



TUGAS AKHIR - TM184835

**PERANCANGAN STRATEGI PERAWATAN  
*BOILER TUBING* DENGAN METODE  
*RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE***

Norman Seno Prabowo  
02111440000169

Dosen Pembimbing:  
Suwarno, ST, MSc, PH.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020





**TUGAS AKHIR - TM184835**

**PERANCANGAN STRATEGI PERAWATAN  
*BOILER TUBING* DENGAN METODE  
*RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE***

Norman Seno Prabowo  
02111440000169

Dosen Pembimbing:  
Suwarno, ST, MSc, PH.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA - 2020

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

**FINAL PROJECT - TM184835**

**MAINTENANCE PLANNING OF BOILER  
TUBING USING RELIABILITY CENTERED  
MAINTENANCE METHOD**

Norman Seno Prabowo  
02111440000169

*Supervisor:*  
Suwarno, ST, MSc, PH.D.

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial and System Engineering  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA - 2020**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

**PERANCANGAN STRATEGI PERAWATAN BOILER  
TUBING DENGAN METODE RELIABILITY  
CENTERED MAINTENANCE (RCM)**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Norman Seno Prabowo**

NRP. 02111440000169

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Suwarno, ST., MSc., PhD (Pembimbing)  
NIP. 198005202005011003
2. Dinny Harnany, ST., MSc (Penguji 1)  
NIP. 198905132019032013
3. Ari Kurniawan Saputra, ST., MT (Penguji 2)  
NIP. 198604012015041001
4. Latifah Nurahmi, ST., MSc., PhD (Penguji 3)  
NIP. 1986201712037

**SURABAYA  
JANUARI, 2020**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*



# **PERANCANGAN STRATEGI PERAWATAN *BOILER TUBING* DENGAN METODE *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE***

**Nama Mahasiswa** : Norman Seno Prabowo  
**NRP** : 02111440000169  
**Departemen** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Suwarno, ST, MSc, Ph.D.

## **ABSTRAK**

*PLTU X merupakan pembangkit listrik bertenaga uap yang terletak di provinsi Lampung Selatan. Pada PLTU ini menggunakan boiler dengan tipe circulating fluidized bed. Teknologi Circulating Fluidized Bed adalah memanfaatkan udara bertekanan tinggi untuk menciptakan kondisi fluidisasi terhadap bed material yang terdiri dari pasir, abu bahan bakar, dan sorbent (limestone). Berdasarkan data downtime pada PLTU pada periode 2018-2019, ditemukan bahwa boiler tubing memiliki waktu downtime paling tinggi dibandingkan dengan komponen lainnya. Untuk meningkatkan produktifitas pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap penelitian ini bertujuan untuk mengurangi waktu downtime pada boiler tube, dimana kegagalan akan memiliki beberapa kemungkinan mekanisme kegagalan yang akan dicari pada penelitian ini.*

*Untuk menyelesaikan permasalahan, penelitian ini dimulai dari melakukan identifikasi masalah, perumusan masalah, dan dilanjutkan dengan studi literatur. Kemudian penelitian memasuki tahap pengumpulan data dan pengolahan data untuk melakukan analisa akan kegagalan yang terjadi pada komponen terkait. Proses analisis dengan Reliability Centered Maintenance dimulai dari menganalisa fungsi sistem yang diteliti, kemudian*

*mempelajari sistem pemeliharaan yang digunakan. Selanjutnya dicari penyebab shutdown oleh boiler tubing yang akan digunakan untuk mencari akar permasalahan. Setelah ditemukan akar-akar permasalahan tahap selanjutnya adalah dibuat rekomendasi maintenance task dengan berdasarkan NASA Logic Tree Analysis.*

*Setelah dilakukan penelitian tentang sistem boiler tubing pada Circulating Fluidized Bed, dan dilaksanakan pendekatan dengan metode Reliability Centered Maintenance, analisis dilakukan pada sistem Economizer, Waterwall, Air Preheater, dan Superheater. Hasil identifikasi pada sistem tersebut adalah pada Waterwall dan Air Preheater kegagalan diakibatkan oleh korosi, dan pada Superheater kegagalan diakibatkan oleh kerusakan refractory. Analisis dengan Logic Tree Analysis ditemukan pada komponen tersebut dapat dilakukan Predictive Testing & Inspection*

**Kata Kunci** : *Boiler Tube, RCM, RCFA, Logic Tree Analysis, Economizer, Superheater, Waterwall,*

# **MAINTENANCE PLANNING OF BOILER TUBING USING RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE METHOD**

**Name** : Norman Seno Prabowo  
**NRP** : 02111440000169  
**Department** : *Mechanical Engineering/ FTIRS-ITS*  
**Academic Supervisor** : Suwarno, ST, MSc, Ph.D.

## **ABSTRACT**

*PLTU X is a steam powered power plant located in Southern Lampung. This steam power plant utilized a Circulating Fluidized Bed Boiler that uses high pressure air to create fluidizing condition for the bed material. Based on the data collected from 2018 until 2019, it is known that boiler tube failure causes the most downtime compared to other components. To increase productivity in the steam powered plant this research aims to decrease the downtime.*

*To solve the problem, the research starts by identifying the problem and formulating the problem to solve. Then the research goes into data collection and data processing to analyze the failure that occurs on each component. The analysis process of Reliability Centered Maintenance starts with analyzing the function of the system and studying the maintenance system that runs in the system. Afterwards, the cause of shutdown is searched to find the root cause. By finding the rootcause research continued to plan a maintenance task using the approach of Nasa Logic Tree Analysis*

*The analysis is carried out on the economizer, waterwall, air preheater, and superheater systems. Result shows that the air preheater and waterwall failure are caused by corrosion, and in the superheater system failures are caused by refractory damage. Analysis with Logic Tree Analysis found that all of the failures can be prevented using Predictive Testing & Inspection maintenance method.*

**Keyword** : Boiler Tube, RCM, RCFA, Logic Tree Analysis, Economizer, Superheater, Waterwall

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan YME atas anugerahnya sehingga tugas akhir dengan tajuk “Perancangan Strategi Perawatan *Boiler Tubing* dengan Metode *Reliability Centered Maintenance*” mencapai titik akhir pengerjaan untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan tugas akhir ini tentunya tidak mungkin selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak. Maka dari itu pada segmen ini penulis ingin melimpahkan rasa terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis Boris Budiarto dan Endang Prabasari yang sudah membesarkan penulis dengan kesabaran luar biasa dan dukungan dari segala lini sehingga penulis mampu untuk mencapai akhir dari perjuangan menulis tugas akhir ini.
2. Bapak Suwarno, ST, MSc, Ph.D. Selaku pembimbing tugas akhir, atas arahan, saran, kesabaran, dan waktu yang telah di berikan kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T, Ibu Dinny Harnany, ST, MSc., Ibu Latifah Nurahmi, ST, MSc, Ph. Selaku dosen penguji untuk membantu penulis menyempurnakan tugas akhir dengan kritik, saran, ilmu, dan segala pembelajaran yang diberikan dalam proses menyelesaikan tugas akhir.
4. Benedictus Bagaskoro dan Yohannes Aditya sebagai rekan terdekat penulis selama perkuliahan dan kehidupan normal yang sudah bertahan dengan gelagat penulis dari awal perkuliahan hingga detik ini.

5. Hafiz Yogasetyawan bersama dengan rekan-rekan pada poin 4 untuk kebaikannya memberi saran pada penulis dalam kehidupan dan tentunya perkuliahan.
6. Rekan kerja Mauts 14 ( Ega, Fido, Novandita, Tam, Nira, Clarissa, Riri) untuk kerja sama (dan segala kemalasannya) yang bertahan dengan kelakuan penulis menjalankan kepengurusan dengan susah payah.
7. Seluruh anggota Mesin ITS Autosport untuk pengalaman yang cukup mengesankan dan tidak perlu diulang lagi.
8. *Chorterra* (Yudha, Tatar, Pipo, Aldi M, dkk) yang memberikan hiburan dan pengalaman diluar kehidupan kampus.
9. Zharfan Fathur, Thoriq Aziz, Ildan, dan Gregorius Romario, sebagai kawan penulis yang menemani dalam masa penulisan tugas akhir dan seterusnya.
10. Seluruh makhluk hidup lain yang membantu penulis dalam proses sebelum, saat, dan setelah penyusunan tugas akhir yang tidak mampu penulis ingat satu per satu.
11. Alam Semesta, karena dunia belum berhenti berputar melingkar searah, sehingga tugas akhir ini mampu diselesaikan

Dengan ini penulis ingin mengucapkan maaf apabila terdapat hal-hal yang kurang berkenaan dalam hasil dan juga proses penulisan tugas akhir ini, karena sesuai pepatah Filipina “*Walang Taong Perpekto*” Tiada Manusia Yang Sempurna

Surabaya, 29 Januari 2020

Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PENGESAHAN ... Error! Bookmark not defined.</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xx
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xxiii
<b>BAB I</b> .....	25
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	25
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	27
<b>1.3 Tujuan Masalah</b> .....	27
<b>1.4 Batasan Masalah</b> .....	28
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	28
<b>BAB II</b> .....	29
<b>DASAR TEORI</b> .....	29
<b>2.1 Tinjauan Pustaka</b> .....	29
<b>2.2 Perawatan</b> .....	29
<b>2.2.1 Definisi Perawatan</b> .....	29
<b>2.2.2 Tujuan Perawatan</b> .....	30
<b>2.2.3 Jenis-jenis perawatan</b> .....	31
<b>2.3 Reliability Centered Maintenance (RCM)</b> .....	33
<b>2.3.1 Definisi RCM</b> .....	33

2.3.2	Langkah-Langkah RCM .....	34
2.3.3	Analisa Penyebab dan Efek kegagalan.....	40
2.3.4	Analisis <i>Maintenance Task</i> .....	41
2.5	<i>Circulating Fluidized Bed</i> .....	44
2.5.1	Prinsip Kerja.....	44
2.5.2	<i>Water Tube Boiler</i> .....	46
2.5.3	Sirkulasi Udara dan Gas Buang pada CFB Boiler .	46
2.5.4	Air Preheater .....	48
2.5.6	<i>Economizer</i> .....	51
2.5.7	<i>Waterwall</i> .....	51
2.5.8	<i>Operation &amp; Maintenance Issues CFB</i> .....	52
2.5.8.1	<i>Start Up</i> .....	53
2.5.8.2	<i>Safety</i> .....	53
2.5.8.3	<i>Bed material related</i> .....	55
2.5.8.4	<i>Loopseal malfunction</i> .....	57
2.5.8.5	<i>Refractory failure</i> .....	57
2.5.8.6	Kegagalan Pada <i>Tube</i> .....	58
2.5.8.8	Kegagalan pada <i>expansion joint</i> .....	62
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>		<b>65</b>
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	65
3.2	Diagram Alir Pengolahan Data.....	67
3.3	Metodologi Penelitian.....	68
3.3.1	Identifikasi Masalah.....	68



3.3.2	Perumusan Masalah.....	68
3.3.3	Studi Literatur.....	69
3.3.4	Pengumpulan Data.....	69
3.3.5	Pengolahan Data.....	69
3.3.5	Perancangan Kegiatan Perawatan.....	69
3.3.6	Rekomendasi Kegiatan .....	70
<b>BAB IV</b>	.....	71
4.1	Analisis Sistem <i>Boiler</i> .....	72
4.2	Analisis data pada <i>Boiler Tubing</i> .....	73
4.2.1	<i>Superheater</i> .....	76
4.2.2	<i>Economizer</i> .....	79
4.2.3	<i>Waterwall</i> .....	81
4.3	Sistem Pemeliharaan.....	81
4.3.1	Manajemen Perawatan pada PLTU X .....	81
4.3.2	Kegiatan Pemeliharaan pada PLTU X.....	82
4.4	Analisa <i>Unplanned Shutdown</i> .....	85
4.4.1	<i>Air Preheater</i> .....	86
4.4.2	<i>Waterwall</i> .....	88
4.4.3	<i>Superheater</i> .....	93
4.4	Analisis Penyebab dan Efek Kegagalan dengan <i>Root Cause Failure Analysis</i> .....	97
4.5	<i>Maintenance Task</i> dengan <i>Logic Tree Analysis</i> .....	98
4.5	Pengambilan Keputusan <i>Maintenance Task</i> .....	101
<b>BAB V</b>	.....	104

<b>5.1 Kesimpulan .....</b>	<b>104</b>
<b>5.2 Saran.....</b>	<b>105</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>106</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>109</b>
<b>LAMPIRAN A LAJU ABRASI TUBE.....</b>	<b>109</b>
<b>LAMPIRAN B KONDISI <i>REFRACTORY</i></b>	
<b>KESELURUHAN.....</b>	<b>109</b>

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Diagram pareto <i>downtime</i> Unit 2.....	26
<b>Gambar 2.1</b> Diagram jenis perawatan.....	31
<b>Gambar 2.2</b> Alur metode Reliability Centered Maintenance (NASA, 2008) .....	35
<b>Gambar 2.3</b> Alur NASA Logic Tree Analysis (NASA, 2008) ..	41
<b>Gambar 2.4</b> Skema <i>Circulating Fluidized Bed Boiler</i> .....	45
<b>Gambar 2.5</b> Skema water tube boiler ( <b>Mech4Study, 2016</b> ).....	46
<b>Gambar 2.6</b> Diagram flue gas, air, and material system ( <b>Dokumen pribadi</b> ) .....	47
<b>Gambar 2.7</b> Susunan air preheater ( <b>Dokumen pribadi</b> ) .....	48
<b>Gambar 2.8</b> Contoh susunan superheater tube.....	49
<b>Gambar 2.9</b> Contoh economizer tube .....	51
<b>Gambar 2.10</b> Contoh <i>waterwall tube</i> .....	52
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir metode penelitian.....	66
<b>Gambar 3.2</b> Diagram alir pengolahan data .....	68
<b>Gambar 4.1</b> Outline analisis dan pembahasan .....	71
<b>Gambar 4.2</b> Subsistem utama pada sistem CFB Boiler PLTU ..	72
<b>Gambar 4.4</b> <i>Functional Block Diagram</i> sistem Boiler PLTU ...	73
<b>Gambar 4.5</b> Diagram pareto kebocoran tube PLTU .....	74
<b>Gambar 4.6</b> Titik kebocoran tube pada Unit 1.....	75
<b>Gambar 4.7</b> Titik kebocoran tube pada Unit 2.....	75
<b>Gambar 4.8</b> Susunan superheater PLTU.....	76
<b>Gambar 4.9</b> Susunan panel superheater .....	78
<b>Gambar 4.10</b> Susunan economizer PLTU .....	80
<b>Gambar 4.11</b> Hasil komisioning Air Preheater saat tidak terjadi kebocoran tube .....	86
<b>Gambar 4.12</b> Hasil komisioning Air Preheater saat terjadi kebocoran tube .....	87

<b>Gambar 4.13</b> Data sampling kadar pH, PO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub> , Fe(O) (BPPU,2019).....	89
<b>Gambar 4. 14</b> Pengamatan pH boiler Januari 2018 (BPPU, 2019) .....	90
<b>Gambar 4.15</b> Permukaan waterwall (BPPU, 2019).....	91
<b>Gambar 4.16</b> Pengujian SEM ketebalan oxide sisi fireside (BPPU, 2019).....	92
<b>Gambar 4.17</b> Pengujian SEM ketebalan oxide sisi waterside (BPPU, 2019).....	92
<b>Gambar 4.18</b> Lokasi kerusakan refractory pada boiler .....	94
<b>Gambar 4.19</b> Kerusakan refractory pada panel superheater 6 ...	94
<b>Gambar 4.20</b> Kerusakan refractory pada panel superheater 5 ...	95
<b>Gambar 4.21</b> Alur konsekuensi kegagalan .....	99

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Spesifikasi <i>air preheater</i> ( <b>Dokumen Pribadi</b> ) .....	49
<b>Tabel 2.2</b> Spesifikasi <i>superheater</i> pada PLTU ( <b>Dokumen pribadi</b> ) .....	50
<b>Tabel 2.3</b> Presentase lokasi kegagalan <i>tube</i> .....	58
<b>Tabel 2.4</b> Presentase penyebab kegagalan <i>tube</i> .....	59
<b>Tabel 4.1</b> Data desain low temperature superheater ( <b>Dokumen pribadi</b> ) .....	77
<b>Tabel 4.2</b> Data desain panel <i>superheater</i> ( <b>Dokumen pribadi</b> ) ..	78
<b>Tabel 4.3</b> Data desain HT <i>superheater</i> ( <b>Dokumen pribadi</b> ) .....	79
<b>Tabel 4.4</b> Data desain <i>economizer</i> ( <b>Dokumen pribadi</b> ) .....	80
<b>Tabel 4.5</b> Data desain <i>waterwall</i> ( <b>Dokumen pribadi</b> ) .....	81
<b>Tabel 4.6</b> Kegiatan perawatan <i>preventive</i> harian .....	83
<b>Tabel 4.7</b> Kegiatan perawatan <i>preventive</i> bulanan .....	84
<b>Tabel 4.8</b> Kegiatan perawatan <i>preventive</i> tahunan .....	84
<b>Tabel 4.9</b> Komposisi deposit <i>waterwall</i> ( <b>BPPU,2019</b> ) .....	91
<b>Tabel 4.10</b> Konten abu dari hasil uji bulan Januari 2018 ( <b>CoA, 2018</b> ) .....	96
<b>Tabel 4 11</b> <i>Root Cause Failure Analysis</i> boiler tube .....	97
<b>Tabel 4 12</b> <i>Maintenance Task</i> .....	101

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*



# BAB I

## PENDAHULUAN

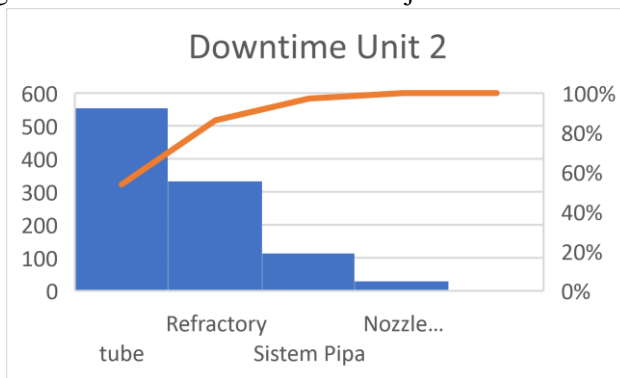
### 1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya teknologi di dunia bertambah juga kebutuhan listrik di dunia, termasuk di Indonesia. Untuk mendapatkan pasokan listrik yang dibutuhkan, berbagai perusahaan penyedia listrik membangun bermacam jenis pembangkit listrik, antara lain pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTB), dan masih banyak lagi. Salah satu jenis pembangkit listrik yang umum digunakan di Indonesia adalah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang mana proses konversi energi pada PLTU dibagi menjadi 3 tahap. Pertama, energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi energi panas dalam bentuk uap bertekanan dan temperatur tinggi di dalam boiler. Kedua, energi panas dalam bentuk uap diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran oleh turbin. Ketiga, energi mekanik diubah menjadi energi listrik oleh generator.

