097	1
<i>Weibull 3</i>	0.0052126	3.24925403	-133.0976	2
<i>Normal</i>	0.27164658	5.62810527	-136.10733	5
<i>Lognormal</i>	2.03485568	4.56807545	-133.54439	4

Tabel B.22 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit Superheater System 2

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	94.0370221	15.1686497	-157.18839	5
<i>Exponential 2</i>	86.4317933	12.2977996	-154.82683	4
<i>Weibull 2</i>	1.530087	4.42531182	-152.8815	2
Weibull 3	0.00061696	3.46456463	-152.94482	1
<i>Normal</i>	0.00024305	3.63789211	-153.17837	1
<i>Lognormal</i>	21.5167353	6.1776896	-154.40144	3

Tabel B.23 Pemilihan Distribusi Data Antar Waktu Kegagalan pada Sub-Sub-Sub Unit Superheater System 3

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
<i>Exponential 1</i>	23.7373133	8.23580095	-85.068398	6
<i>Exponential 2</i>	9.82670859	7.95862737	-84.39565	4
<i>Weibull 2</i>	0.68796562	5.77937179	-84.722765	3
Weibull 3	0.014832	4.26569135	-84.567511	1
<i>Normal</i>	0.44981852	5.19083163	-84.79735	2
<i>Lognormal</i>	6.84341513	7.0376443	-85.574603	5

LAMPIRAN C

Penentuan Indeks Kelayakan Peralatan

1. Pendahuluan

Yth. Bapak/Ibu Responden,

Perkenalkan nama saya Bayu Wijaya, mahasiswa Magister Management Teknologi - ITS yang sedang melakukan penelitian dengan judul:

”Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan Berdasarkan Metode Alokasi dan Optimasi Keandalan pada Peralatan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap di Blok 1 (Studi Kasus di PT. XYZ)”

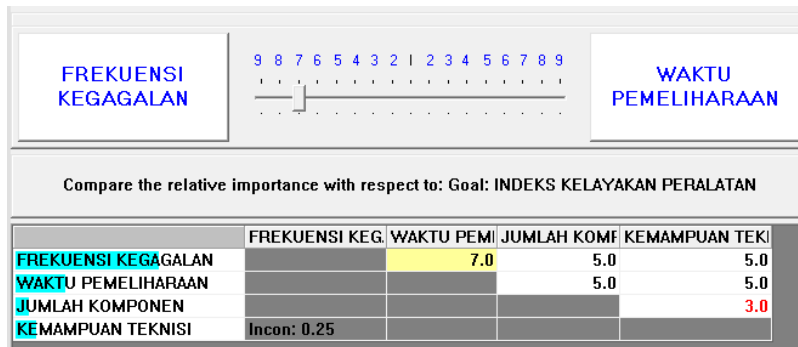
Saya mengharapkan kesediaan dan bantuan Bapak/Ibu untuk mengisi kuisisioner yang berkenaan dengan penentuan indeks kelayakan pada sub-sub unit peralatan di sub unit sistem sirkulasi air dan uap. Adapun penyebaran kuisisioner ini bersifat murni penelitian dan digunakan hanya pada penelitian ini.

Atas bantuan dan perhatiannya, saya ucapkan terima kasih.

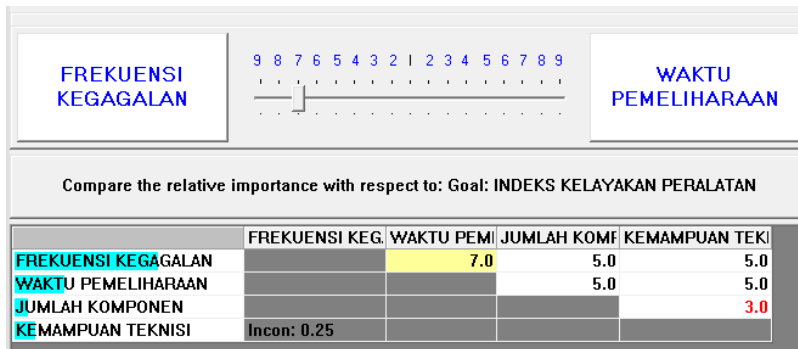
2. Perbandingan Berpasangan Antar Kriteria

	FREKUENSI KEG.	WAKTU PEMI	JUMLAH KOMF	KEMAMPUAN TEK
FREKUENSI KEGAGALAN		5.0	7.0	5.0
WAKTU PEMELIHARAAN			5.0	3.0
JUMLAH KOMPONEN				3.0
KEMAMPUAN TEKNISI	Incon: 0.09			

Gambar C.2.1 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar kriteria partisipan 1

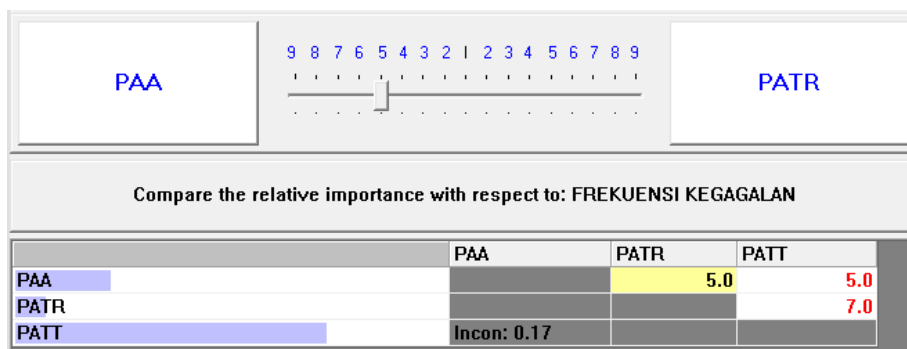


Gambar C.2.2 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar kriteria partisipan 2