Pada *boiler* PLTU X yang terletak di provinsi Lampung Selatan memanfaatkan teknologi *CFB* atau *Circulating Fluidized Bed* pada proses pembakarannya. Dimana *Circulating* berarti terjadi sirkulasi batubara yang belum habis terbakar dari *furnace* menuju ke *cyclone*, *Fluidized* merupakan penggunaan *primary air* untuk menjaga agar material *bed* (terdiri dari pasir, abu bahan bakar, dan *limestone*) dan batu bara sebagai bahan bakar tetap melayang di *furnace*, dan *bed* berarti material yang digunakan sebagai media untuk transfer panas ke bahan bakar. Proses yang dilalui pada teknologi *Circulating Fluidized Boiler* mengakibatkan berkurangnya

emisi gas buang akibat proses pembakaran yang menggunakan temperatur rendah karena digunakannya batu bara dengan nilai kalori rendah.

Penggunaan *boiler* tipe CFB juga tidak luput dari gangguan yang dapat dialami oleh komponen-komponennya. Untuk kegagalan yang terjadi pada *boiler* PLTU X Unit 1 pada periode 2018-2019 disumbangkan oleh kegagalan pada *tube* dengan total *downtime* sebesar 396.41 jam.



**Gambar 1.1** Diagram pareto *Downtime* Unit 2

Sedangkan untuk *boiler* PLTU X Unit 2 dapat dilihat dari diagram pareto pada gambar 1.1 bahwa *tube* boiler memiliki waktu *downtime* yang paling besar dengan waktu 553.43 jam diikuti oleh *refractory* sebesar 332.13 jam, sistem perpipaan sebesar 113.66 jam, dan terakhir *nozzle furnace* sebesar 29 jam.

Setelah ditemukan komponen *tube* boiler merupakan komponen yang memiliki *downtime* paling tinggi, penelitian akan dilakukan pada komponen tersebut Kerusakan pada *tube* merupakan kerusakan yang dapat mengurangi keandalan dan mengganggu keseluruhan dari proses produksi pada PLTU X Unit 2 dan Unit 1, karena *tube* memiliki peran yang sangat

penting yaitu untuk mengalirkan fluida kerja pada sistem *boiler*.

Untuk mencoba menyelesaikan permasalahan pada *tube* akan digunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM). RCM merupakan metode perawatan yang sistematis dengan cara mengoptimalkan tiga jenis perawatan untuk meningkatkan probabilitas sebuah komponen tetap berfungsi dengan semestinya. Dari data yang didapat akan dilakukan analisa untuk moda kegagalan yang menyebabkan terjadinya kegagalan pada *tube* dan akan ditentukan metode perawatan yang tepat untuk moda kegagalan yang ditemukan.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Dengan berdasarkan latar belakang yang sudah disusun, dapat ditentukan rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaplikasian metode RCM pada *boiler tubing* PLTU?
2. Bagaimana kegagalan komponen pada *boiler tubing* PLTU?
3. Bagaimana metode perawatan yang tepat untuk meminimalisir kegagalan pada *boiler tubing* PLTU ?

## **1.3 Tujuan Masalah**

1. Mengaplikasikan metode RCM pada *boiler tubing* PLTU
2. Mengelompokkan kegagalan komponen pada *boiler tubing* PLTU
3. Membuat *maintenance task* untuk tiap komponen *boiler tubing* PLTU

#### **1.4 Batasan Masalah**

1. Penelitian dilakukan pada sistem *boiler* PLTU
2. Komponen yang diteliti adalah *boiler tubing* pada PLTU
3. *Boiler tubing* diteliti bagian *fireside*
4. Penelitian tidak mempertimbangkan sisi ekonomi dari perawatan

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

1. Dapat mengelompokkan faktor-faktor kegagalan untuk *boiler tubing*
2. Memberikan gambaran akan mengenai metode perawatan *boiler tubing* melalui pengaplikasian RCM
3. Memberikan strategi perawatan untuk *boiler tubing* untuk meminimalisir kegagalan.

## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Proses penentuan metode perawatan yang tepat pada suatu komponen merupakan proses yang sangat penting, karena metode yang tepat dapat mempertahankan fungsi suatu komponen sesuai dengan kemampuan komponen tersebut. Dalam sistem *boiler* perawatan merupakan proses yang sangat penting, apabila terjadi kegagalan dalam komponen *boiler* dapat menyebabkan seluruh sistem pembangkit listrik untuk *shutdown* yang tentunya sangat merugikan.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Anand Arjundwakar, dapat ditemukan beberapa masalah operasional atau proses *maintenance* yang kerap terjadi pada sistem *Circulating Fluidized Boiler*. Dalam penelitian tersebut dijelaskan masalah operasional seperti pada proses *start-up*, kondisi operasional seperti *bed temperature*, atau *bed material* yang digunakan, dan juga masalah yang kerap ditemukan pada komponen *circulating fluidized boiler*.

Untuk penelitian yang dilakukan oleh Al-afnaan bin Mashal menggunakan metode *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA) untuk menentukan kekritisan dari *boiler tubing* pada sistem *Heat Recovery Steam Generator*. Dalam penentuan kekritisan, Al-afnaan bin Mashal menggunakan *Risk Priority Number* (RPN) yang merupakan metode numerik untuk menentukan komponen kritis dari nilai RPN moda kegagalan yang ditemukan.

#### 2.2 Perawatan

##### 2.2.1 Definisi Perawatan

Kegiatan perawatan mempunyai peranan yang sangat penting dalam mendukung beroperasinya suatu sistem secara

lancar sesuai yang dikehendaki. Selain itu, kegiatan perawatan juga dapat meminimalkan biaya atau kerugian–kerugian yang ditimbulkan akibat adanya kerusakan mesin Suatu komponen atau sistem yang bekerja terus menerus akan mengalami penurunan kinerja dan keandalan. Perawatan ini bertujuan untuk menjaga atau memperbaiki agar komponen tersebut dapat berfungsi seperti spesifikasi yang diinginkan dalam waktu dan kondisi tertentu. Kegiatan perawatan dan pemeliharaan merupakan hal yang penting dalam sebuah proses produksi. Perawatan yang diterapkan kepada setiap komponen dapat berbedabeda sesuai dengan karakteristik komponen yang tersedia. Jika suatu komponen diberikan perawatan yang tidak sesuai dengan karakteristiknya maka salah satu penyebabnya akan mengakibatkan mesin mengalami downtime, proses produksi terhenti sehingga perusahaan mengalami kerugian. Penelitian- penelitian mengenai penentuan jenis perawatan komponen umumnya dilakukan untuk memperoleh nilai seminimum mungkin terkait dengan perawatan (Moubray, 1997).

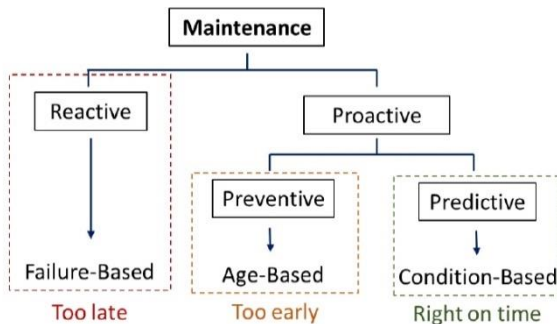
### **2.2.2 Tujuan Perawatan**

Perawatan memiliki tujuan sebagai berikut (NASA, 2008):

1. Memperpanjang umur pakai fasilitas atau peralatan
2. Menjamin kesiapan operasional seluruh fasilitas yang diperlukan dalam kegiatan darurat.  
Contoh : unit *backup*, unit pemadam kebakaran, dan unit keselamatan dan kesehatan kerja.
3. Menjamin ketersediaan serta keandalan optimum peralatan secara teknis dan ekonomis.

### 2.2.3 Jenis-jenis perawatan

Terdapat tiga jenis perawatan yaitu *reactive*, *preventive*, dan *predictive* seperti di ilustrasikan pada gambar 2.1 dibawah ini :



**Gambar 2.1** Diagram jenis perawatan

#### 1. *Reactive Maintenance*

*Reactive Maintenance* merupakan jenis maintenance yang bisa disebut juga sebagai *Breakdown Maintenance*, *fix-when-fail*, *run to failure*, atau *repair maintenance*. Saat menggunakan perawatan jenis ini, perawatan hanya dilakukan pada kondisi ketika terjadi kerusakan pada mesin yang menyebabkan mesin tersebut tidak dapat bekerja sebagaimana mestinya. Dengan jenis perawatan ini, diasumsikan bahwa kemungkinan terjadinya kerusakan pada setiap komponen, sistem, ataupun bagian di dalam mesin memiliki peluang kemungkinan yang sama. Saat hanya jenis perawatan ini digunakan, maka akan terjadi *unplanned maintenance* dengan jumlah yang sangat tinggi dan tingginya penggantian jumlah suku cadang pada komponen. *Reactive Maintenance* hanya bisa benarbenar digunakan jika itu merupakan bagian dari

keputusan yang sudah dianalisis menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance*, yang mengkomparasikan risiko dan biaya yang akan dikeluarkan untuk penggantian jika rusak dan dibandingkan dengan ongkos perawatan yang dibutuhkan untuk mengatasi risiko dan biaya kegagalan

## 2. *Predictive Maintenance*

Pemeliharaan prediktif sering dirujuk sebagai pemeliharaan berdasarkan kondisi. Artinya, aktifitas pemeliharaan baru dilakukan pada suatu kondisi mesin tertentu. Dalam pemeliharaan prediktif, digunakan berbagai peralatan untuk mendiagnosa mesin untuk mengukur kondisi fisik dari mesin, seperti getaran, suhu, kebisingan, pelumasan, dan korosi. Ketika salah satu parameter ini mencapai kondisi tertentu, aktifitas pemeliharaan dilakukan dengan mengembalikan ke kondisi semula. Pemeliharaan prediktif mempunyai premis yang sama dengan pemeliharaan preventif, namun dengan kriteria yang berbeda untuk melakukan aktifitas pemeliharaan. Sama seperti pemeliharaan preventif, pemeliharaan prediktif mampu mengurangi kemungkinan terjadinya breakdown.

## 3. *Preventive Maintenance*

Pemeliharaan preventif pada prinsipnya adalah pemeliharaan berdasarkan pemakaian. Aktifitas pemeliharaan dilakukan setelah penggunaan mesin/peralatan selama periode tertentu. Tipe pemeliharaan ini mempunyai asumsi bahwa mesin akan mengalami kerusakan/breakdown pada satu periode tertentu. Kelebihan pemeliharaan ini adalah dapat mengurangi kemungkinan breakdown serta dapat memperpanjang umur mesin atau peralatan. Kelemahannya adalah aktifitas pemeliharaan dapat menginterupsi jalannya sistem produksi



## 2.3 *Reliability Centered Maintenance (RCM)*

### 2.3.1 **Definisi RCM**

*Reliability Centered Maintenance (RCM)* merupakan campuran optimal dari metode perawatan *reactive, interval based, condition based,* dan *proactive maintenance*. Pada dasarnya RCM merupakan metode sistematis untuk menyusun strategi perawatan demi menjaga fungsi peralatan pada level tertentu dengan biaya yang efektif. Aspek penting dari metode RCM adalah mengelompokkan prioritas sistem berdasarkan tingkat kekritisan dengan cara mempertimbangkan konsekuensi kegagalan sistem tersebut. Dengan cara tersebut biaya perawatan akan dialokasikan pada pekerjaan perawatan dengan tingkat prioritas tinggi.

Penelitian tentang RCM pada umumnya bertujuan menjawab beberapa pertanyaan mengenai asset atau peralatan yang diteliti Andrews JD sebagai berikut :

1. Apakah fungsi dari asset dan standar kinerja yang terkait dengan fungsi itu sesuai dengan konteks operasinya saat ini (*system function*)?
2. Bagaimana sistem tersebut gagal memenuhi fungsinya (*functional failure*)?
3. Apakah modus atau penyebab terjadinya kegagalan fungsi tersebut (*failure modes*)?
4. Apakah yang akan terjadi ketika penyebab modus atau penyebab kegagalan itu muncul (*failure effect*)?
5. Bagaimana kegagalan tersebut berpengaruh (*failure consequences*)?
6. Apakah tindakan yang dapat dilakukan untuk memprediksi atau mencegah setiap kegagalan (*proactive task*)?
7. Bagaimana apabila tidak ditemukan tindakan proaktif yang sesuai (*default action*)?

### 2.3.2 Langkah-Langkah RCM

Langkah-langkah yang harus dilakukan untuk menjalankan metode *Reliability Centered Maintenance* adalah sebagai berikut :

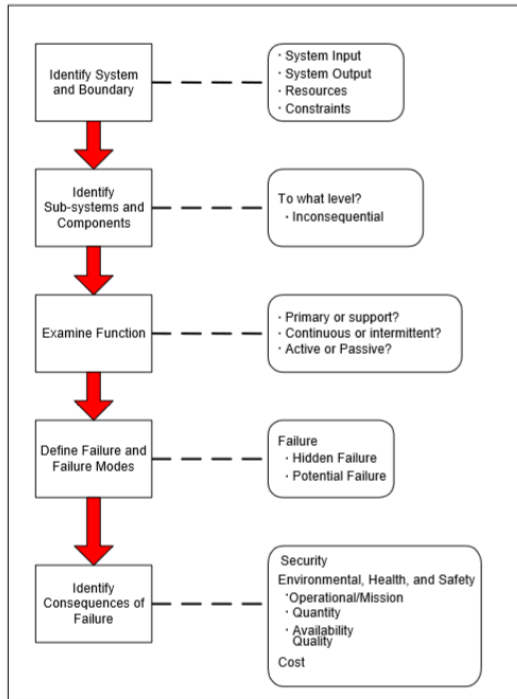
#### 1. Pemilihan sistem dan pengumpulan informasi (*System Selection and Information Collection*)

Kriteria-kriteria yang harus diperhatikan dalam pemilihan sistem adalah sebagai berikut:

- Sistem yang memiliki biaya perawatan yang tinggi
- Sistem yang memberikan kontribusi yang tinggi terhadap *downtime*
- Sistem yang memiliki masalah terhadap keselamatan lingkungan

Dokumen dan informasi yang dibutuhkan dalam analisis RCM adalah:

- *Piping & Instrumentation Diagram*, dibutuhkan untuk mengetahui hubungan fungsi komponen, instrumen, dan sistem
- *Schematic Block Diagram*, dibutuhkan untuk memberikan informasi dan gambaran mengenai sistem, rangkaian, atau program yang ada dengan fungsinya masing-masing
- *Manual Book*, dibutuhkan untuk mengetahui informasi komponen-komponen yang ada pada sistem yang diteliti dan desain operasinya
- *Maintenance History*, dibutuhkan untuk mengetahui sejarah kerusakan dan penggantian komponen yang terjadi pada mesin yang akan diteliti



**Gambar 2.2** Alur metode *Reliability Centered Maintenance* (NASA, 2008)

## 2. Definisi Batas Sistem (*System Boundary Definition*)

Definisi batas sistem adalah suatu batasan yang digunakan karena banyaknya sistem yang ada dalam suatu pabrik. Pendefinisian batas sistem ini dilakukan untuk menjelaskan batasan-batasan suatu sistem yang akan dianalisis dengan menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance*, sehingga semua fungsi dari sistem dapat dimengerti dengan jelas. Jika *system boundary definition* sudah dirumuskan dengan tepat, maka keakuratan proses analisis dari sistem akan terjamin.

### 3. Deskripsi Sistem dan Diagram Blok Fungsional

Deskripsi sistem dan diagram blok fungsional merupakan gambaran yang jelas dari fungsi utama sistem sebuah blok yang berisi fungsi-fungsi dari setiap subsistem yang menyusun sistem tersebut sehingga dibuat tahapan identifikasi detail dari sistem yang meliputi:

- a) Deskripsi Sistem Penjelasan dan uraian sistem yang menjelaskan tentang cara kerja sistem serta penggunaan instrumen yang ada dalam sistem
- b) *Functional Block Diagram* Interaksi antara satu blok diagram fungsi dengan blok diagram fungsi lainnya
- c) *In and Out Interface* (Masukan dan Keluaran Sistem) Penetapan batas-batas sistem dan pengembangan fungsi subsistem memungkinkan untuk melengkapi dan mendokumentasikan fakta dari elemen yang melintasi batas sistem. Elemen-elemen melintasi sistem dapat berupa energi, panas, sinyal, dan sebagainya. Beberapa elemen berperan sebagai masukan (input) dan beberapa elemen berperan sebagai keluaran (output) yang melintasi subsistem
- d) *System Work Breakdown Structure (SWBS)* Penggambaran kelompok bagian-bagian peralatan yang menggambarkan fungsi tertentu.  
Setelah tiga tahap tersebut selesai ditentukan, tahap berikutnya adalah menjawab ketujuh pertanyaan utama yang ada dalam metode RCM. Ketujuh pertanyaan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Apakah fungsi dan performa standar dari suatu aset sesuai dengan konteks operasinya saat ini (system function)?