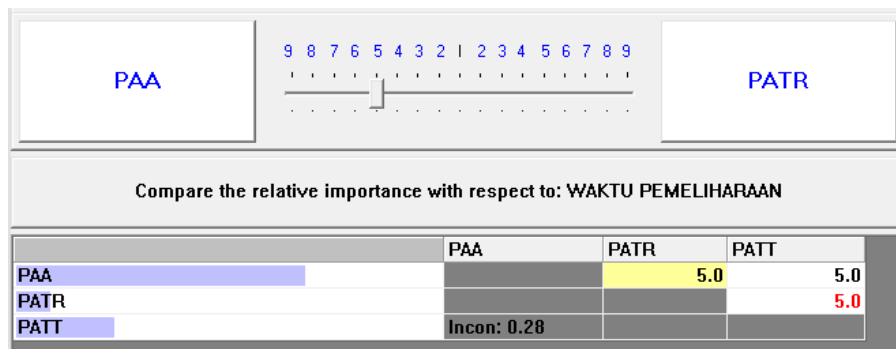


Gambar C.2.3 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar kriteria partisipan 3

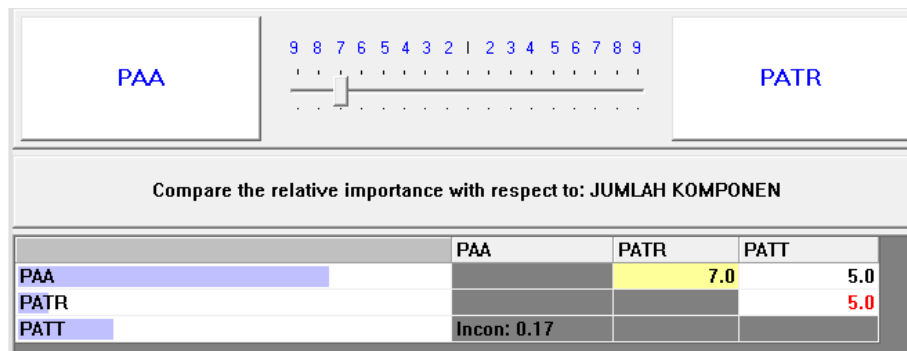
3. Perbandingan Berpasangan antar Sub Kriteria dengan Kriteria Partisipan 1



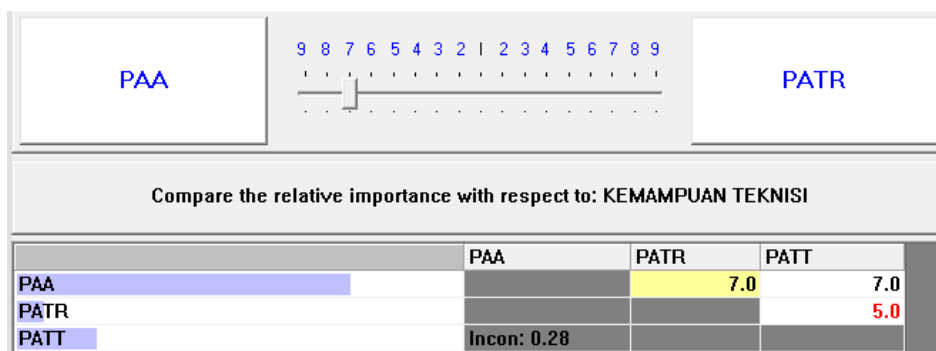
Gambar C.3.1 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria frekuensi kegagalan



Gambar C.3.2 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria waktu pemeliharaan

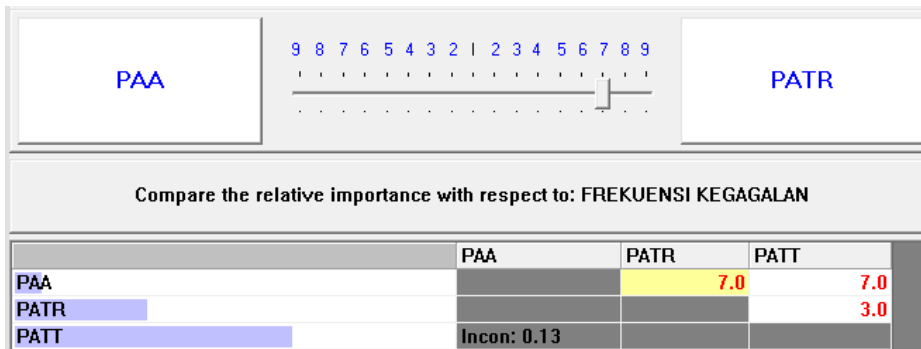


Gambar C.3.3 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria waktu operasional

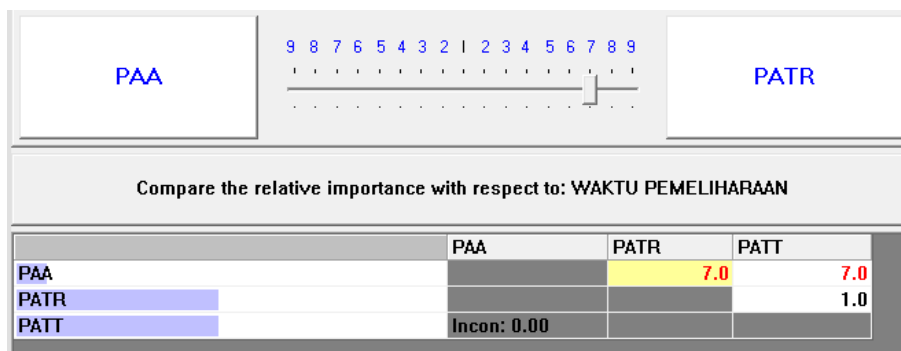


Gambar C.3.4 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria kemampuan teknisi

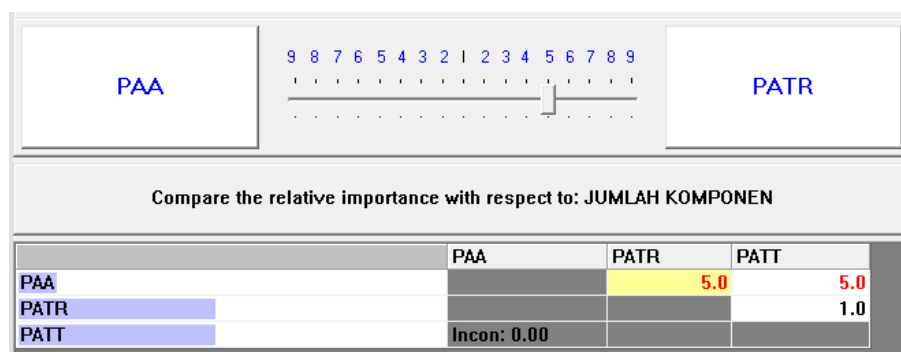
4. Perbandingan Berpasangan antar Sub Kriteria dengan Kriteria Partisipan 2



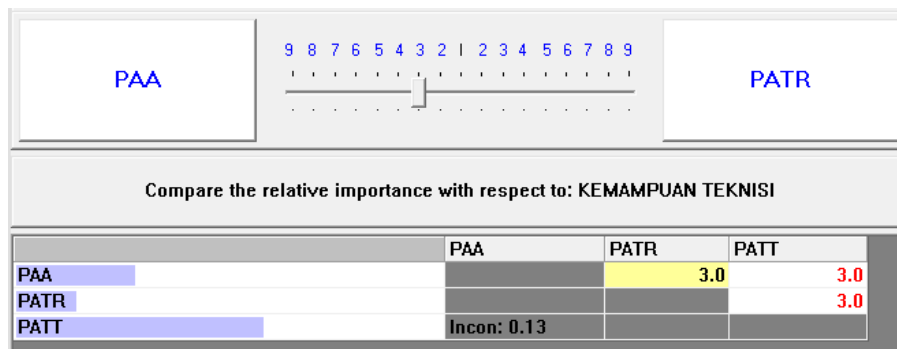
Gambar C.4.1 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria frekuensi kegagalan



Gambar C.4.2 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria waktu pemeliharaan

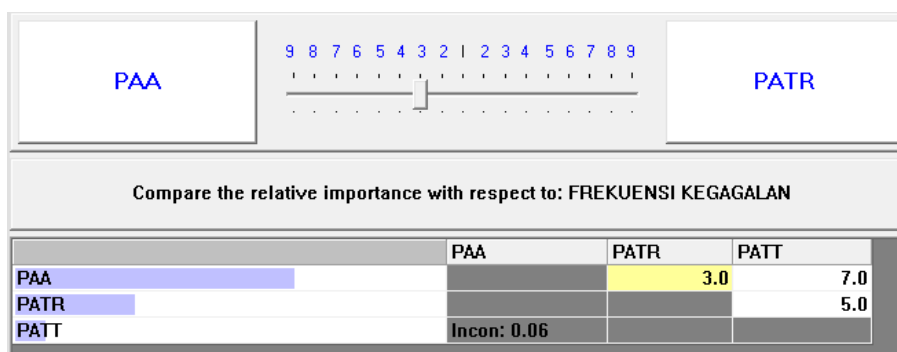


Gambar C.4.3 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria waktu operasional

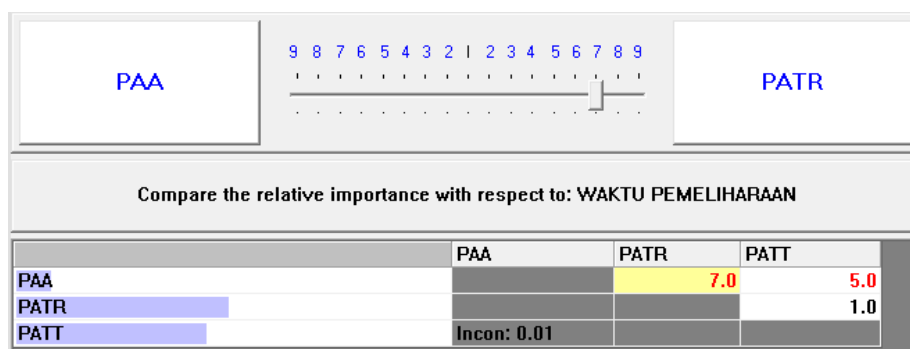


Gambar C.4.4 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria kemampuan teknis

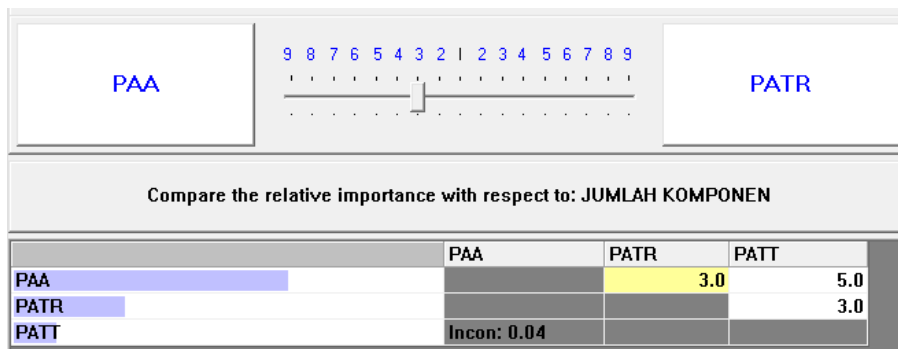
5. Perbandingan Berpasangan antar Sub Kriteria dengan Kriteria Partisipan 3