2. Bagaimana aset tersebut gagal untuk memenuhi fungsinya (*functional failure*)?
3. Apa yang menyebabkan kegagalan fungsi dari suatu aset (*failure modes*)?
4. Apa yang akan terjadi jika kegagalan tersebut muncul (*failure effect*)?
5. Bagaimana kegagalan tersebut berpengaruh (*failure consequences*)?
6. Apa yang dapat dilakukan untuk memprediksi atau mencegah dari setiap kegagalan (*proactive task*)?
7. Apa yang harus dilakukan jika tidak ditemukan tindakan proaktif (*default action*)?
8. Apa yang harus dilakukan jika tidak ditemukan tindakan proaktif (*default action*)?

Berikut adalah penjelasan dari ketujuh pertanyaan tersebut.

1. Fungsi dan Standar Kinerja (*Functions and Performance Standards*)

*System function* didefinisikan sebagai suatu fungsi dari komponen yang diharapkan oleh pengguna tetapi masih berada dalam level kemampuan dari komponen tersebut sejak saat dibuat. Fungsi dibedakan menjadi dua yaitu *primary function* dan *secondary function*. *Primary function* merupakan alasan utama mengapa suatu aset tersebut ada. Kategori ini meliputi kecepatan, hasil produksi, kualitas produk dan pelayanan pelanggan. Sedangkan *secondary function* merupakan kemampuan dari suatu aset untuk dapat melakukan lebih dari sekedar memenuhi fungsi utamanya saja. *Secondary function meliputi safety, control, appearance, protection, economy, dan environmental regulations.*

## 2. Kegagalan Fungsi (*Functional Failure*)

Kegagalan didefinisikan sebagai suatu ketidakmampuan untuk menjalankan fungsi sesuai dengan keinginan pengguna. Sedangkan kegagalan fungsi adalah ketidakmampuan sistem untuk memenuhi suatu fungsi pada suatu standar kinerja tertentu yang dapat diterima oleh pengguna. Terdapat dua kategori kegagalan dalam RCM yaitu kegagalan total dan kegagalan parsial. Kegagalan total merupakan suatu keadaan dimana sistem sama sekali tidak dapat memenuhi standar kinerja suatu fungsi yang dapat diterima oleh penggunanya. Sedangkan kegagalan parsial merupakan keadaan dimana suatu sistem dapat berfungsi namun tidak pada level standar kinerja yang dapat diterima oleh penggunanya atau keadaan dimana suatu sistem tidak dapat mempertahankan tingkat kualitas produk dari sistem tersebut

## 3. Modus Kegagalan (*Failure Mode*)

Modus kegagalan merupakan beberapa peristiwa yang mempunyai kemungkinan besar untuk menyebabkan setiap kegagalan terjadi. Peristiwa yang mempunyai kemungkinan untuk menjadi modus kegagalan atau failure mode adalah:

- a. Peristiwa yang pernah terjadi sebelumnya pada peralatan yang sama atau serupa yang mempunyai konteks operasi sama.
- b. Kegagalan yang sekarang sedang diantisipasi oleh program perawatan yang ada.
- c. Kegagalan yang belum pernah terjadi tetapi diperkirakan dapat menjadi kenyataan di dalam proses operasinya.

- d. Kegagalan yang apabila terjadi akan memberikan dampak yang sangat serius

#### 4. Dampak Kegagalan (*Failure Effect*)

*Failure effect* menjelaskan tentang apa yang akan terjadi jika failure mode terjadi. Penjelasan ini harus memasukkan semua informasi yang dibutuhkan dalam memberikan konsekuensi kegagalan tersebut, seperti:

- a. Apa bukti bahwa kegagalan tersebut pernah terjadi.
- b. Bagaimana cara kegagalan tersebut dapat berpengaruh terhadap keselamatan, lingkungan, produksi, dan operasi.
- c. Apakah kerusakan fisik yang disebabkan oleh kegagalan tersebut.
- d. Bagaimana cara untuk memperbaiki kegagalan tersebut.

#### 5. Konsekuensi Kegagalan (*Failure Consequence*)

RCM memahami benar bahwa satu-satunya alasan untuk melakukan berbagai macam proactive task bukan untuk menghindari kegagalan itu sendiri namun untuk mengurangi konsekuensi dari kegagalan tersebut. *Failure Consequence* merupakan hal yang penting dalam proses RCM itu sendiri. Dalam proses RCM mengklasifikasikan konsekuensi kegagalan kedalam 4 bagian, yaitu:

##### a. *Hidden Failure Consequences*

Kondisi ini terjadi apabila konsekuensi kegagalan yang terjadi tidak dapat diketahui oleh operator dalam kondisi normal

##### b. *Safety Consequences*

Kegagalan mempunyai konsekuensi keamanan apabila kegagalan yang terjadi dapat melukai, membahayakan atau bahkan membunuh seseorang.

c. *Enviromental Consequences*

Kegagalan mempunyai konsekuensi lingkungan apabila kegagalan yang terjadi dapat melanggar standar lingkungan perusahaan, wilayah nasional maupun internasional.

d. *Operational Consequences*

Kegagalan mempunyai konsekuensi operasional apabila kegagalan yang terjadi dapat mempengaruhi kapabilitas operasional seperti hasil produksi, kualitas produksi, kepuasan pelanggan, dan biaya tambahan perbaikan.

### **2.3.3 Analisa Penyebab dan Efek kegagalan**

Metode RCM ini menggunakan *RCM Information Worksheet* yang berisi analisa *function*, *functional failure*, *failure mode*, dan *failure effect*. Komponen-komponen tersebut disusun pada sebuah tabel

- a. Fungsi (*function*) yaitu didefinisikan sebagai kemampuan yang dapat dilakukan suatu subsistem sesuai dengan konteks operasionalnya untuk memenuhi standar kinerja yang diharapkan.
- b. Kegagalan fungsi (*functional failure*) yaitu didefinisikan sebagai ketidakmampuan suatu subsistem untuk menjalankan fungsi sesuai dengan operasionalnya sehingga tidak memenuhi standar kinerja yang diharapkan.
- c. Modus kegagalan (*failure mode*) didefinisikan sebagai hal-hal yang memiliki peluang besar untuk menyebabkan kegagalan fungsi.

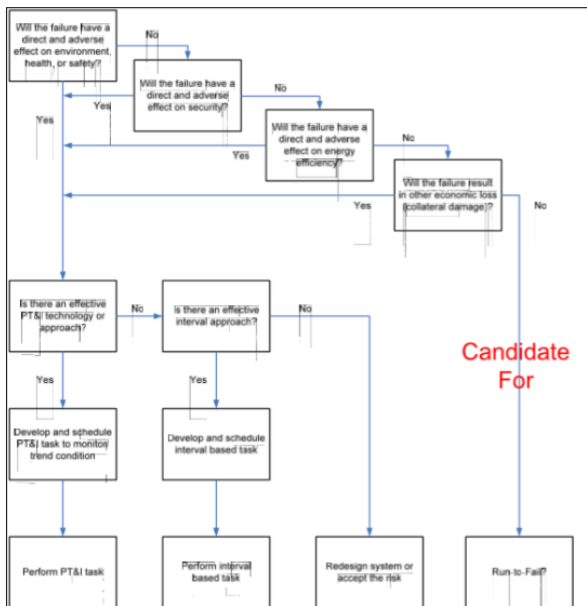


d. Efek kegagalan (*failure effect*) didefinisikan sebagai akibat dari modus kegagalan atau failure mode terhadap subsistem maupun sistem itu sendiri.

e.

### 2.3.4 Analisis Maintenance Task

Untuk menentukan perawatan yang tepat untuk setiap komponen, digunakan *RCM Logic Tree* (NASA, 2008). Setelah menganalisis detail kerusakan dan dimasukkan kedalam tabel *RCM Information Worksheet*, ditentukan perawatan masing-masing failure mode yang tepat menggunakan *RCM Logic Tree Analysis*



**Gambar 2.3** Alur NASA *Logic Tree Analysis* (NASA, 2008)

a. *Predictive Testing and Inspection (PT&I)*

*Predictive Testing and Inspection*, juga dikenal sebagai pemeliharaan prediktif atau pemantauan kondisi, menggunakan teknik pengujian non-intrusif, inspeksi secara visual, dan menggunakan data performa mesin guna mengetahui kondisi dari mesin tersebut. Setelah melakukan analisis data dan pemantauan kondisi peralatan selanjutnya dapat dilakukan perencanaan dan penjadwalan pemeliharaan atau perbaikan sebelum terjadinya kegagalan pada mesin tersebut. Data PT & I yang dikumpulkan digunakan untuk analisis tren, pengenalan pola, perbandingan data, pengujian terhadap batas dan rentang, korelasi dari beberapa teknologi, dan analisis proses statistik untuk menentukan kondisi peralatan dan untuk mengidentifikasi kegagalan.

b. *Preventive Maintenance (PM) or Interval Based Task*

*Preventive Maintenance (PM)* terdiri dari pemeriksaan, penyesuaian, pembersihan, pelumasan, penggantian suku cadang, kalibrasi, dan perbaikan komponen dan peralatan yang dijadwalkan secara rutin. *Preventive Maintenance* menjadwalkan pemeriksaan berkala dan pemeliharaan pada interval yang telah ditentukan (waktu, jam operasi, atau siklus) dalam upaya untuk mengurangi kegagalan peralatan. Hal ini dilakukan tanpa memperhatikan kondisi peralatan yang terdapat dimesin.

c. *Redesign*

Mendesain ulang (*redesign*) suatu mesin atau komponen merupakan suatu pekerjaan yang tidak mudah dikarenakan adanya beberapa faktor. Faktor pertama adalah permasalahan biaya yang dikeluarkan cukup besar. Biaya yang cukup besar

tersebut dapat terjadi dikarenakan biaya dari mendesain ulang, biaya karena membuat komponen baru, biaya karena menyetel ulang kembali sistem dari mesin.

Mendesain ulang (*redesign*) dapat dilakukan dalam beberapa konsekuensi.

1. Konsekuensi terhadap keselamatan dan lingkungan
  - Untuk mengurangi tingkat kemungkinan penyebab kegagalan yang terjadi
  - Untuk mengganti komponen yang jika mengalami kegagalan tidak dapat berlangsung lama agar tidak berkonsekuensi terhadap keselamatan dan lingkungan yang lebih berat
2. Konsekuensi kegagalan tersembunyi
  - Membuat kejadian tersembunyi dengan menambah komponen baru agar dapat dideteksi oleh operator
  - Mengganti dengan fungsi yang nyata untuk fungsi tersembunyi tersebut Mengganti komponen yang lebih andal
  - Menggandakan fungsi yang tersembunyi
3. Konsekuensi Operasi dan bukan operasi
  - Mengurangi kejadian kegagalan dalam operasi dengan mengganti komponen yang lebih kuat dan tahan lama
  - Mengurangi konsekuensi dari kegagalan
  - Membuat pemeliharaan pencegahan menjadi pembiayaan yang efektif

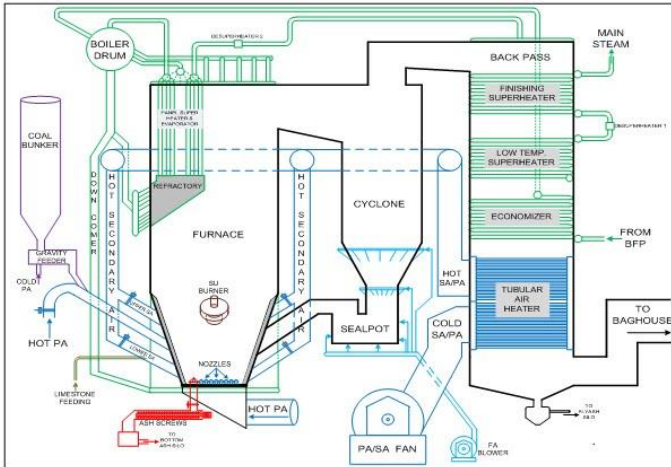
d. *Reactive Maintenance*

Pemeliharaan Reaktif juga disebut sebagai pemeliharaan kerusakan, perbaikan, *Run – to - Failure (RTF)*. *Trouble Calls (TCs)* adalah jenis perawatan reaktif. Ketika menerapkan teknik pemeliharaan ini, pemeliharaan, perbaikan peralatan, atau penggantian hanya terjadi ketika kerusakan dalam kondisi peralatan menyebabkan kegagalan fungsional. Jenis pemeliharaan ini mengasumsikan bahwa kegagalan kemungkinan besar terjadi di bagian, komponen, atau sistem, dan yang menjadi faktor utama dari kegagalan adalah usia. Hal ini menghalangi identifikasi kelompok tertentu dari bagian perbaikan sebagai lebih diperlukan atau diinginkan daripada yang lain.

## **2.4 *Circulating Fluidized Bed***

### **2.4.1 Prinsip Kerja**

Berdasarkan mekanisme kerja pembakaran, metode *fluidized bed combustion* terbagi 2 yaitu *Bubbling Fluidized Bed Combustion (BFBC)* dan *Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC)*. Pada CFBC, terdapat alat lain yang terpasang pada boiler yaitu *cyclone* suhu tinggi. *Cyclone* ini berfungsi sebagai pemisah partikel media *fluidized bed* yang belum bereaksi dan batubara yang belum terbakar dan ikut terbang bersama aliran gas buang. Prinsip kerja dari boiler dengan teknologi *circulating fluidized bed* adalah memanfaatkan udara bertekanan tinggi untuk menciptakan kondisi fluidisasi terhadap bed material yang terdiri dari pasir, abu bahan bakar, dan sorbent (*limestone*).

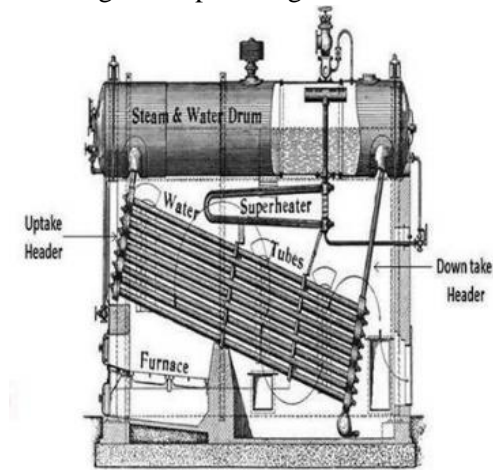


**Gambar 2.4** Skema *Circulating Fluidized Bed Boiler*

Kondisi fluidisasi ini dapat mengefektifkan proses pencampuran antara bahan bakar dan udara, serta membantu proses perpindahan panas ke pipa-pipa air yang ada pada dinding *furnace*. Udara pembakaran pada CFB boiler terdiri dari dua jenis, yaitu *primary air* dan *secondary air*. *Primary air* selain difungsikan sebagai udara fluidisasi juga digunakan sebagai udara pembakaran, sedangkan *secondary air* adalah udara yang khusus digunakan untuk pembakaran dan diumpangkan pada ketinggian tertentu dari *furnace*. Selain itu pada CFB boiler juga dilengkapi dengan *cyclone* yang difungsikan sebagai pemisah antara flue gas dan partikel solid (*bed material* dan bahan bakar) yang terikut keluar *furnace*. Sehingga partikel solid tersebut dapat disirkulasikan kembali ke dalam *furnace* untuk menjaga temperatur dan ketinggian bed material, maupun untuk meningkatkan *residence time* bahan bakar

### 2.4.2 *Water Tube Boiler*

Prinsip kerja *water tube boiler* adalah mengalirkan air umpan melalui pipa-pipa masuk kedalam ruang bakar. Terjadi proses pembakaran di ruang bakar, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa yang berisi air hingga dihasilkan uap yang akan ditampung dahulu di steam drum. Boiler ini menghasilkan kapasitas uap dan tekanan uap yang tinggi sehingga dirancang untuk pembangkit.



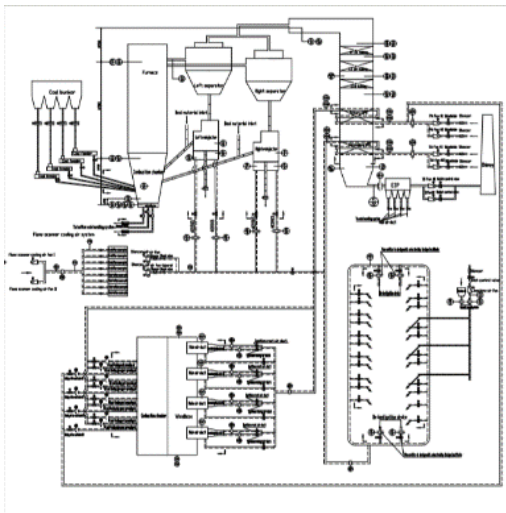
**Gambar 2.5** Skema *water tube boiler* (Mech4Study, 2016)

### 2.4.3 Sirkulasi Udara dan Gas Buang pada CFB Boiler

Material yang terbakar lama kelamaan akan naik ke bagian atas *furnace* karena massanya berkurang dan masuk ke *cyclone separator* sehingga *flue gas* dan *fly ash* terpisah dari material. *Flue gas* dan *Fly ash* hasil pembakaran dihisap keluar dari boiler oleh ID Fan dan dilewatkan melalui *Electric Precipitator* (ESP) yang menyerap 99.5% dari abu terbang dan debu yang dihembuskan ke *stack* atau cerbong asap. Material solid yang belum terbakar masuk kembali ke dalam bagian

dalam cyclone menuju *sealpot* dan diinjeksikan kembali menuju ke *furnace* sedangkan *flue gas* menuju ke *heat recovery area* atau *backpass area*. *Flue gas* akan dimanfaatkan kalornya untuk memanaskan uap jenuh pada *Finishing superheater* dan *primary superheater*, memanaskan air pada *economizer*, dan udara pada *tube air preheater*.