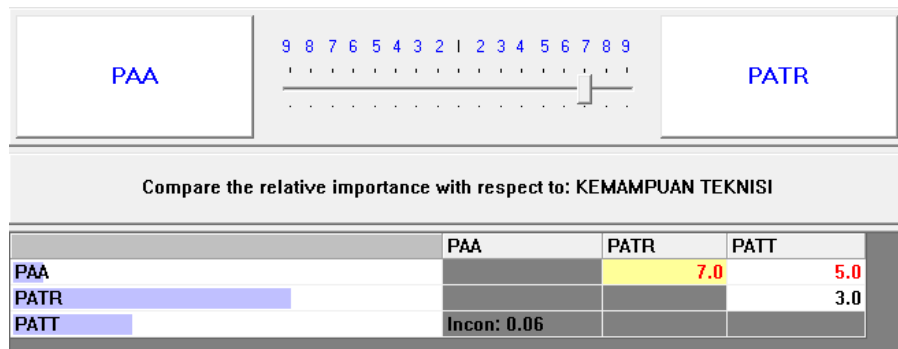
Gambar C.5.1 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria frekuensi kegagalan



Gambar C.5.2 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria waktu pemeliharaan

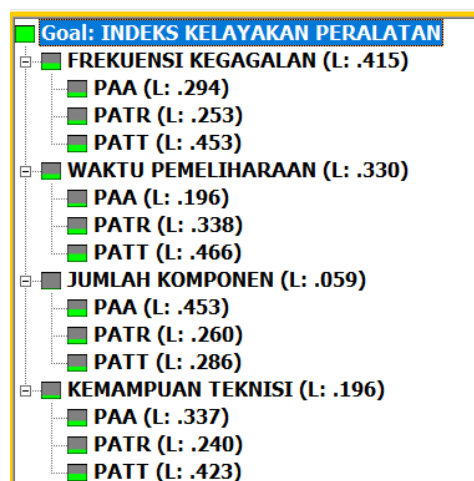


Gambar C.5.3 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria waktu operasional



Gambar C.5.4 Hasil input kuisisioner perbandingan berpasangan antar sub kriteria dengan kriteria kemampuan teknis

6. Hasil Sintesis Pembobotan Seluruh Responden

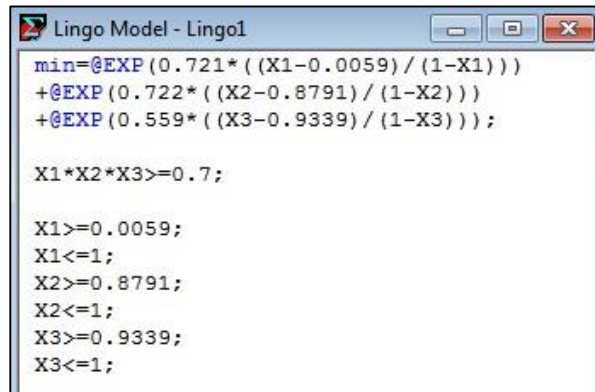


Gambar C.6.1 Bobot nilai kriteria dan sub kriteria

LAMPIRAN D

Nonlinear Programming

1. Input dan Output Data Untuk Target Keandalan Peralatan 70%

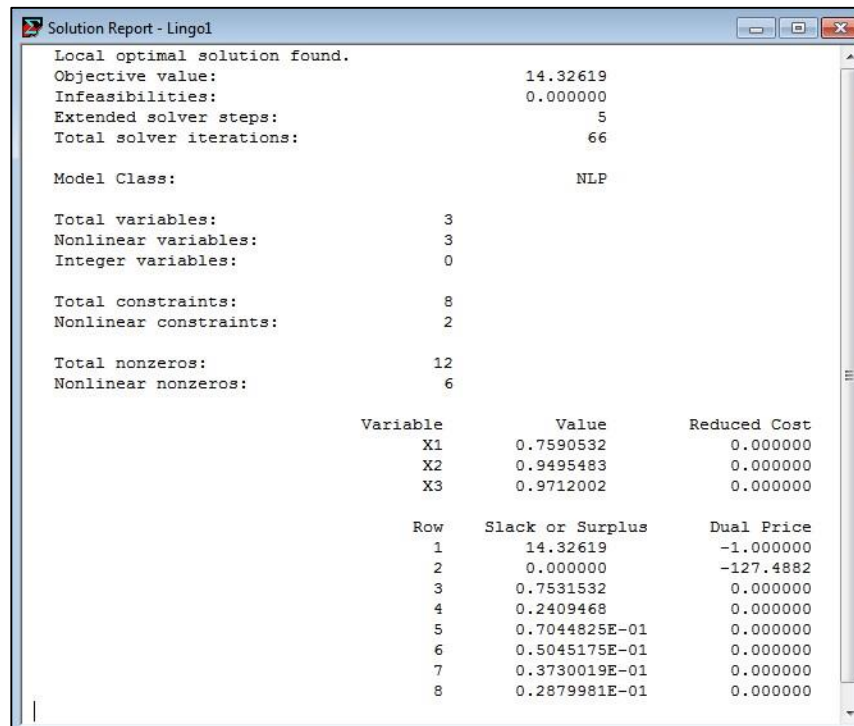


```
Lingo Model - Lingo1
min=@EXP(0.721*((X1-0.0059)/(1-X1)))
+@EXP(0.722*((X2-0.8791)/(1-X2)))
+@EXP(0.559*((X3-0.9339)/(1-X3)));

X1*X2*X3>=0.7;

X1>=0.0059;
X1<=1;
X2>=0.8791;
X2<=1;
X3>=0.9339;
X3<=1;
```

Gambar D.1 Input data untuk target keandalan 70%



```
Solution Report - Lingo1
Local optimal solution found.
Objective value: 14.32619
Infeasibilities: 0.000000
Extended solver steps: 5
Total solver iterations: 66

Model Class: NLP

Total variables: 3
Nonlinear variables: 3
Integer variables: 0

Total constraints: 8
Nonlinear constraints: 2

Total nonzeros: 12
Nonlinear nonzeros: 6
```

Variable	Value	Reduced Cost
X1	0.7590532	0.000000
X2	0.9495483	0.000000
X3	0.9712002	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	14.32619	-1.000000
2	0.000000	-127.4882
3	0.7531532	0.000000
4	0.2409468	0.000000
5	0.7044825E-01	0.000000
6	0.5045175E-01	0.000000
7	0.3730019E-01	0.000000
8	0.2879981E-01	0.000000

Gambar D.2 Output data untuk target keandalan 70%

2. Input dan Output Data Untuk Target Keandalan Peralatan 80%

```

Lingo Model - Lingo1
min=@EXP(0.721*((X1-0.0059)/(1-X1)))
+@EXP(0.722*((X2-0.8791)/(1-X2)))
+@EXP(0.559*((X3-0.9339)/(1-X3)));

X1*X2*X3>=0.8;

X1>=0.0059;
X1<=1;
X2>=0.8791;
X2<=1;
X3>=0.9339;
X3<=1;
    
```

Gambar D.3 Input data untuk target keandalan 80%

Local optimal solution found.

Objective value: 55.37780
 Infeasibilities: 0.000000
 Extended solver steps: 5
 Total solver iterations: 93

Model Class: NLP

Total variables: 3
 Nonlinear variables: 3
 Integer variables: 0

Total constraints: 8
 Nonlinear constraints: 2

Total nonzeros: 12
 Nonlinear nonzeros: 6

Variable	Value	Reduced Cost
X1	0.8374238	0.000000
X2	0.9704716	0.000000
X3	0.9843779	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	55.37780	-1.000000
2	0.000000	-1134.084
3	0.8315238	0.000000
4	0.1625762	0.000000
5	0.9137157E-01	0.000000
6	0.2952843E-01	0.000000
7	0.5047792E-01	0.000000
8	0.1562208E-01	0.000000

Gambar D.4 Output data untuk target keandalan 80%

3. Input dan Output Data Untuk Target Keandalan Peralatan 90%

```

Lingo Model - Lingo1
min=@EXP(0.721*((X1-0.0059)/(1-X1)))
+@EXP(0.722*((X2-0.8791)/(1-X2)))
+@EXP(0.559*((X3-0.9339)/(1-X3)));

X1*X2*X3>=0.9;

X1>=0.0059;
X1<=1;
X2>=0.8791;
X2<=1;
X3>=0.9339;
X3<=1;
    
```

Gambar D.5 Input data untuk target keandalan 90%

Local optimal solution found.

Objective value: 3498.291

Infeasibilities: 0.000000

Extended solver steps: 5

Total solver iterations: 143

Model Class: NLP

Total variables: 3

Nonlinear variables: 3

Integer variables: 0

Total constraints: 8

Nonlinear constraints: 2

Total nonzeros: 12

Nonlinear nonzeros: 6

Variable	Value	Reduced Cost
X1	0.9170502	0.000000
X2	0.9873667	-0.1746230E-08
X3	0.9939646	0.1001172E-07

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	3498.291	-1.000000
2	0.000000	-291995.8
3	0.9111502	0.000000
4	0.8294980E-01	0.000000
5	0.1082667	0.000000
6	0.1263326E-01	0.000000
7	0.6006457E-01	0.000000
8	0.6035431E-02	0.000000

Gambar D.6 Output data untuk target keandalan 90%

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN E

E. Laju Biaya

1. Laju Biaya Komponen Penyusun Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap Sebelum Optimasi

Tabel E.1 Laju Biaya Sub-Sub-Sub Unit Sebelum Optimasi

No	Sub-Sub-Sub Unit	Laju Biaya Total (C_T), Rp./Jam
1	Condensor (Tube)	$C_T = \frac{(2.265.000 \times 0,371) + (29.707.068 \times (1 - 0,371))}{(2.668 \times 0,371) + \int_0^t tf(t)dt}$
2	Condensor (Valve)	$C_T = \frac{(4.215.000 \times 0,457) + (31.657.068 \times (1 - 0,457))}{(10.537 \times 0,457) + \int_0^t tf(t)dt}$
3	Gland Steam Condensor	$C_T = \frac{(1.156.667 \times 0,452) + (28.598.743 \times (1 - 0,452))}{(9.580 \times 0,452) + \int_0^t tf(t)dt}$
4	Condensate Preheater System 1	$C_T = \frac{(2.623.333 \times 0,512) + (30.065.401 \times (1 - 0,512))}{(19.598 \times 0,512) + \int_0^t tf(t)dt}$
5	Condensate Preheater System 2	$C_T = \frac{(965.000 \times 0,531) + (28.407.068 \times (1 - 0,531))}{(39.102 \times 0,531) + \int_0^t tf(t)dt}$
6	Deaerator	$C_T = \frac{(1.215.000 \times 0,528) + (28.657.068 \times (1 - 0,528))}{(8.893 \times 0,528) + \int_0^t tf(t)dt}$
7	LP Boiler Feed Pump A	$C_T = \frac{(984.333 \times 0,385) + (28.426.401 \times (1 - 0,385))}{(8.428 \times 0,385) + \int_0^t tf(t)dt}$
8	LP Boiler Feed Pump B	$C_T = \frac{(1.234.134 \times 0,491) + (28.676.202 \times (1 - 0,491))}{(7.154 \times 0,491) + \int_0^t tf(t)dt}$
9	LP Boiler Feed Pump C	$C_T = \frac{(1.355.074 \times 0,485) + (28.797.142 \times (1 - 0,485))}{(9.538 \times 0,485) + \int_0^t tf(t)dt}$
10	LP Boiler Feed Pump D	$C_T = \frac{(1.290.000 \times 0,353) + (28.732.068 \times (1 - 0,353))}{(8.146 \times 0,353) + \int_0^t tf(t)dt}$
11	LP Boiler Circulating Pump 3A	$C_T = \frac{(1.338.200 \times 0,388) + (28.780.268 \times (1 - 0,388))}{(16.826 \times 0,388) + \int_0^t tf(t)dt}$
12	Economizer System 1	$C_T = \frac{(3.277.500 \times 0,518) + (30.719.568 \times (1 - 0,518))}{(10.702 \times 0,518) + \int_0^t tf(t)dt}$
13	HP Boiler Feed Pump A	$C_T = \frac{(2.147.142 \times 0,366) + (29.589.210 \times (1 - 0,366))}{(9.764 \times 0,366) + \int_0^t tf(t)dt}$
14	HP Boiler Feed Pump B	$C_T = \frac{(1.665.000 \times 0,397) + (29.107.068 \times (1 - 0,397))}{(10.658 \times 0,397) + \int_0^t tf(t)dt}$
15	HP Boiler Feed Pump C	$C_T = \frac{(2.206.667 \times 0,398) + (29.648.734 \times (1 - 0,398))}{(11.393 \times 0,398) + \int_0^t tf(t)dt}$