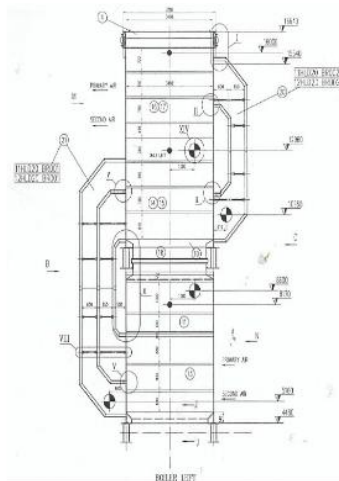
Sistem udara pembakaran yang terdapat di CFB boiler disuplai dari dua aliran utama yaitu udara primer dan udara sekunder dan dibantu oleh udara dari *fluidizing air blower*. Kurang lebih terdapat 60% udara pembakaran berasal dari *primary air fan*, 36% dari *secondary air fan*, dan sisanya berasal dari *fluidizing air blower*. Untuk menghisap *flue gas* serta *fly ash* dari ruang bahan bakar menggunakan *Induced draft Fan (I.D. Fan)* yang juga berfungsi untuk menghembuskan sisa-sisa hasil pembakaran menuju *stack* untuk dibuang.



**Gambar 2.6** Diagram *flue gas, air, and material system*  
(Dokumen pribadi)

#### 2.4.4 Air Preheater

*Air Preheater* merupakan suatu komponen yang dirancang untuk menaikkan temperatur udara yang akan digunakan pada proses pembakaran. Saat ini, ada dua jenis *air preheater* yang sering digunakan pada boiler yaitu *tube air preheater* dan *rotary air preheater*. *Tube air preheater* biasa digunakan pada pembangkit yang kapasitasnya lebih rendah dari 200 MW, sedangkan *rotary air preheater* digunakan pada pembangkit dengan kapasitas 200 MW atau lebih [Heng Chen, 2016]. Fungsi *air heater* adalah untuk memanfaatkan panas dari *flue gas* yang ada di boiler yang nantinya akan meningkatkan efisiensi boiler dengan mengurangi panas pada gas buang. Dan nantinya *flue gas* akan dibuang melalui cerobong asap pada temperatur yang jauh lebih rendah dari temperatur awal *flue gas*. Salah satu jenis *air heater* yang digunakan pada pembangkit termal yaitu *tube air heater* yang dibangun ke dalam saluran *flue gas* boiler atau *heat recovery area* (Negeswara Rao, 2016).



**Gambar 2.7** Susunan *air preheater* (Dokumen pribadi)



**Tabel 2.1** Spesifikasi *air preheater* (Dokumen Pribadi)

No	Deskripsi	Nilai	Satuan
1	Diameter luar pipa	51	mm
2	Ketebalan dinding pipa	2.5	mm
3	<i>Transverse pipe row</i>	129	row
4	<i>Longitudinal pipe row</i>	132	row
5	Luas penampang konveksi	14010	m <sup>2</sup>
6	Luas area fluida	20.74	m <sup>2</sup>
7	Kecepatan fluida	10.3	m/s
8	Temperatur masuk fluida	294.6	°c
9	Temperatur keluar fluida	148	°c

#### 2.4.5 Superheater

Merupakan komponen yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi termal dari *boiler*. Bekerja dengan cara memanaskan lanjut uap jenuh) sampai dihasilkan uap yang benar-benar kering (*steam super heat*).



**Gambar 2.8** Contoh susunan *superheater tube*

Adapun maksud dari dibuatkannya uap kering adalah supaya sudu-sudu turbin tidak terkikis oleh butiran-butiran air (sudu turbin rusak). Pada umumnya susunan pemanas uap lanjut (*steam superheater*) ini dibuat bertingkat yakni *primary superheater*, *secondary superheater*, dan *final superheater* adalah dengan maksud untuk memudahkan pengontrolan temperatur keluarannya. Pada masing-masing tingkatan superheater ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu *inlet section* dan *outlet section*. Untuk contoh kondisi operasional pada salah satu bagian *superheater* dapat dilihat pada tabel 2.5.

**Tabel 2.2** Spesifikasi *superheater* pada PLTU (Dokumen pribadi)

<b>Title</b>			
<b>Outlet tube Row A point of LT SH Pipeline</b>			
<b>No</b>	<b>Deskripsi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Unit</b>
1	Kapasitas <i>steam</i>	420	t/h
2	Konsumsi bahan akar	75387	kg/h
3	Komposisi bahan bakar		
	<i>Carbon (C)</i>	40.92%	
	<i>Sulphur (S)</i>	1.08%	
	<i>Hydrogen (H)</i>	3.42%	
	<i>Oxygen (O)</i>	13.90%	
	<i>Nitrogen (N)</i>	0.68%	
	<i>Total Moisture</i>	35%	
4	Ketebalan dinding <i>tube</i>	0.005	m
5	Diameter <i>tube</i>	0.042	m
6	Temperatur masuk <i>steam</i>	325.5	°c
7	Temperatur keluar <i>steam</i>	380.5	
8	Jumlah <i>tube row</i>	110	
9	Panjang <i>tube</i>	5.24	m

10	<i>Flue Gas</i>	5.5366	Nm <sup>3</sup> /kg
11	Kecepatan <i>flue gas</i>	9.88	m/s
12	Temperatur rata-rata dinding	414.8	°C
13	Temperatur rata-rata dinding luar	416.3	°C
14	Temperatur <i>tube</i> diperbolehkan	480	°C

#### 2.4.6 *Economizer*

Komponen ini diletakkan pada aliran *flue gas* dari *furnace*. Sisa panas dari *flue gas* di manfaatkan oleh *economizer* untuk memanaskan *feed water*. Proses ini dapat meningkatkan efisiensi dengan cara mengurangi penggunaan bahan bakar untuk memproduksi *steam*, dengan efek samping berkurangnya polusi yang dihasilkan oleh bahan bakar tersebut.



**Gambar 2.9** Contoh *economizer tube*

#### 2.4.7 *Waterwall*

Merupakan dinding air yang bagian dalamnya berisi *demineralized water* dan pada sisi luar langsung berhadapan dengan ruang bakar. *Tube* pada dinding disusun agar proses

perpindahan panas berlangsung dengan waktu yang cukup agar fluida yang berada di dalam *tube* sudah berubah menjadi *steam*.



**Gambar 2.10** Contoh *waterwall tube*

#### **2.4.8 Operation & Maintenance Issues CFB**

Idealnya penggunaan *Circulating Fluidized Bed Boiler* merupakan sistem yang relatif stabil dan bebas masalah. Namun tetap ada beberapa masalah CFB yang menyebabkan *availability* sistem berkurang sampai 60%. (Arjundwakar, 2016)

Masalah yang sering dialami oleh *Circulating Fluidized Boiler* antara lain : (Arjunwadkar, 2016)

1. *Start Up*
2. *Safety*
3. *Bed Material related*
4. *Bed Temperature Control*
5. *Emission Control*
6. *Loopseal Malfunction*
7. *Refractory Failure*
8. *Tubes Failure*
9. *Grid Nozzle Erosion*
10. *Expansion Joint Failure*
11. *Ash Cooler Underperformance*

## 12. General Maintenance Issues

### 2.4.8.1 Start Up

Mengoptimalkan waktu *start up* dapat mengurangi penggunaan bahan bakar, beberapa metode untuk mengurangi penggunaan bahan bakar saat prosedur *start up* antara lain :

- a. Optimasi ukuran *bed material*  
Ukuran *bed material* yang sesuai akan memaksimalkan panas yang digunakan dalam proses start-up, serta distribusi ukuran bed material yang baik akan memastikan tidak ada material yang tidak diinginkan ikut melalui proses *start-up*.
- b. Menambahkan bahan bakar reaktif pada saat yang tepat selama proses *start up*  
Metode ini akan membantu menaikkan temperatur bed untuk proses pembakaran bahan bakar
- c. Menempatkan *oil gun* disekitar *nozzle* udara sekunder  
Metode ini dilakukan untuk meningkatkan pembakaran minyak dan pencampuran udara menjadi lebih cepat.
- d. Meningkatkan kapasitas *burner* atau memodifikasi bukaan *burner* pada silinder  
Metode ini dilakukan untuk menghindari *slagging* yang mungkin terjadi

### 2.4.8.2 Safety

CFB boiler pada umumnya lebih aman dibanding *Pulverized Coal* (PC) boiler karena tidak adanya campuran api dan gas ledak pada *furnace*. Namun, ada beberapa kendala keamanan yang perlu diperhatikan, antara lain (Arjunwadkar, 2016):

- a. Kemungkinan terjadinya ledakan pada CFB *boiler*  
Situasi yang dapat menyebabkan ledakan pada *boiler*, antara lain (Arjunwadkar, 2016);
  1. Gangguan terhadap bahan bakar, suplai udara, atau energi pengapian pada *burner*

2. Pengapian bahan bakar yang bocor hingga ke *furnace*
3. Upaya berulang yang gagal saat mematikan bahan bakar tambahan selama proses *start up*
4. Akumulasi bahan bakar pada *bed* yang terfluidisasi ketika temperature turun dibawah temperature pengapian bahan bakar.
5. Pembersihan dengan aliran udara yang cukup tinggi untuk mencampur bahan bakar yang membara pada *hopper*.

Beberapa tindakan untuk mengurangi resiko ledakkan yang terjadi, antara lain :

- Memberikan pelatihan pada para pekerja untuk mengurangi *human error* yang terjadi
- Mendesain prosedur pengoperasiann untuk mengurangi pengoperasian secara manual
- Memberikan bahan bakar hanya ketika temperature *bed* sudah diatas temperature pengapiann
- Mengkalibrasi alat pengukur pemberian bahan bakar dapat mengurangi resiko pemberian bahan bakar secara berlebihan pada *furnace*
- Mematuhi prosedur pembersihan sebelum prosedur *start-up* dimulai
- Memasang sensor api atau monitor api pada *burner*

b. Pembakaran kapur

Sejumlah batu kapur yang tidak dikonversi berubah menjadi kalsium sulfat dan muncul di bagian bawah boiler menjadi abu kalsium oksida. Kalsium oksida yang bereaksi dengan air atau uap air untuk menghasilkan panas dapat bereaksi pada uap air dalam kulit atau mata manusia dan dapat melukainya. Untuk menghindari hal tersebut, para pekerja harus dilengkapi dengan alat pelindung, seperti

masker pernapasan, pelindung mata, dan pakaian yang dapat melindungi dari abu (Arjunwadkar, 2016).

c. Kebocoran Hidrogen Sulfida

Bagian bawah *furnace* pada CFB boiler yang beroperasi dalam keadaan stokiometri, dapat memproduksi hidrogen sulfida ( $H_2S$ ).  $H_2S$  adalah senyawa yang sangat korosif, beracun, dan mudah terbakar. Jika terjadi kebocoran  $H_2S$ , senyawa ini akan terakumulasi dibagian bawah pembangkit. Untuk mengatasinya, bagian bawah *furnace* harus dilengkapi dengan perangkat untuk mendeteksi konsentrasi  $H_2S$ . Para pekerja juga harus dilatih untuk mengantisipasi bahaya  $H_2S$  (Arjunwadkar, 2016).

c. Akumulasi Karbon Monoksida

Karbon monoksida dapat terakumulasi pada *furnace*, *cyclone*, atau saluran gas. Karbon monoksida merupakan gas tidak berbau namun dapat berbahaya jika dihirup. Untuk mengatasinya, prosedur pembersihan *furnace* yang benar harus dipatuhi, serta sensor karbon monoksida untuk mengukur konsentrasinya harus digunakan (Arjunwadkar, 2016)

### 2.4.8.3 *Bed material related*

Material bed bersifat inert, tidak mudah terbakar, dan terbuat dari batu kapur granular. Material bed yang ideal seharusnya relatif murah, mudah didapat, bersifat keras, dan tahan terhadap gesekan. Permasalahan terkait material bed dapat berupa (Arjunwadkar, 2016):

a. *Slagging* (kerak)

*Slagging* (kerak) adalah pembentukan endapan pada permukaan padat karena abu yang meleleh atau melunak. *Slagging* dapat terjadi karena aliran udara yang tidak

memadai, distribusi udara tidak merata, pemanasan bagian bawah *furnace* yang tidak merata, atau proses atomisasi saat start-up yang buruk

b. *Agglomeration*

Agglomeration (aglomerasi) terjadi ketika partikel bed menempel satu sama lain untuk membentuk partikel yang lebih besar. Hal ini disebabkan kandungan logam alkali yang tinggi dalam bahan bakar. Ketika logam alkali bereaksi dengan sulfur, klor, silika, dan fosfor akan membentuk senyawa dengan titik leleh rendah yang disebut eutektik. Eutektik akan membentuk lapisan pada partikel bed lalu mengikat mereka bersama membentuk aglomerat besar. Aglomerasi secara khusus akan merusak jika terjadi di loopseal karena dapat menyebabkan penghentian boiler. Beberapa metode untuk mengurangi aglomerasi, antara lain:

- Pada *boiler* berbahan bakar biomassa, presentase biomassa dapat dibatasi sesuai desain boiler untuk mengurangi resiko aglomerasi
- Melakukan analisis bahan bakar secara berkala
- Fluktuasi penurunan tekanan yang tidak biasa dan gradien temperatur yang curam terdeteksi pada *furnace* memberikan peringatan potensi aglomerasi 20-30 menit sebelumnya. Maka, langkah-langkah perbaikan harus segera diambil
- Oksida besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) membantu mengurangi aglomerasi karena kalium memiliki afinitas yang lebih tinggi untuk membentuk senyawa dengan komponen besi (Fe)
- Alternatif bed material seperti batu kapur, magnesit, *kalsit*, *mullite*, *clay*, *bone ash*, *blast furnace slag* dapat membantu mencegah aglomerasi.



#### **2.4.8.4 Loopseal malfunction**

*Loopseal* memiliki fungsi sebagai katup control otomatis yang mengatur daur ulang *bed* mengalir kembali ke ruang bakar (*furnace*). Beberapa permasalahan yang terdapat pada *loopseal*, antara lain (Arjunwadkar, 2016) :

##### *a. Blocking of loopseal*

*Blocking* pada *loopseal* dapat disebabkan oleh laju sirkulasi material *bed* yang melebihi kapasitas rancangannya atau mengisi bahan bakar yang mengandung banyak abu lebih tinggi dari yang ditentukan

##### *b. Plugging of Loopseal*

*Plugging* atau penyumbatan pada *loopseal* dapat disebabkan oleh potongan refractory yang gagal, slagging, atau blocking bagian daur ulang *loopseal*. *Plugging* dapat dideteksi dengan mengukur penurunan tekanan *loopseal*.

##### *c. Gas back flow*

*Gas back flow* adalah kebocoran gas buang dari ruang bakar ke *loopseal* menuju cyclone. Hal ini dapat terjadi karena kolom material pada saluran *loopseal* terlalu pendek dan penyesuaian udara pada *loopseal* tidak tepat. Permasalahan ini dapat dihindari dengan cara memastikan ukuran material sesuai dengan ukuran saluran *loopseal* dan menghentikan aliran udara *loopseal* sampai jumlah abu tertentu terakumulasi

#### **2.4.8.5 Refractory failure**

##### *a. Kegagalan akibat temperature tinggi*

Penyebab kegagalan pada *refractory* akibat temperatur tinggi dapat menyebabkan retakan besar dan spalling pada lapisan permukaan. Cara mengatasi kegagalan akibat temperatur tinggi antara lain dengan mengikuti kurva pemanasan dan pendinginan yang disediakan oleh *Original Equipment Manufacturer (OEM)* serta menggunakan serat

*stainless steel* untuk meningkatkan ketahanan terhadap *thermal shock*

b. Kegagalan pada sistem *anchor*

Penyebab kegagalan pada *anchor* terletak pada desain dan implementasinya. Metode untuk mengatasi kegagalan pada *anchor*, antara lain:

- Menggunakan desain *anchor* berbentuk ‘V’ dengan diameter ¼ inch agar mudah ditarik atau dilepas tanpa menyebabkan kerusakan *refractory*.
- Material *anchor* harus dibuat tahan panas dan korosi.
- Pemilihan elektroda dan teknik pengelasan yang tepat.
- Memperhatikan jumlah *anchor* ditiap unit area (densitas *anchor*)

#### 2.4.8.6 Kegagalan Pada *Tube*

*Tube boiler* berfungsi mengalirkan uap dan bahan bakar bertekanan dan bertemperatur tinggi. Menurut *Operation & Maintenance Best Practices Guide*, *boiler tubing* merupakan penyebab *forced outages* tertinggi pada semua jenis *boiler*. Kontribusi kegagalan *tube* pada sistem *boiler* dapat dikelompokkan pada tabel 2.6 (Atanu Saha, 2017):

**Tabel 2.3** Presentase lokasi kegagalan tube

<b>Lokasi Kegagalan</b>	<b>Presentase</b>
<i>Furnace Water Wall Tubing</i>	40%
<i>Superheater Tubes</i>	30%
<i>Reheater tubes</i>	15%
<i>Economizer tubes</i>	10%
<i>Burner tubes</i>	5%

Dengan presentase penyebab kegagalan pada *boiler tubing* menurut H.A Klein dan J.K Rice pada tabel 2.7.