Tabel E.1 Laju Biaya Sub-Sub-Sub Unit Sebelum Optimasi (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Laju Biaya Total (C_T), Rp./Jam
16	HP Boiler Feed Pump D	$C_T = \left[\frac{(840.000 \times 0,440) + (28.282.068 \times (1 - 0,440))}{(8.116 \times 0,440) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
17	HP Boiler Circulating Pump 1A	$C_T = \left[\frac{(1.125.000 \times 0,499) + (28.567.068 \times (1 - 0,499))}{(9.457 \times 0,499) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
18	HP Boiler Circulating Pump 3B	$C_T = \left[\frac{(2.322.500 \times 0,532) + (29.764.568 \times (1 - 0,532))}{(10.341 \times 0,532) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
19	HP Evaporator System 3	$C_T = \left[\frac{(1.056.667 \times 0,461) + (28.498.734 \times (1 - 0,461))}{(14.302 \times 0,461) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
20	Superheater System 1	$C_T = \left[\frac{(8.423.333 \times 0,401) + (35.865.401 \times (1 - 0,401))}{(11.096 \times 0,401) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
21	Superheater System 2	$C_T = \left[\frac{(1.552.500 \times 0,486) + (28.994.568 \times (1 - 0,486))}{(12.964 \times 0,486) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
22	Superheater System 3	$C_T = \left[\frac{(3.623.333 \times 0,461) + (31.065.401 \times (1 - 0,461))}{(15.664 \times 0,461) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$

2. Laju Biaya Komponen Penyusun Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap Saat $R_G = 0,7$

Tabel E.2 Laju Biaya Sub-Sub-Sub Unit Saat $R_G = 0,7$

No	Sub-Sub-Sub Unit	Laju Biaya Total (C_T), Rp./Jam
1	Condensor (Tube)	$C_T = \left[\frac{(2.265.000 \times 0,766) + (29.707.068 \times (1 - 0,766))}{(766 \times 0,766) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
2	Condensor (Valve)	-
3	Gland Steam Condensor	$C_T = \left[\frac{(1.156.667 \times 0,900) + (28.598.743 \times (1 - 0,900))}{(6.707 \times 0,900) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
4	Condensate Preheater System 1	$C_T = \left[\frac{(2.623.333 \times 0,994) + (30.065.401 \times (1 - 0,994))}{(6.226 \times 0,994) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
5	Condensate Preheater System 2	-
6	Deaerator	$C_T = \left[\frac{(1.215.000 \times 0,893) + (28.657.068 \times (1 - 0,893))}{(6.634 \times 0,893) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$

Tabel E.2 Laju Biaya Sub-Sub-Sub Unit Saat $R_G = 0,7$ (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Laju Biaya Total (C_T), Rp./Jam
7	LP Boiler Feed Pump A	$C_T = \frac{(984.333 \times 0,737) + (28.426.401 \times (1 - 0,737))}{(3.061 \times 0,737) + \int_0^t tf(t)dt}$
8	LP Boiler Feed Pump B	$C_T = \frac{(1.234.134 \times 0,712) + (28.676.202 \times (1 - 0,712))}{(5.200 \times 0,712) + \int_0^t tf(t)dt}$
9	LP Boiler Feed Pump C	$C_T = \frac{(1.355.074 \times 0,828) + (28.797.142 \times (1 - 0,828))}{(6.720 \times 0,828) + \int_0^t tf(t)dt}$
10	LP Boiler Feed Pump D	$C_T = \frac{(1.290.000 \times 0,718) + (28.732.068 \times (1 - 0,718))}{(3.237 \times 0,718) + \int_0^t tf(t)dt}$
11	LP Boiler Circulating Pump 3A	$C_T = \frac{(1.338.200 \times 0,983) + (28.780.268 \times (1 - 0,983))}{(9.830 \times 0,983) + \int_0^t tf(t)dt}$
12	Economizer System 1	$C_T = \frac{(3.277.500 \times 0,916) + (30.719.568 \times (1 - 0,916))}{(7.392 \times 0,916) + \int_0^t tf(t)dt}$
13	HP Boiler Feed Pump A	$C_T = \frac{(2.147.142 \times 0,740) + (29.589.210 \times (1 - 0,740))}{(2.707 \times 0,740) + \int_0^t tf(t)dt}$
14	HP Boiler Feed Pump B	$C_T = \frac{(1.665.000 \times 0,793) + (29.107.068 \times (1 - 0,793))}{(2.707 \times 0,793) + \int_0^t tf(t)dt}$
15	HP Boiler Feed Pump C	$C_T = \frac{(2.206.667 \times 0,936) + (29.648.734 \times (1 - 0,936))}{(8.339 \times 0,936) + \int_0^t tf(t)dt}$
16	HP Boiler Feed Pump D	$C_T = \frac{(840.000 \times 0,739) + (28.282.068 \times (1 - 0,739))}{(3.551 \times 0,739) + \int_0^t tf(t)dt}$
17	HP Boiler Circulating Pump 1A	$C_T = \frac{(1.125.000 \times 0,820) + (28.567.068 \times (1 - 0,820))}{(6.612 \times 0,820) + \int_0^t tf(t)dt}$
18	HP Boiler Circulating Pump 3B	$C_T = \frac{(2.322.500 \times 0,916) + (29.764.568 \times (1 - 0,916))}{(7.645 \times 0,916) + \int_0^t tf(t)dt}$
19	HP Evaporator System 3	$C_T = \frac{(1.056.667 \times 0,895) + (28.498.734 \times (1 - 0,895))}{(5.681 \times 0,895) + \int_0^t tf(t)dt}$
20	Superheater System 1	$C_T = \frac{(8.423.333 \times 0,785) + (35.865.401 \times (1 - 0,785))}{(3.851 \times 0,785) + \int_0^t tf(t)dt}$
21	Superheater System 2	$C_T = \frac{(1.552.500 \times 0,875) + (28.994.568 \times (1 - 0,875))}{(4.910 \times 0,875) + \int_0^t tf(t)dt}$
22	Superheater System 3	$C_T = \frac{(3.623.333 \times 0,870) + (31.065.401 \times (1 - 0,870))}{(3.238 \times 0,870) + \int_0^t tf(t)dt}$

**3. Laju Biaya Komponen Penyusun Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap
Saat $R_G = 0,8$**

Tabel E.3 Laju Biaya Sub-Sub-Sub Unit Saat $R_G = 0,8$

No	Sub-Sub-Sub Unit	Laju Biaya Total (C_T), Rp./Jam
1	Condensor (Tube)	$C_T = \frac{(2.265.000 \times 0,842) + (29.707.068 \times (1 - 0,842))}{(510 \times 0,842) + \int_0^t tf(t)dt}$
2	Condensor (Valve)	-
3	Gland Steam Condensor	$C_T = \frac{(1.156.667 \times 0,932) + (28.598.743 \times (1 - 0,932))}{(6.402 \times 0,932) + \int_0^t tf(t)dt}$
4	Condensate Preheater System 1	$C_T = \frac{(2.623.333 \times 0,996) + (30.065.401 \times (1 - 0,996))}{(5.665 \times 0,996) + \int_0^t tf(t)dt}$
5	Condensate Preheater System 2	-
6	Deaerator	$C_T = \frac{(1.215.000 \times 0,928) + (28.657.068 \times (1 - 0,928))}{(6.186 \times 0,928) + \int_0^t tf(t)dt}$
7	LP Boiler Feed Pump A	$C_T = \frac{(984.333 \times 0,846) + (28.426.401 \times (1 - 0,846))}{(1.793 \times 0,846) + \int_0^t tf(t)dt}$
8	LP Boiler Feed Pump B	$C_T = \frac{(1.234.134 \times 0,831) + (28.676.202 \times (1 - 0,831))}{(3.920 \times 0,831) + \int_0^t tf(t)dt}$
9	LP Boiler Feed Pump C	$C_T = \frac{(1.355.074 \times 0,899) + (28.797.142 \times (1 - 0,899))}{(5.874 \times 0,899) + \int_0^t tf(t)dt}$
10	LP Boiler Feed Pump D	$C_T = \frac{(1.290.000 \times 0,835) + (28.732.068 \times (1 - 0,835))}{(2.287 \times 0,835) + \int_0^t tf(t)dt}$
11	LP Boiler Circulating Pump 3A	$C_T = \frac{(1.338.200 \times 0,990) + (28.780.268 \times (1 - 0,990))}{(9.126 \times 0,990) + \int_0^t tf(t)dt}$
12	Economizer System 1	$C_T = \frac{(3.277.500 \times 0,951) + (30.719.568 \times (1 - 0,951))}{(6.705 \times 0,951) + \int_0^t tf(t)dt}$
13	HP Boiler Feed Pump A	$C_T = \frac{(2.147.142 \times 0,858) + (29.589.210 \times (1 - 0,858))}{(1.238 \times 0,858) + \int_0^t tf(t)dt}$
14	HP Boiler Feed Pump B	$C_T = \frac{(1.665.000 \times 0,887) + (29.107.068 \times (1 - 0,887))}{(4.652 \times 0,887) + \int_0^t tf(t)dt}$
15	HP Boiler Feed Pump C	$C_T = \frac{(2.206.667 \times 0,965) + (29.648.734 \times (1 - 0,965))}{(8.178 \times 0,965) + \int_0^t tf(t)dt}$