**Tabel 2.4** Presentase penyebab kegagalan *tube*

<b>Penyebab Kegagalan</b>	<b>Presentase</b>
<i>Creep (long-term overheating)</i>	23.4%
<i>Fatigue</i>	13.9%
<i>Ash Corrosion</i>	12.0%
<i>Hydrogen damage</i>	10.6%
<i>Weld failures</i>	9.0%
<i>Short-term overheating</i>	8.8%
<i>Erosion</i>	6.5%
<i>Oxygen Pitting</i>	5.6%
<i>Caustic Attack</i>	3.5%
<i>Stress Corrosion Attack</i>	2.6%

Untuk penyebab kegagalan pada *tube boiler* antara lain (Arjunwadkar, 2016) :

a. Keausan mekanis

Keausan mekanis terdiri dari erosi dan *fretting*. Erosi merupakan pelepasan material akibat partikel yang menempel pada permukaan tube. Sedangkan *fretting* merupakan keausan yang terjadi akibat dua permukaan padat saling membebani satu sama lain. Keausan mekanis ini dapat disebabkan oleh faktor hidrodinamis, properti abu, aliran material dan udara, serta desain dan proses pembuatan tube. Keausan mekanis yang terjadi dibebberapa bagian CFB boiler, antara lain (Arjunwadkar, 2016):

- Korosi

Korosi merupakan kerusakan logam yang terjadi akibat reaksi logam dengan berbagai zat di lingkungannya. Logam sulfur, vanadium, klorin, dan alkali merupakan penyebab terjadinya korosi. Sulfur yang terdapat pada bahan bakar disebabkan sulfasi antara logam besi, nikel, dan kromium pada tube dan dapat menyebabkan korosi. Senyawa

vanadium bereaksi dengan oksida atau sulfida membentuk *scale* pada logam dan meningkatkan laju korosi (Arjunwadkar, 2016).

Beberapa jenis korosi yang bisa terjadi pada *fireside boiler tubing* adalah (NALCO, 1991):

a. *Oil Ash Corrosion*

Korosi tipe *oil ash* dapat terjadi apabila ditemukan lelehan *slag* yang terbentuk pada dinding *tube*. *Slag* yang bersifat korosif dapat dicirikan dari kandungan *fuel* yang digunakan, jumlah *excess air* yang digunakan berlebih, dan jika temperatur logam melebihi 593 °c.

Kandungan *fuel* yang dapat menyebabkan terbentuknya *slag* korosif antara lain terdapat tingginya kandungan *vanadium*, *sodium*, *sulfur*, ataupun kombinasi dari ketiga kandungan.

b. *Coal Ash Corrosion*

Untuk *coal ash corrosion* disebabkan oleh jenis *fuel* yang menyebabkan terbentuknya *ash* bersifat agresif. Korosi bisa terjadi jika *fly ash* menempel sehingga terbentuk *slag* pada permukaan logam yang memiliki temperatur antara 566°c sampai 732°c.

c. *Waterwall Fireside Corrosion*

Terbentuk akibat proses *fuel combustion* yang tidak sempurna, jenis korosi ini dapat diidentifikasi dengan kurangnya kadar oksigen pada daerah pembakaran (*burner*) sebagai faktor utama. Didukung juga dengan proses *combustion* yang tidak sempurna, dan penggunaan *coal* yang menghasilkan *ash* dengan *low fusion temperature* sehingga mendukung lingkungan pembakaran menjadi korosif.

d. *Cold-End Corrosion*

Faktor yang dapat menyebabkan *cold end corrosion* adalah ditemukannya kadar *sulfur trioxide*, pada *flue gas*

didapatkan kadar air, dan logam yang temperatur permukaannya berada dibawah *sulfuric acid dew point*.

Kadar air pada *flu gas* dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

1. Jumlah *excess air*
2. *Gas residence time*
3. Jumlah *catalyst* yang digunakan
4. Jumlah sulfur pada *fuel*

*e. Dew-Point Corrosion*

Jenis korosi ini terjadi akibat penumpukan *sulfurous ash* pada permukaan *tube*, diduukung dengan penerunan temperature logam pada *boiler* mencapai dibawah *dew point*. *Sulfurous ash* pada permukaan *tube* dikombinasikan dengan kadar air dapat menyebabkan terbentuknya *low-pH electrolyte* yang membentuk korosi dengan laju sampai dengan 12.7 mm/y.

Kadar air atau *moisture* terbentuk saat *boiler* mengalami fase pendinginan, sehingga permukaan temperatur permukaan logam berada dibawah *dew point*, kondisi ini mengizinkan terbentuknya *moisture* untuk terbentuk pada permukaan *tube*

Beberapa metode untuk mengurangi resiko terjadinya korosi, diantaranya adalah :

- Mengatur temperatur pada masing-masing bagian tube karena laju korosi semakin meningkat pada temperatur tinggi.
- Menggunakan bahan tambahan pada bed, seperti bauksit, kaolinit, dan batu kapur untuk menghasilkan *alkali chloride* dengan temperatur leleh yang tinggi. Pada kondisi ini senyawa ini akan mengurangi laju korosi pembentukan *alkali chloride*.

- Menambahkan kandungan sulfur pada bahan bakar yang mengandung klorin untuk menghasilkan senyawa alkali sulfate. Metode ini akan membiarkan klorin tetap pada fase gas dan mengalir keluar boiler tanpa diendapkan sehingga tidak mengakibatkan korosi.

#### **2.4.8.7 Kegagalan pada *nozzle***

Permasalahan yang terjadi pada *nozzle* umumnya berupa blockage, slagging, erosi, dan kebocoran slag. Namun alasan utama dilakukannya penggantian *nozzle* disebabkan oleh erosi dan korosi (Arjunwadkar, 2016).

- Faktor desain

Faktor desain yang perlu diperhatikan pada *nozzle* adalah:

- Kecepatan *nozzle* tidak boleh berlebihan karena dapat mengakibatkan turbulen.
- Pressure drop *nozzle* yang memadai untuk menghindari penyumbatan.
- Bahan bakar tidak boleh mengandung senyawa alkali yang tinggi karena dapat mengakibatkan korosi.
- Lokasi *nozzle* yang dekat loopseal return dan fuel feed ports akan mengakibatkan keausan berupa erosi dan korosi
- Penyebab utama erosi yang terjadi disebabkan oleh udara keluar dari *nozzle* yang berdekatan. Kecepatan partikel bed yang tinggi akan mengerosi *nozzle*
- Faktor Operasional
- Arah aliran *nozzle* karena mempengaruhi terjadinya *vortex* dan turbulen

#### **2.4.8.8 Kegagalan pada *expansion joint***

*Expansion joint* pada CFB boiler perlu diperhatikan karena terletak pada saluran yang tidak hanya mengalirkan bahan bakar, tapi juga material bed yang panas. *Expansion joint* dapat mengalami kegagalan akibat penetrasi debu pada seal atau

korosi. Metode untuk melindungi dan memperpanjang umur pakai expansion joint, antara lain (Arjunwadkar, 2016):

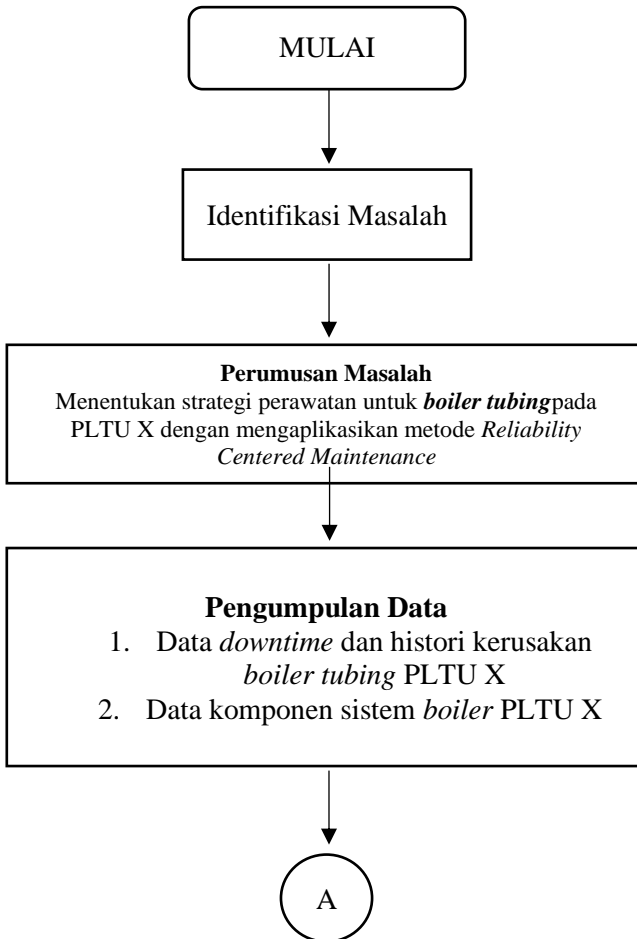
1. Melakukan *periodic maintenance* untuk mendeteksi adanya kebocoran dan kerusakan.
2. Melindungi expansion joint menggunakan fire blankets atau lapisan baja dari kerusakan selama proses pengelasan, pemotongan, grinding, atau insulation.
3. Menggunakan tenaga professional untuk proses pemasangan pelepasan *expansion joint*

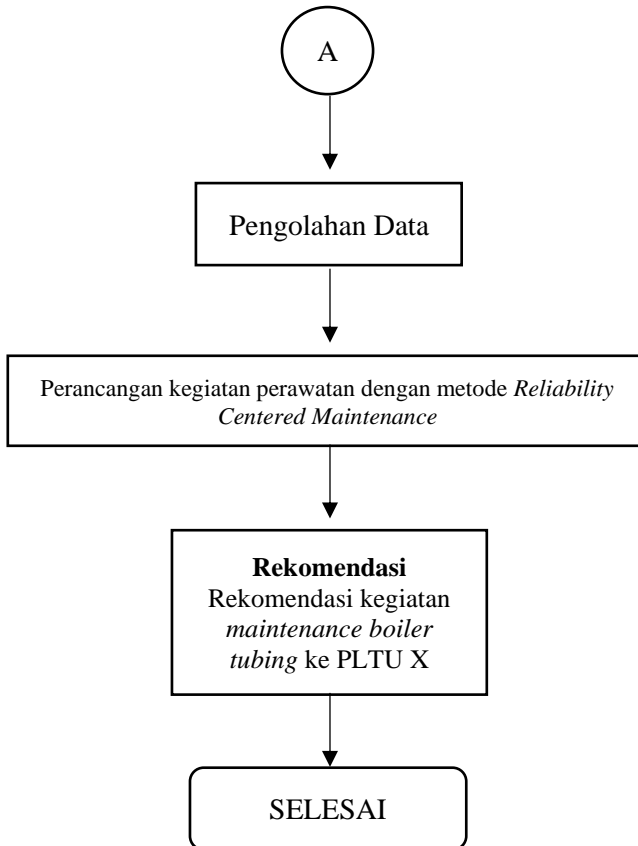
*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*



# BAB III METODOLOGI PENELITIAN

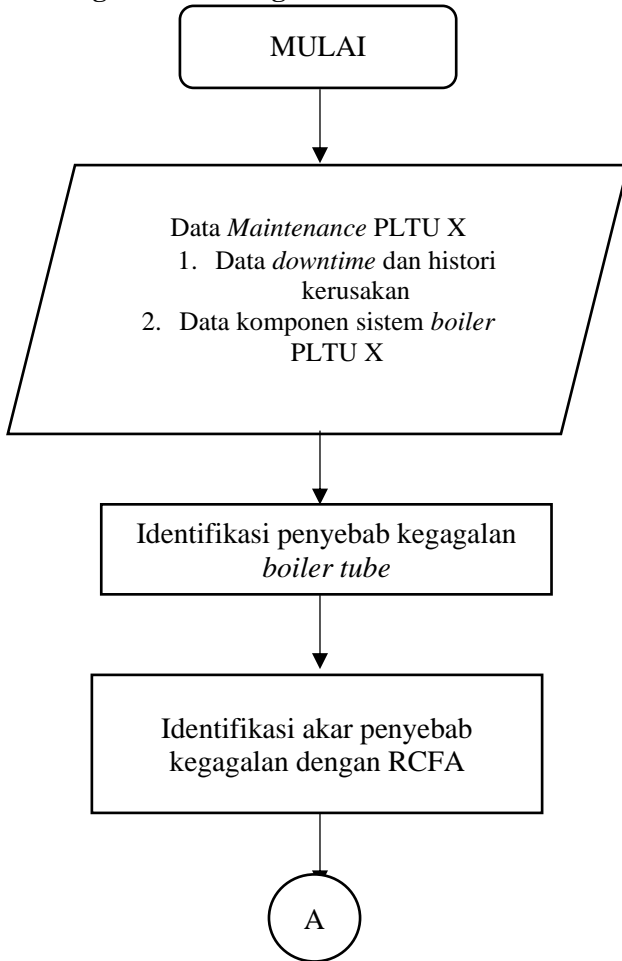
## 3.1 Diagram Alir Penelitian

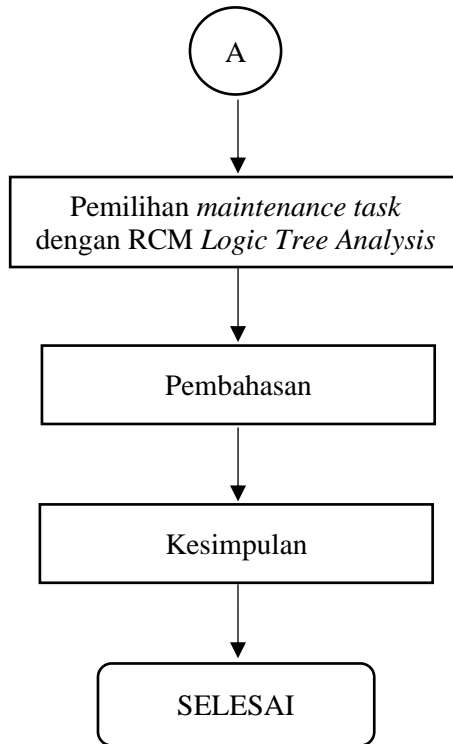




**Gambar 3.1** Diagram alir metode penelitian

### 3.2 Diagram Alir Pengolahan Data





**Gambar 3.2** Diagram alir pengolahan data

### 3.3 Metodologi Penelitian

#### 3.3.1 Identifikasi Masalah

Tahap pertama dari penelitian ini adalah identifikasi masalah pada PLTU X dari data yang sudah didapat. Dapat disimpulkan bahwa masalah yang dapat diangkat pada PLTU X Unit 1 & 2 terdapat pada sistem *boiler tubing* karena memiliki waktu *downtime* yang paling besar untuk sistem *boiler* pada setiap unit.

#### 3.3.2 Perumusan Masalah

Tahap selanjutnya merupakan perumusan masalah yang dijadikan penelitian. Berdasarkan identifikasi masalah, dapat ditemukan bahwa *boiler tubing* merupakan komponen

dengan *downtime* paling besar sehingga tepat untuk dijadikan objek penelitian. Kemudian penyelesaian masalah akan dilakukan dengan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM).

### **3.3.3 Studi Literatur**

Studi literatur dilaksanakan untuk mendapatkan informasi tambahan terkait topik yang dibawa. Sumber studi literatur merupakan buku, jurnal, dan penelitian-penelitian terdahulu yang terkait dengan topik.

### **3.3.4 Pengumpulan Data**

Tahap ini dilakukan demi mendapatkan semua informasi yang dibutuhkan untuk menjalankan penelitian. Berikut merupakan data yang dibutuhkan untuk penelitian

1. Data historis *maintenance* berupa data *downtime* dan metode perawatan yang digunakan
2. Data komponen yang diteliti

### **3.3.5 Pengolahan Data**

Berikutnya dilaksanakan proses analisis data untuk memudahkan dalam perancangan kegiatan perawatan, proses analisis yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Mengklasifikasikan komponen berdasarkan histori kegagalan sehingga didapatkan objek yang akan diteliti
2. Mencari mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada komponen terkait

### **3.3.5 Perancangan Kegiatan Perawatan**

Penentuan metode perawatan dilakukan berdasarkan analisis komponen yang memiliki pengaruh besar terhadap kegiatan operasional. Kegiatan perawatan akan dirancang menggunakan metode *reliability centered maintenance*, dimana *maintenance task* yang tepat akan dicari menggunakan

NASA *Logic Tree Analysis* untuk setiap moda kegagalan yang ada.

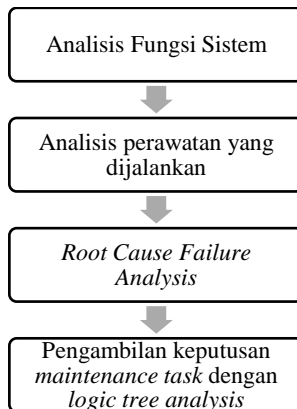
### **3.3.6 Rekomendasi Kegiatan**

Setelah melakukan semua tahap *reliability centered maintenance*, akan mendapatkan hasil berupa *proposed task maintenance* yang dapat berupa *predictive maintenance*, *preventive maintenance*, *on-condition maintenance*, *redesign*, ataupun *no scheduled maintenance*.

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMECAHAN MASALAH KOMPONEN *BOILER*

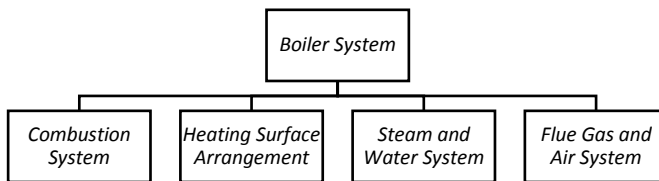
Pada bab ini akan dilakukan analisis mengenai kegagalan pada *boiler tubing* untuk mendapatkan rekomendasi *maintenance task*. Seperti dijelaskan pada gambar 4.1 proses analisis dilakukan dengan metode *reliability centered maintenance* yang diawali dengan analisis fungsi sistem, kemudian mempelajari sistem perawatan yang digunakan, Setelah itu analisis dilanjutkan dengan mencari penyebab *unplanned shutdown*, selanjutnya untuk mendapatkan perancangan sistem perawatan dibuat *root cause failure analysis* dan untuk menentukan jenis perawatan digunakan *logic tree analysis*.



**Gambar 4.1** Outline analisis dan pembahasan

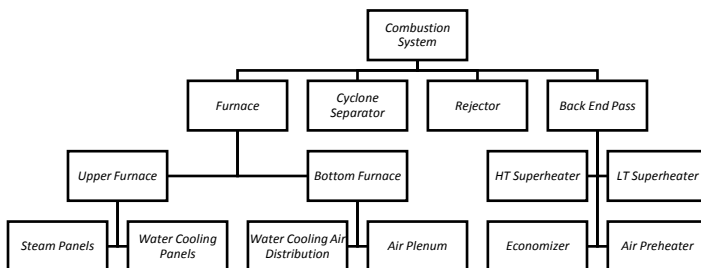
#### 4.1 Analisis Sistem Boiler

Pada gambar 4.2 dijelaskan subsistem utama pada *CFB Boiler* PLTU X



**Gambar 4.2** Subsistem utama pada *CFB Boiler* PLTU X

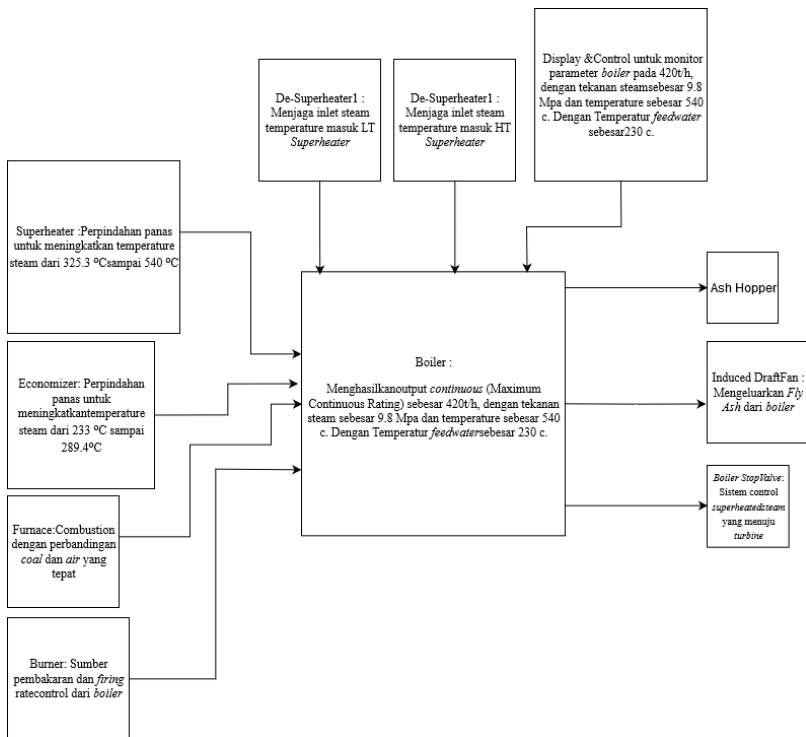
Pada penelitian ini dilakukan pada sistem *combustion* dengan susunan komponen seperti pada gambar 4.3.



**Gambar 4.3** Komponen subsistem pembakaran



Untuk analisis kegagalan perlu diketahui fungsi kerja masing-masing komponen pendukung sistem *combustion* agar ketika terjadi kegagalan fungsional dapat diketahui, dapat dilihat pada gambar 4.4 fungsi kerja komponen *combustion*.

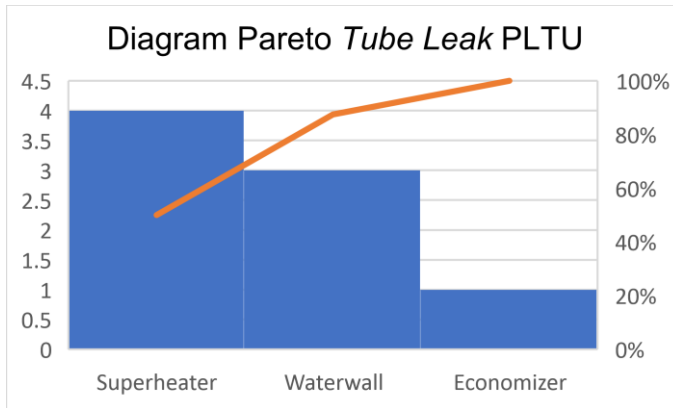


**Gambar 4.4** *Functional Block Diagram* sistem Boiler PLTU

## 4.2 Analisis data pada *Boiler Tubing*

Berdasarkan analisis yang dilakukan pada bab 1, ditemukan bahwa sistem *boiler tubing* menyumbangkan *downtime* pada *boiler* PLTU. Kemudian objek penelitian

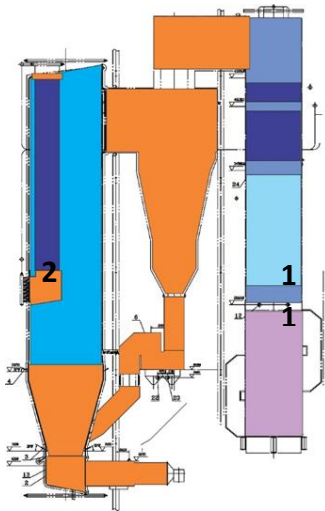
difokuskan pada *boiler tube* pada komponen yang memiliki frekuensi kegagalan tinggi seperti ditunjukkan pada gambar 4.5



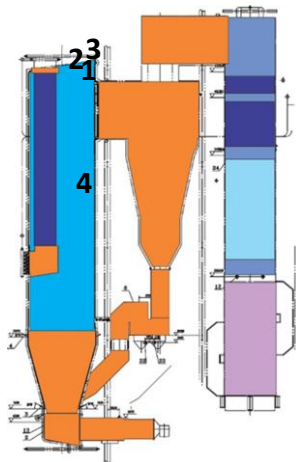
**Gambar 4.5** Diagram pareto kebocoran *tube* PLTU

Dari data yang dikumpulkan, didapatkan titik *tube leak* yang pernah terjadi pada sistem *boiler* pada PLTU Unit 1. Pada gambar 4.5 dapat dilihat di titik nomor 1 pernah terjadi *tube leak* pada area *Economizer*, dan pada titik nomor 2 terjadi *tube leak* pada *panel superheater*.

Selanjutnya pada unit 2 dapat dilihat pada gambar 4.7 pernah terjadi *tube leak* pada area *superheater* seperti ditunjukkan pada titik 1, 2, dan 3. Terakhir *tube leak* pada area *waterwall* pada titik 4.



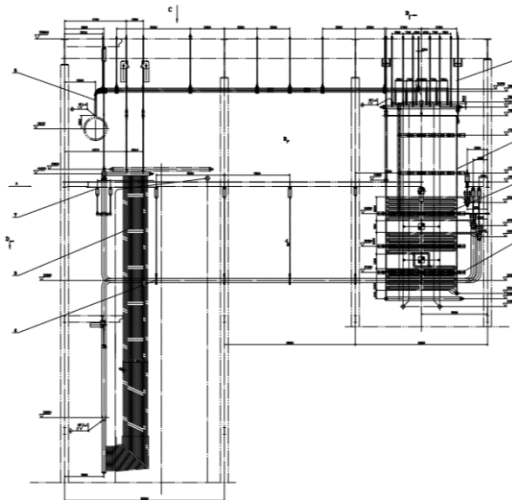
**Gambar 4.6** Titik kebocoran *tube* pada Unit 1



**Gambar 4.7** Titik kebocoran *tube* pada Unit 2

### 4.2.1 Superheater

Komponen *Superheater* merupakan bagian dari komponen *convective pass*, dengan susunan masing-masing jenis *superheater* seperti pada gambar 4.8. Pada daerah *convective pass* terjadi perpindahan panas secara konveksi. Pada *superheater* pemanasan dijalankan untuk menghasilkan uap *superheated*.



**Gambar 4.8** Susunan *superheater* PLTU

Pada PLTU X, terdapat tiga bagian *superheater* yaitu *High Temperature Superheater*, *Low Temperature Superheater*, dan *Panel Superheater*. Perbedaan dari ketiga bagian *superheater* tersebut adalah dari suhu dan tekanan operasional, letak lokasi operasional, dan susunan konfigurasi *superheater*.

Data fungsi kerja masing-masing komponen *superheater* dapat dilihat pada tabel 4.1, 4.2, dan 4.3

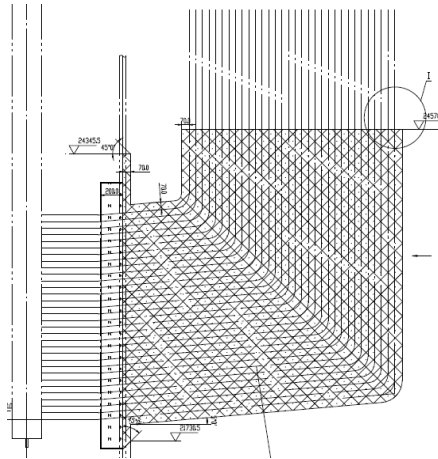
Saturated steam dari boiler drum pertama melalui upper header menuju Low Temperature Superheater, kemudian ada water spray de-superheater untuk mengatur temperature steam yang berada di belakang LT Superheater dimana steam dapat mengalami pengurangan suhu sampai dengan 34 °C. Kemudian menuju Panel Superheater, dan terdapat second stage water spray untuk mengurangi temperature steam sampai dengan 14 °C, dan terakhir menuju High Temperature Superheater. Setelah melalui rangkaian superheater, superheated steam keluar melalui superheater outlet header.

Dari furnace flue gas lanjut menuju low temperature superheater. Keluar dari furnace temperatur flue gas sebesar 672 °C dengan temperatur masuk fluida kerja sebesar 325.6 °C. Setelah proses perpindahan panas temperatur flue gas turun menjadi 475.1 °C, dan fluida kerja naik menjadi 408 °C.

**Tabel 4.1** Data desain low temperature superheater  
(Dokumen pribadi)

No	Deskripsi	Satuan	LT SH
1	Diameter luar pipa	mm	42
2	Ketebalan dinding pipa	mm	5
3	Kecepatan Flue Gas	m/s	9.9
4	Kecepatan fluida kerja	m/s	9.5
5	Temperatur masuk Flue Gas	°C	672
6	Temperatur keluar Flue Gas	°C	475.1
7	Temperatur masuk fluida kerja	°C	325.6
8	Temperatur keluar fluida kerja	°C	408

Kemudian flue gas lanjut menuju panel superheater pada bagian ini menghadapi temperatur flue gas paling tinggi yaitu sebesar 880 °C



**Gambar 4.9** Susunan panel *superheater* (Dokumen pribadi)

**Tabel 4.2** Data desain *panel superheater* (Dokumen pribadi)

No	Deskripsi	Satuan	Panel SH
1	Diameter luar pipa	mm	42
2	Ketebalan dinding pipa	mm	6
3	Kecepatan <i>Flue Gas</i>	m/s	
4	Kecepatan fluida kerja	m/s	22.7
5	Temperatur masuk <i>Flue Gas</i>	°C	880
6	Temperatur keluar <i>Flue Gas</i>	°C	880
7	Temperatur masuk fluida kerja	°C	372
8	Temperatur keluar fluida kerja	°C	470.8

Bagian terakhir adalah *high temperature superheater*, *flue gas* masuk menuju daerah HT *Superheater* pada temperature 816.5 °C dan keluar dengan temperature 672 °C, *flue gas* juga digunakan untuk memanaskan temperatur fluida kerja dari 453.8 °C sampai dengan temperatur 540 °C. Setelah

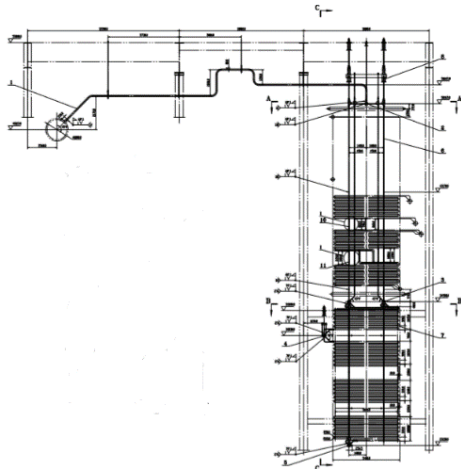
dari HT *Superheater* kondisi fluida kerja sudah berbentuk *superheated steam*.

**Tabel 4.3** Data desain HT *superheater* (Dokumen pribadi)

No	Deskripsi	Satuan	HT SH
1	Diameter luar pipa	mm	42
2	Ketebalan dinding pipa	mm	5
3	Kecepatan <i>Flue Gas</i>	m/s	11.9
4	Kecepatan fluida kerja	m/s	21.9
5	Temperatur masuk <i>Flue Gas</i>	°C	816.5
6	Temperatur keluar <i>Flue Gas</i>	°C	672
7	Temperatur masuk fluida kerja	°C	453.8
8	Temperatur keluar fluida kerja	°C	540

#### 4.2.2 *Economizer*

Fungsi dari *economizer* adalah untuk meningkatkan efisiensi sistem boiler dengan memanfaatkan kembali panas dari *flue gas*, *economizer* bekerja dengan melakukan perpindahan panas secara konveksi dari *flue gas* untuk meningkatkan suhu fluida kerja yaitu *feed water* sampai titik didih sebelum masuk ke *boiler drum*.



**Gambar 4.10** *Economizer* PLTU X (Dokumen pribadi)

*Economizer* memiliki bentuk permukaan *tubular*, dengan permukaan sisi yang bersentuhan dengan *flue gas* berbentuk *fin* untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas pada permukaan.

**Tabel 4.4** Data desain *economizer* (Dokumen pribadi)

No	Deskripsi	Satuan	Economizer
1	Diameter luar pipa	mm	42
2	Ketebalan dinding pipa	mm	5
3	Kecepatan <i>Flue Gas</i>	m/s	9.4
4	Kecepatan fluida kerja	m/s	0.6
5	Temperatur masuk <i>Flue Gas</i>	°C	475.1
6	Temperatur keluar <i>Flue Gas</i>	°C	294.6
7	Temperatur masuk fluida kerja	°C	230
8	Temperatur keluar fluida kerja	°C	287.6



### 4.2.3 Waterwall

Komponen ini terletak di dalam *furnace*, *waterwall* merupakan bagian dari *water cooling system*. *Waterwall* menerima fluida kerja dari sistem *blowdown* yang kemudian akan mengalami perpindahan panas dari *flue gas* di *furnace*. Susunan *tubing* yang terletak di dinding *furnace* dan memiliki fungsi untuk mengubah fluida kerja dari *steam drum* yaitu *feed water* menjadi uap.

**Tabel 4.5** Data desain *waterwall* (Dokumen pribadi)

Deskripsi	Satuan	Data
Material		20G (GB)
Diameter pipa X ketebalan material	mm, mm	60 X 5.5
Tekanan Desain	Mpa	11.5
Temperatur Desain	°c	379

*Waterwall* pada PLTU X menurut data desain mampu bekerja dengan optimal pada tekanan desain sebesar 11.5Mpa dan temperature 379°c. Untuk mengantisipasi erosi pada *water wall*, digunakan *castable refractory* pada bagian belakang dan samping *waterwall*/

## 4.3 Sistem Pemeliharaan

### 4.3.1 Manajemen Perawatan pada PLTU X

Untuk menjaga pembangkit agar dapat beroperasi dengan optimal dengan tujuan untuk menjaga mutu pelayanan listrik dengan baik dibutuhkan manajemen perawatan yang sesuai dengan sistem yang ada. Manajemen perawatan pada PLTU X terdiri dari perencanaan pengorganisasian, pelaksanaan, pengendalian, penelitian, dan pengembangan. Tujuan dari diadakannya manajemen perawatan adalah

1. Meningkatkan keandalan dan kinerja pembangkit
2. Mendayagunakan aset dan sumber daya pembangkitan dengan biaya yang efektif
3. Menerapkan metode kerja terbaik yang tersedia untuk mencapai perawatan dengan standar tinggi
4. Mendayagunakan sistem pengawasan *real time* yang efektif untuk pengontrolan dan penilaian kerja perawatan
5. Meningkatkan pelaksanaan perawatan prediktif dan preventif untuk menurunkan tingkat kegagalan peralatan
6. Menciptakan lingkungan kerja yang melibatkan pegawai dari segi kekuatan, loyalitas, produktifitas, dan pengembangan yang berkelanjutan.

#### **4.3.2 Kegiatan Pemeliharaan pada PLTU X**

Berdasarkan waktu pengerjaannya, kegiatan pemeliharaan pada PLTU dibagi menjadi beberapa jenis yaitu perawatan *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance*

##### a) *Preventive Maintenance*

Perawatan secara *preventive* dibagi menjadi beberapa kegiatan yang tidak terpaksa dengan kondisi *boiler* melainkan dilakukan dengan periode waktu tertentu (harian, bulanan, dan tahunan).