Tabel E.3 Laju Biaya Sub-Sub-Sub Unit Saat $R_G = 0,8$ (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Laju Biaya Total (C_T), Rp./Jam
16	HP Boiler Feed Pump D	$C_T = \left[\frac{(840.000 \times 0,858) + (28.282.068 \times (1 - 0,858))}{(1.668 \times 0,858) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
17	HP Boiler Circulating Pump 1A	$C_T = \left[\frac{(1.125.000 \times 0,902) + (28.567.068 \times (1 - 0,902))}{(5.495 \times 0,902) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
18	HP Boiler Circulating Pump 3B	$C_T = \left[\frac{(2.322.500 \times 0,954) + (29.764.568 \times (1 - 0,954))}{(6.946 \times 0,954) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
19	HP Evaporator System 3	$C_T = \left[\frac{(1.056.667 \times 0,943) + (28.498.734 \times (1 - 0,943))}{(4.204 \times 0,943) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
20	Superheater System 1	$C_T = \left[\frac{(8.423.333 \times 0,883) + (35.865.401 \times (1 - 0,883))}{(2.270 \times 0,883) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
21	Superheater System 2	$C_T = \left[\frac{(1.552.500 \times 0,932) + (28.994.568 \times (1 - 0,932))}{(2.908 \times 0,932) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
22	Superheater System 3	$C_T = \left[\frac{(3.623.333 \times 0,929) + (31.065.401 \times (1 - 0,929))}{(603 \times 0,929) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$

4. Laju Biaya Komponen Penyusun Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap Saat $R_G = 0,9$

Tabel E.4 Laju Biaya Sub-Sub-Sub Unit Saat $R_G = 0,9$

No	Sub-Sub-Sub Unit	Laju Biaya Total (C_T), Rp./Jam
1	Condensor (Tube)	$C_T = \left[\frac{(2.265.000 \times 0,919) + (29.707.068 \times (1 - 0,919))}{(273 \times 0,919) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
2	Condensor (Valve)	-
3	Gland Steam Condensor	$C_T = \left[\frac{(1.156.667 \times 0,965) + (28.598.743 \times (1 - 0,965))}{(6.070 \times 0,965) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
4	Condensate Preheater System 1	$C_T = \left[\frac{(2.623.333 \times 0,998) + (30.065.401 \times (1 - 0,998))}{(4.821 \times 0,998) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$
5	Condensate Preheater System 2	-
6	Deaerator	$C_T = \left[\frac{(1.215.000 \times 0,963) + (28.657.068 \times (1 - 0,963))}{(5.502 \times 0,963) + \int_0^t tf(t)dt} \right]$

Tabel E.4 Laju Biaya Sub-Sub-Sub Unit Saat $R_G = 0,9$ (lanjutan)

No	Sub-Sub-Sub Unit	Laju Biaya Total (C_T), Rp./Jam
7	LP Boiler Feed Pump A	$C_T = \frac{(984.333 \times 0,934) + (28.426.401 \times (1 - 0,934))}{(808 \times 0,934) + \int_0^t tf(t)dt}$
8	LP Boiler Feed Pump B	$C_T = \frac{(1.234.134 \times 0,928) + (28.676.202 \times (1 - 0,928))}{(2.444 \times 0,928) + \int_0^t tf(t)dt}$
9	LP Boiler Feed Pump C	$C_T = \frac{(1.355.074 \times 0,957) + (28.797.142 \times (1 - 0,957))}{(4.855 \times 0,957) + \int_0^t tf(t)dt}$
10	LP Boiler Feed Pump D	$C_T = \frac{(1.290.000 \times 0,929) + (28.732.068 \times (1 - 0,929))}{(1.658 \times 0,929) + \int_0^t tf(t)dt}$
11	LP Boiler Circulating Pump 3A	$C_T = \frac{(1.338.200 \times 0,996) + (28.780.268 \times (1 - 0,996))}{(8.606 \times 0,996) + \int_0^t tf(t)dt}$
12	Economizer System 1	$C_T = \frac{(3.277.500 \times 0,979) + (30.719.568 \times (1 - 0,979))}{(5.780 \times 0,979) + \int_0^t tf(t)dt}$
13	HP Boiler Feed Pump A	$C_T = \frac{(2.147.142 \times 0,945) + (29.589.210 \times (1 - 0,945))}{(292 \times 0,945) + \int_0^t tf(t)dt}$
14	HP Boiler Feed Pump B	$C_T = \frac{(1.665.000 \times 0,956) + (29.107.068 \times (1 - 0,956))}{(3.890 \times 0,956) + \int_0^t tf(t)dt}$
15	HP Boiler Feed Pump C	$C_T = \frac{(2.206.667 \times 0,986) + (29.648.734 \times (1 - 0,986))}{(8.045 \times 0,986) + \int_0^t tf(t)dt}$
16	HP Boiler Feed Pump D	-
17	HP Boiler Circulating Pump 1A	$C_T = \frac{(1.125.000 \times 0,962) + (28.567.068 \times (1 - 0,962))}{(4.178 \times 0,962) + \int_0^t tf(t)dt}$
18	HP Boiler Circulating Pump 3B	$C_T = \frac{(2.322.500 \times 0,982) + (29.764.568 \times (1 - 0,982))}{(5.999 \times 0,982) + \int_0^t tf(t)dt}$
19	HP Evaporator System 3	$C_T = \frac{(1.056.667 \times 0,978) + (28.498.734 \times (1 - 0,978))}{(2.657 \times 0,978) + \int_0^t tf(t)dt}$
20	Superheater System 1	$C_T = \frac{(8.423.333 \times 0,954) + (35.865.401 \times (1 - 0,954))}{(1.037 \times 0,954) + \int_0^t tf(t)dt}$
21	Superheater System 2	$C_T = \frac{(1.552.500 \times 0,973) + (28.994.568 \times (1 - 0,973))}{(612 \times 0,973) + \int_0^t tf(t)dt}$
22	Superheater System 3	-

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Serang pada tanggal 15 Mei 1990. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Wukir Retawu, SLTPN 1 Cilegon, SMA Islam Nurul Fikri Boarding School dan S1 Teknik Mesin ITS. Beberapa tahun setelah lulus S1, penulis melanjutkan jenjang pendidikannya di S2 Manajemen Teknologi pada bidang keahlian Manajemen Industri pada tahun 2016.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)