Daftar kegiatan *preventive* yang dilakukan secara harian pada *boiler* PLTU dapat dilihat pada tabel 4.6

**Tabel 4.6** Kegiatan perawatan *preventive* harian

<b>Waktu</b>	<b>Deskripsi Kegiatan Perawatan</b>
Harian	Inspeksi bagian bawah dan sekitar peralatan boiler untuk mencegah kebocoran air
	Memastikan area di sekitar boiler tidak terhalang dan bebas dari material yang dapat menyebabkan penyumbatan
	Memeriksa sensor suhu dan tekanan untuk memastikan berada pada kisaran atau standar yang berlaku
	Memerhatikan setiap kode kesalahan atau kode layanan pada panel display
	Memeriksa lubang udara pembakaran tidak terseumbat
	Memperhatikan dengan cermat jika terdapat getaran atau suara yang tidak biasa dari peralatan

Kemudian dilanjutkan dengan perawatan *preventive* yang dilakukan dengan interval bulanan pada tabel 4.7

**Tabel 4.7** Kegiatan perawatan *preventive* bulanan

Bulanan	Memeriksa secara visual kondisi pipa udara pembakaran dan pipa ventilasi gas buang untuk mengetahui indikasi kebocoran, kegagalan, atau penyumbatan
	Memeriksa bagian valve untuk mengetahui adanya kebocoran
3 atau 6 bulan sekali	Memeriksa secara visual pipa hidrolis boiler untuk mengetahui adanya kebocoran
	Memeriksa kondisi api pada burner

Untuk perawatan *preventive* yang dilakukan dengan interval tahunan (*annually*) dapat dilihat pada tabel 4.8

**Tabel 4.8** Kegiatan perawatan *preventive* tahunan

Tahunan	Memeriksa sistem pemanas
	Membersihkan dan memeriksa bagian heat exchanger
	Memastikan semua koneksi yang terhubung dengan boiler dalam kondisi baik
	Memastikan kondisi PH air berada dalam kisaran yang tepat
	Memeriksa dan membersihkan sensor api, ignitor, dan rakitan burner

	Memeriksa sistem ventilasi dari kegagalan, korosi, atau penyumbatan
	Memeriksa pengaturan kontrol serta uji keamanan dan kontrol operasi

b) *Predictive Maintenance*

Perawatan *predictive* dilakukan dengan mengimplementasikan *condition monitoring* dimana dengan sistem tersebut diharapkan dapat dilakukan kegiatan perawatan berdasarkan kondisi peralatan.

Untuk melakukan pemantauan kondisi alat, pada PLTU menggunakan alat atau metode seperti termografi, tribologi, analisa getaran, dan untuk memperkirakan sisa umur suatu komponen menggunakan *ultrasonic testing*, *eddy current testing*, dan juga radiografi.

c) *Corrective Maintenance*

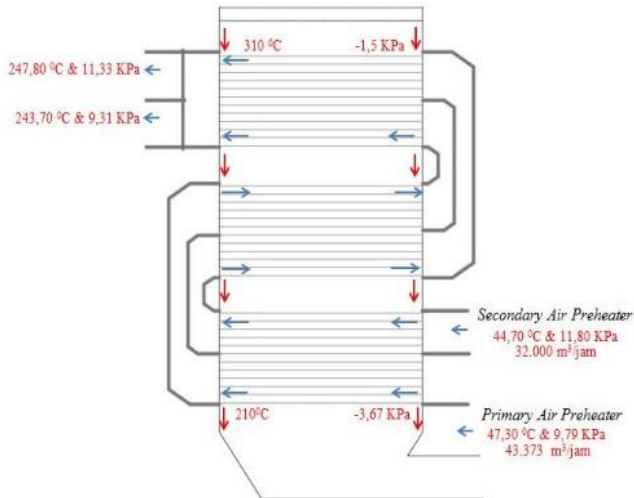
Metode perawatan *corrective* dilakukan ketika suatu komponen mengalami kegagalan dengan tujuan untuk mengembalikan fungsi komponen ke kondisi semula. Dengan dijalankan metode ini memang tidak ada tindakan pencegahan sebelum kegagalan terjadi, namun kegagalan sudah diketahui akan terjadi, dan tindakan korektif sudah direncanakan dengan matang.

#### 4.4 Analisa *Unplanned Shutdown*

Untuk menentukan *maintenance task* dari setiap komponen, sebelumnya perlu dilakukan analisa penyebab kegagalan yang dapat terjadi dan dapat menyebabkan *unplanned shutdown*. Berikut ini merupakan mekanisme kegagalan yang terjadi pada komponen *boiler tubing*.

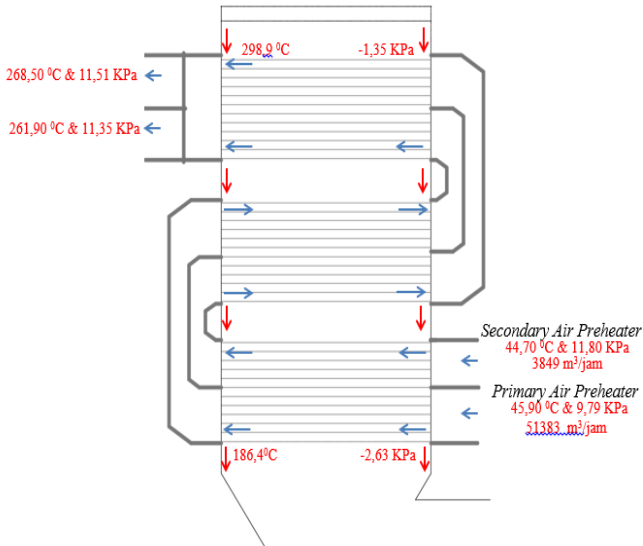
#### 4.4.1 Air Preheater

Pada *performance test* ditemukan bahwa temperatur udara yang masuk menuju *air preheater* sebesar 47.3 °C dan sesuai dengan fungsi *air preheater*, udara keluar dari *air preheater* dengan temperatur 243.7 °C. Kondisi ini saat *air preheater* bekerja dengan normal.



**Gambar 4.11** Hasil komisioning Air Preheater saat tidak terjadi kebocoran tube

Kegagalan berupa kebocoran tube air preheater ditemukan pada bulan Januari 2018, diindikasikan bahwa temperatur *flue gas* turun akibat aliran udara yang masuk melalui *primary* dan *secondary air preheater* tidak sesuai dengan desain.



**Gambar 4.12** Hasil komisioning *Air Preheater* saat terjadi kebocoran *tube*

Dapat dilihat bahwa udara yang masuk melalui *primary* dan *secondary air preheater* sebesar  $51383 \text{ m}^3/\text{h}$  dan  $3849 \text{ m}^3/\text{h}$ , dimana udara yang dibutuhkan sebesar  $43.374 \text{ m}^3/\text{h}$  dan  $32.000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Akibat aliran udara yang tidak mencukupi ini menyebabkan pembakaran pada *furnace* yang tidak sempurna, sehingga temperature *boiler* mengalami penurunan. Begitu pula dengan kecepatan udara input *secondary air preheater* yang menurun dan menyebabkan temperatur *secondary air preheater* meningkat yang menyebabkan perpindahan panas menuju *primary air preheater* secara konveksi dan menyebabkan temperatur *primary air preheater* meningkat.

Pada *tube* yang mengalami kegagalan ditemukan deposit produk korosi pada dinding *tube*. Deposit yang

menempel pada *tube* merupakan hasil dari pembakaran tidak sempurna yang menyebabkan abu mudah melekat dan bereaksi dengan *tube*. Akibat terdapatnya produk korosi pada dinding *tube* terjadilah penipisan secara progresif pada permukaan luar spesimen. Dari hasil pengujian, pada *tube* yang mengalami kegagalan ditemukan kenaikan unsur sulfur (S) yang dapat menyebabkan kenaikan senyawa  $H_2SO_4$  dan membuat lingkungan kerja *air preheater* menjadi asam. Karena terdapat abu akibat sisa pembakaran tidak sempurna, asam sulfat yang terkonsentrasi dapat bereaksi dengan abu tersebut dan dapat merusak baja.

Kandungan sulfur jika dibiarkan terlalu lama akan bereaksi dengan logam dan mengalami kondensasi menjadi larutan yang bersifat asam. Larutan tersebut bersifat reaktif terhadap logam sehingga dapat menyebabkan logam teroksidasi.

Larutan korosif akan terkondensasi pada titik *Acid dew-point temperature*. Kondisi ini sering dijumpai pada daerah dengan kondisi temperatur lebih rendah seperti *economizer* atau *air preheater* yang dapat mencapai titik *sulfuric acid dew point*. Larutan asam yang terkondensasi akan bereaksi dengan permukaan *tube* dan dengan *ash* yang kemudian akan membentuk *fouling*. *Fouling* yang menumpuk di permukaan *tube* akan menyumbat aliran *flue gas*.

Mekanisme kegagalan akibat *acid dew point corrosion* akan menyebabkan *tube* pada *economizer* akan mengalami penipisan diseluruh permukaan secara progresif dan akan mengalami kegagalan berupa kebocoran *tube*.

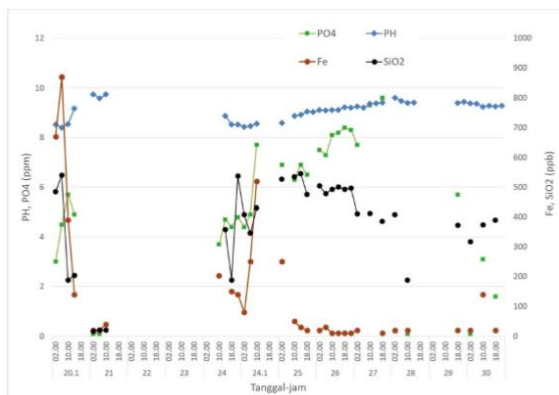
#### **4.4.2 Waterwall**

Kegagalan akibat korosi dibagi menjadi 2 jenis yaitu kegagalan *chemical* dan *electrochemical*. Kegagalan akibat *chemical* terjadi saat logam mengalami kontak langsung



dengan cairan asam atau alkali. Kategori kedua yang merupakan *electrochemical corrosion* melibatkan reaksi oksidasi-reduksi dimana satu logam berfungsi sebagai anoda, dan logam lainnya sebagai katoda. Terjadinya korosi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kualitas *steam*, temperatur, logam yang digunakan, dan kecepatan aliran fluida,

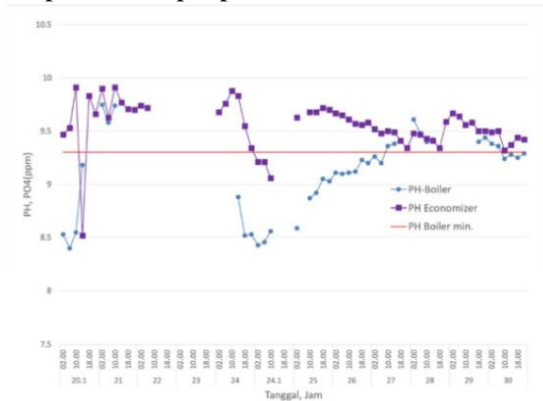
Dapat dilihat pada gambar 4.14 bahwa pada PLTU yang diteliti ditemukan bahwa kadar pH pada sistem *boiler* berada dibawah batas minimum kemudian ditemukan juga kadar PO<sub>4</sub> (*phosphate*) berada diluar rentang batas yang dirokmendasikan. Ditemukannya kadar PO<sub>4</sub> yang berfluktuasi menandakan bahwa *phosphate* digunakan untuk mengatur dan menjaga pH dalam batas



**Gambar 4.13** Data sampling kadar pH, PO<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe(O) (BPPU,2019)

Pada gambar 4.14 dapat dilihat bahwa kondisi dimana pH *boiler* berada dibawah batas minimum. Untuk mengkondisikan pH pada *economizer*, dilakukan injeksi hydrazine dan ammonia. Namun dikarenakan pH masih belum stabil, penggunaan

hydrazine dan ammonia masih belum cukup cepat untuk mengatasi penurunan pH pada *economizer*.



**Gambar 4. 14** Pengamatan pH boiler Januari 2018 (BPPU, 2019)

Dari hasil analisis pada permukaan area *waterwall* ditemukan permukaan yang tidak halus dan diduga terdapat endapan NaOH seperti ditunjukkan oleh gambar 4.15. *Sample* deposit pada *waterwall tube* diuji menggunakan SEM. *Scanning electron microscopy* (SEM) adalah alat pengamatan mikrostruktur yang menggunakan electron sebagai media pindai untuk dapat mencapai pembesaran dan resolusi yang baik. Terlihat bahwa terdapat dua jenis deposit yang berwarna merah kekuningan dan hitam.

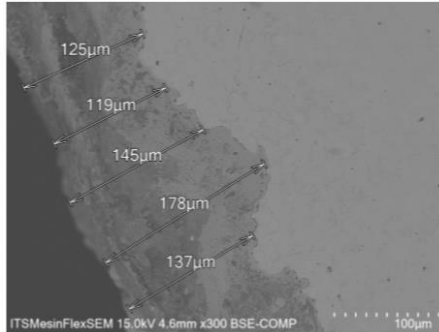


**Gambar 4.15** Permukaan *waterwall* (BPPU, 2019)

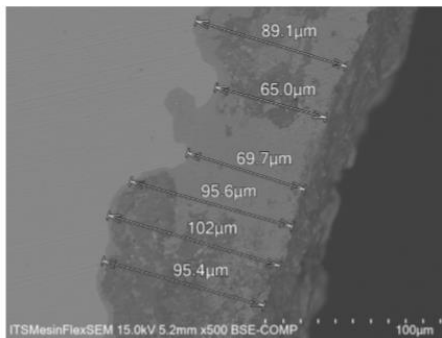
**Tabel 4.9** Komposisi deposit *waterwall* (BPPU,2019)

No	Sample	Fe	O	Mn	Na	Ca	Mg	Si	P	Cl
1	Deposit Water Wall (hitam)	84.40	10.82	0.45	0.57	1.76	0.45	0.12	0.28	0.08
2	Deposit Water Wall (merah)	89.98	6.28		0.17	1.98	0.51	0.09	0.15	

Dilakukan juga pengujian untuk mengukur ketebalan oxide. Dari pengujian yang dilakukan, ditemukan bahwa pada area *waterwall* ditemukan bahwa ketebalan *oxide* pada sisi *fireside* tebal (gambar 4.16) jika dibandingkan dengan sisi *waterside*. Sehingga mengindikasikan *corrosion rate* cukup tinggi pada *waterwall* bagian *fireside*.



**Gambar 4.16** Pengujian SEM ketebalan *oxide* sisi *fireside* (BPPU, 2019)



**Gambar 4.17** Pengujian SEM ketebalan *oxide* sisi *waterside* (BPPU, 2019)

Dari analisa komposisi kimia yang dilakukan didapatkan bahwa lapisan iron oxide mengandung *phosphate* dan tidak ditemukan kadar Na dalam skala mikro. Deposit NaOH terdapat dalam skala lokal. Kadar *phosphate* yang melebihi batas dapat terjadi karena *phosphate* digunakan untuk menaikkan pH air dan juga sebagai anti *scaling* untuk mengikat garam mineral dalam air boiler agar tidak menjadi kerak,

melainkan sebagai *suspended solid* yang bisa dibuang dengan *blow-down*.

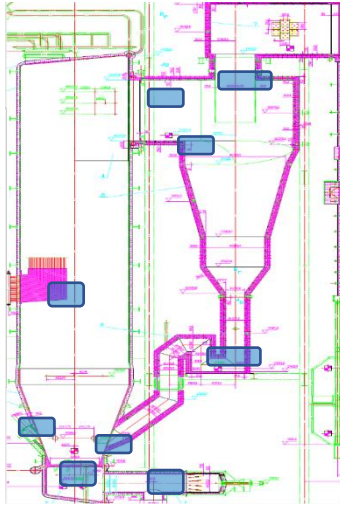
Akibat dari digunakannya *phosphate* dalam jumlah yang terlalu banyak akan memunculkan fenomena *phosphate hide-out* yang dapat menandakan terjadinya korosi *phosphate*.

Lingkungan korosif dapat dibentuk akibat *water chemistry* yang kurang baik sehingga dapat menurunkan pH dan membentuk lingkungan yang asam, kadar oksigen terlarut meningkat serta kadar *chloride* dan sulfur meningkat. Faktor lainnya adalah proses *chemical cleaning* yang tidak dilakukan dengan baik akibat penggunaan cairan pembersih yang terlalu agresif (terlalu asam), waktu pengerjaan *chemical cleaning* yang terlalu lama, dan juga kegagalan saat menetralkan kondisi *tube* setelah proses *chemical cleaning*.

#### **4.4.3 Superheater**

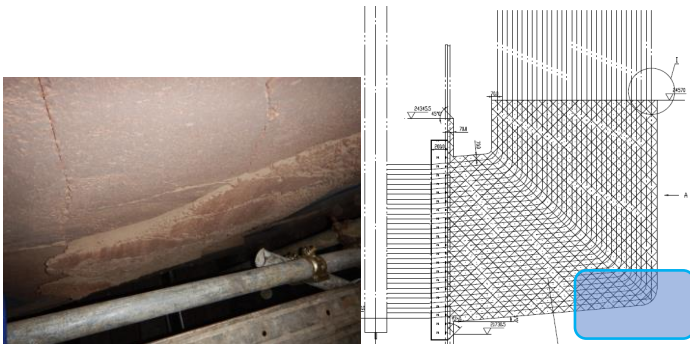
*Superheater* merupakan komponen yang temperatur kerja cukup tinggi jika dibandingkan dengan komponen lain pada *boiler*. Untuk melindungi tubing superheater dari kerusakan digunakanlah *refractory*. Sebagian besar interior boiler dilapisi oleh *refractory* untuk melindungi dinding *tube* dari abrasi akibat sirkulasi material pembakaran dan menjaga *tube* dari kerusakan akibat temperatur kerja yang tinggi.

Pada PLTU yang diteliti kerusakan *refractory* pada *panel superheater* merupakan salah satu penyebab kebocoran *tube*. Menurut data yang didapatkan, keandalan *refractory* pada *panel superheater* dinilai cukup rendah dengan kegagalan yang terjadi setiap 6 bulan sekali. Sehingga perlu diadakan rencana perbaikan agar *refractory* dapat melindungi *tube* dari kebocoran dan keandalan komponen tersebut akan meningkat. Lokasi kerusakan *refractory* pada PLTU yang diteliti dapat dilihat pada gambar 4.18

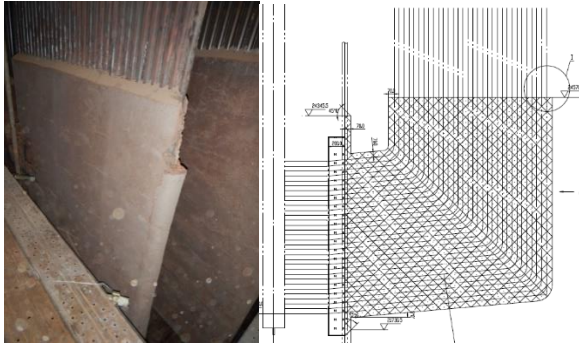


**Gambar 4.18** Lokasi kerusakan *refractory* pada boiler  
(Dokumen pribadi)

Sebagai contoh kerusakan *refractory* pada *panel superheater 5* untuk *boiler unit 1* dapat dilihat pada gambar dibawah



**Gambar 4.19** Kerusakan *refractory* pada *panel superheater 6* (Dokumen pribadi)



**Gambar 4.20** Kerusakan *refractory* pada panel *superheater* 5 (Dokumen pribadi)

Kerusakan *refractory* pada PLTU yang diteliti disebabkan oleh kondisi pembakaran yang kurang sempurna. Akibat kondisi tersebut, terdapat material pembakaran sisa yang menempel pada *refractory* sehingga terjadi fenomena *slagging*. Kejadian ini disebabkan oleh komponen abu yang dibakar melewati temperatur *ash fusion*, sehingga meleleh dan membentuk deposit pada *refractory*.

**Tabel 4.10** Konten abu dari hasil uji bulan Januari 2018  
(CoA, 2018)

Analisa Abu	Unit	Hasil
SiO <sub>2</sub>	%	44.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	18.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	10.11
CaO	%	15.59
MgO	%	1.78
K <sub>2</sub> O	%	0.39
Na <sub>2</sub> O	%	0.56
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	%	0.8
TiO <sub>2</sub>	%	0.83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.4
SO <sub>3</sub>	%	6.1
Tidak diketahui	%	0.5

Terbentuknya deposit *slag* juga menyebabkan berkurangnya kemampuan perpindahan panas dari *tube*, sehingga dapat mengurangi efisiensi sistem. Selain itu juga terbentuknya deposit mempunyai andil dalam terjadinya korosi pada *tube* akibat material abu pada tabel 4.10 yang bereaksi dengan material *refractory*.

Kegagalan pada *refractory* memiliki dampak besar terhadap operasional seperti *heat loss* yang tidak diinginkan, *tube* yang dilapisi menjadi tidak terlindungi dan meningkatkan resiko kegagalan *tube* akibat erosi dan korosi, dan mengganggu aliran fluida dari *tube*.



#### 4.4 Analisis Penyebab dan Efek Kegagalan dengan *Root Cause Failure Analysis*

Dari analisis terhadap kegagalan komponen disusun *root cause failure analysis* untuk mengelompokkan akar permasalahan pada setiap komponen seperti ditunjukkan pada tabel 4.11

**Tabel 4 11** *Root Cause Failure Analysis boiler tube*

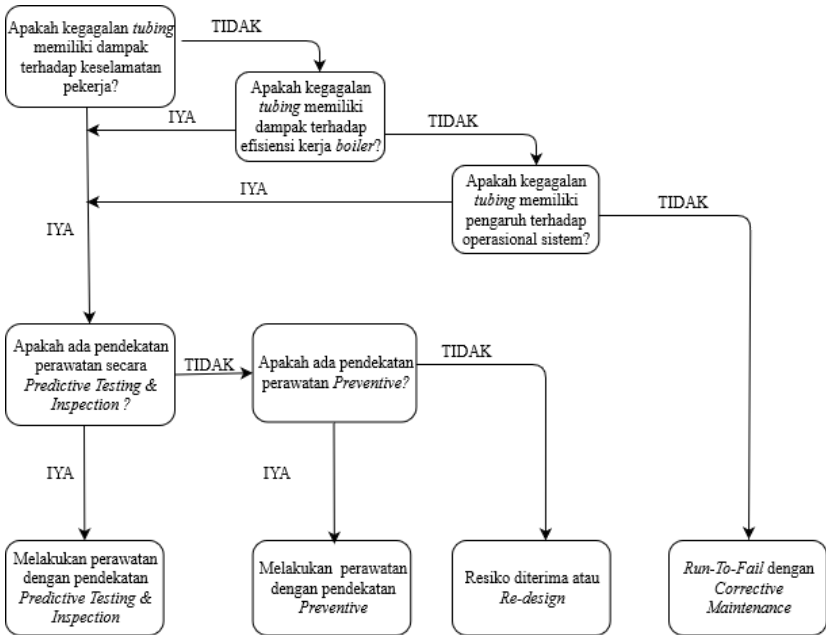
<b>Komponen</b>	<b>Modus Kegagalan</b>	<b>Penyebab Kegagalan</b>	<b>Akar Permasalahan</b>	<b>Dampak Kegagalan</b>
<i>Superheater</i>	Kerusakan <i>refractory</i> (Pengikisan dinding)	<i>Slagging</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pembakaran tidak sempurna menyebabkan penumpukan slag pada dinding <i>refractory</i></li> <li>• Tekanan dan regangan termal akibat perubahan temperatur</li> <li>• Kondisi fluida pendingin yang tidak baik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengurangi kemampuan penyerapan panas pada <i>tube</i></li> <li>• Terbentuk <i>hotspot</i> yang menyebabkan <i>refractory</i> meleleh</li> </ul>
<i>Waterwall</i>	Penipisan <i>tube</i>	Korosi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kadar pH di bawah batas minimum</li> <li>• Pengendapan <i>phosphate</i> akibat injeksi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penipisan <i>tube</i> akibat reaksi korosif yang menyebabkan <i>tube</i> pecah</li> </ul>

Lanjutan tabel 4.11

			<i>phosphate</i> terlalu banyak	
<i>Air Preheater</i>	<i>Tube</i> mengalami kebocoran	Korosi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penumpukan material korosif dari hasil pembakaran tidak sempurna</li> <li>• Temperatur kerja <i>tube</i> dibawah <i>sulfuric acid dew point</i> mempercepat <i>acid dew point corrosion</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penipisan dinding <i>tube</i> berakhir dengan kebocoran <i>tube</i></li> </ul>

#### **4.5 Maintenance Task dengan Logic Tree Analysis**

Pada tahap ini dilakukan untuk menentukan metode perawatan, pemilihan metode perawatan dilakukan dengan pendekatan berdasarkan *flowchart Logic Tree Analysis* milik NASA.



**Gambar 4.21** Alur konsekuensi kegagalan

Gambar 4.21 digunakan untuk menunjukkan konsekuensi kegagalan akibat mekanisme kegagalan yang terjadi pada sistem boiler. Untuk pengambilan keputusan berdasarkan konsekuensi kegagalan dilakukan berdasarkan konsekuensi kegagalan yang diketahui

1. Jika kegagalan *tubing* memiliki dampak terhadap keselamatan pekerja maka harus dilakukan tindakan terhadap *tubing* tersebut, Jika ada pendekatan perawatan secara *Predictive Testing & Inspection* maka dilakukan perawatan secara PT&I, dan jika tidak ada tindakan yang tepat dengan pendekatan PT&I maka dilakukan pendekatan secara preventif,

Selanjutnya jika tidak ada pendekatan secara preventif yang tepat maka dilakukan pendekatan dengan *re-design* komponen atau juga *run-to fail*.

2. Jika konsekuensi terhadap keselamatan pekerja tidak diketahui, maka analisis selanjutnya adalah konsekuensi kegagalan terhadap efisiensi kerja *boiler* tersebut. Efisiensi kerja dapat dilihat apakah kerusakan yang terjadi berpengaruh terhadap fungsi kerja komponen. Jika kerusakan menyebabkan komponen tersebut tidak bisa mencapai fungsi kerja yang ditentukan maka kerusakan dinyatakan memiliki dampak terhadap efisiensi kerja dan harus dilakukan tindakan terhadap komponen tersebut.

Sama dengan konsekuensi kegagalan sebelumnya, jika ada pendekatan perawatan secara *Predictive Testing & Inspection* maka dilakukan perawatan secara PT&I, dan jika tidak ada tindakan yang tepat dengan pendekatan PT&I maka dilakukan pendekatan secara preventif, Selanjutnya jika tidak ada pendekatan secara preventif yang tepat maka dilakukan pendekatan dengan *re-design* komponen atau juga *run-to fail*.

3. Jika kegagalan memiliki konsekuensi untuk menyebabkan sistem *boiler* berhenti beroperasi (*Unit shut-down*) maka harus dilakukan tindakan terhadap komponen tersebut. Pemilihan pendekatan perawatan yang akan dilakukan sama dengan konsekuensi kegagalan lainnya, jika terdapat pendekatan PT&I maka dilakukan perawatan *predictive*, jika tidak ada pendekatan *predictive* yang sesuai maka dilakukan pendekatan *preventive*, dan jika tidak ada pendekatan *preventive* yang sesuai maka pendekatan dilakukan dengan *re-design* ataupun *run-to fail*

#### 4.5 Pengambilan Keputusan *Maintenance Task*

Hasil analisis terhadap *root cause failure analysis* dengan pendekatan *logic tree* untuk mendapatkan *maintenance task* dapat dilihat pada tabel 4.12

**Tabel 4 12** *Maintenance Task*

Komponen	Modus Kegagalan	Konsekuensi Kegagalan			<i>PT&amp;I</i>	<i>Preventive</i>	<i>Run-to fail/ Redesign</i>	Kegiatan Perawatan
		Keselamatan Pekerja	Efisiensi Kinerja Sistem	Operasional Sistem				
<i>Superheater</i>	Kerusakan <i>Refractory</i> (Pengikisan dinding) akibat <i>Slagging</i>	Tidak terindikasi ada kecelakaan akibat kegagalan yang terjadi	<i>Slagging</i> berpengaruh pada proses perpindahan panas yang terjadi pada <i>tube</i> sehingga mengurangi	Proses perbaikan <i>refractory</i> menyebabkan sistem <i>shutdown</i>	Y		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Monitor <i>temperatur furnace</i> untuk menjaga terbentuknya <i>hotspot</i></li> <li>2. Melakukan kontrol</li> </ol>	

Lanjutan tabel 4.11

			efisiensi kerja <i>superheater</i>					terhadap konten abu yang bersirkulasi pada sistem
<i>Waterwall</i>	Penipisan <i>tube</i> akibat korosi	Tidak terindikasi ada kecelakaan akibat kegagalan yang terjadi	Deposit yang terbentuk pada dinding <i>tube</i> mengurangi proses perpindahan panas <i>tube</i> sehingga mengurangi efisiensi kerja <i>waterwall</i>	Kegagalan belum menyebabkan sistem <i>shutdown</i>	Y			<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Melakukan <i>life assessment</i> terhadap <i>tube</i> dengan mengukur laju korosi <i>tube</i> terhadap ketebalan <i>tube</i></li> <li>2. Melakukan kontrol deposit yang beresiko menyebabkan korosi</li> </ol>

Lanjutan tabel 4.11

<p><i>Air Preheater</i></p>	<p><i>Tube</i> mengalami kebocoran akibat kegagalan tube oleh korosi</p>	<p>Tidak terindikasi ada kecelakaan akibat kegagalan yang terjadi</p>	<p>Pemanasan udara pada <i>primary air preheater</i> meningkat diluar batas</p>	<p>Perbaikan dan kegagalan <i>tube</i> menyebabkann sistem <i>shutdown</i></p>	<p>Y</p>			<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Melakukan <i>life assessment</i> terhadap <i>tube</i> dengan mengukur laju korosi <i>tube</i> terhadap ketebalan <i>tube</i></li> <li>2. Monitor volume udara yang bersirkulasi agar sesuai standar desain</li> </ol>
-----------------------------	--	---	---	--	----------	--	--	---

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian menggunakan metode perawatan *Reliability Centered Maintenance* pada sistem *boiler tubing* pada *Circulating Fluidized Bed Boiler* didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Metode *Reliability Centered Maintenance* bisa diaplikasikan untuk menentukan metode perawatan pada boiler tube. Namun pada komponen yang telah terjadi kegagalan lebih baik menggunakan *root cause failure analysis* untuk menemukan penyebab permasalahan pada komponen tersebut.
2. Ditemukan kegagalan pada komponen *Waterwall*, *Superheater*, dan *air preheater*. Pada *waterwall* ditemukan tube mengalami penipisan akibat korosi, kemudian *superheater* mengalami kerusakan pada *refractory* akibat *slagging*, dan pada *air preheater* juga mengalami korosi.
  - Berdasarkan *root cause failure analysis* untuk *waterwall* ditemukan kadar pH pada sistem berada dibawah batas minimum, dan juga deposit *phosphate* yang berlebih akibat injeksi *phosphate* yang tidak tepat.
  - Berdasarkan *root cause failure analysis* untuk *superheater* ditemukan penumpukan *slag* akibat pembakaran yang kurang sempurna. Kondisi ini menyebabkan terjadi *hot spot* yang dapat melelehkan lapisan *refractory*



- Berdasarkan *root cause failure analysis* untuk *air preheater* ditemukan penumpukan material korosif pada dinding *tube* akibat pembakaran kurang sempurna, sehingga dinding *tube* terdegradasi dan menyebabkan kebocoran *tube*.
3. Melalui *logic tree analysis* ditemukan untuk semua komponen terdapat metode *predictive testing & inspection* untuk memprediksi kegagalan yang akan atau mungkin terjadi.

## 5.2 Saran

Untuk menyempurnakan penelitian sejenis, didapatkan saran yang dapat diaplikasikan sebagai berikut :

1. Untuk implementasi metode *Reliability Centered Maintenance* yang lebih tepat, sebaiknya pendataan akan kegagalan yang terjadi dibuat lebih rinci, agar analisis yang dibuat bisa terpusat pada kegagalan yang memang terjadi pada sistem terkait.
2. Pada *boiler* dengan jenis *Circulating Fluidized Bed* perlu diperhatikan komponen *waterwall* dikarenakan proses sirkulasi *Circulating Fluidized Bed* menyebabkan tingginya laju sirkulasi material pada komponen di sekitar *furnace*
3. Dilakukan perhitungan keandalan agar perbaikan yang terjadi dapat diketahui secara kuantitas hasil aplikasi perawatan

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdussalam, A.H. (2008). **Perancangan dan Penerapan Sistem Pemeliharaan dengan Metode *Reliability Centered Maintenance* (Studi Kasus : Mesin Lekuk 3DD PT. PINDAD (Persero))**. Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Arjunwadkar, A.(2016). *A Review of Some Operation and Maintenance Issues of CFBC Boilers*. Elsevier, 672-694.
- Badan Pengembang dan Pengelolaan Usaha (2019). ***Jasa Kajian RCFA Kandungan FE(O) dan SiO<sub>2</sub> pada Steam-Water Cycle PT. PLN Pembangkit Sumatera Bagian Selatan, PLTU X***. Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Das. SK, Kumari.A, dan Srivastava P.K. (2015). ***Impact of Boiler Water Chemistry on Waterside Tube Failures***. Birla Institute of Technology.
- EPRI. (2006) ***Boiler Condition Assessment Guideline (Fourth Edition)***. EPRI
- EPRI (2009). ***Field Guide : Boiler Tube Failure***. EPRI
- Marendha, F.A. (2019). **Manajemen dan Strategi Perawatan Pada Boiler dengan Teknologi *Circulating Fluidized Bed***. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Mashal. A.A (2015). ***Failure Mode Effect Analysis on Heat Recovery Steam Generator : Water Tube Boiler***. Universiti Teknologi Petronas

Moubray, J. (1997). *Reliability Centered Maintenance II (Second)*. Industrial Press Inc.

NASA. (2008). *Reliability Centered Maintenance Guide*. NASA.

OpenAIS (2015). *FMEA and Hazard Analysis Report*. OpenAis

Port, R.D, dan H.M. Herro, (1991) *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*. McGraw-Hill,

Saha, A, dan Roy. H (2017) *Failure Investigation Of a Secondary Superheater Tube in a 140 MW Thermal Power Plant*. Mechanical Engineering Research Institute Durgapur.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

**LAMPIRAN**  
**LAMPIRAN A LAJU ABRASI TUBE**  
**LAMPIRAN B KONDISI *REFRACTORY***

**LAMPIRAN A**  
**LAJU ABRASI WATERWALL & SUPERHEATER**

Bagian	Elevasi	No	Nilai Standart Thickness	Thickness (mm) IB	Ratarata Laju Abrasi ( $\mu\text{m}/\text{jam}$ )	Ratarata waktu Overlayer (Year)
Walltube	Overall	Overall	6	5.70	0.15	0.70
Superheater	Overall	Overall	6	5.73	0.13	0.79

Thickness (mm)	Walltube	SH
Standart	6	6
Good	> 4.8	> 4.8
Over Layer	3.85 - 4.8	3.85 - 4.8
Window/Retube	< 3.58	< 3.58

## LAMPIRAN B

### KONDISI *REFRACTORY*

No	Area	Sub Area	Kondisi Saat Ini	Kondisi Yang Diharapkan
1	Undebed Burner	Underbed Burner Nozzle	Sering mengalami kegagalan refractory. Refractory tidak dapat menahan thermal shock dan nozzle underbed banyak mengalami kerusakan. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory.	Frekuensi kegagalan refractory berkurang dan dapat menahan temperatur tinggi >1000 C. Nozzle Underbed Burner handal dan perbaikan mayor refractory 5 tahun sekali.
		Underbed Burner		
2	Blast Chamber	CoalFeeding Area (Front)	Sering mengalami kegagalan refractory dan salah satu penyebab tube leak area coal feeding. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory dan kehandalan area coal feeding rendah.	Frekuensi kegagalan refractory berkurang dan refractory dapat melindungi tube dari tube leak. Perbaikan mayor area coal feeding 5 tahun sekali
		Reinjector	Sering mengalami kegagalan refractory. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory dan kehandalan area Reinjector rendah.	Frekuensi kegagalan refractory berkurang. Perbaikan mayor area reinjector 5 tahun sekali

		Penampang Reinjector	Sering mengalami kegagalan refractory. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory dan kehandalan area Reinjector rendah.	Frekuensi kegagalan refractory berkurang. Perbaikan mayor area reinjector 5 tahun sekali
		SA Nozzle	Sering mengalami kegagalan refractory. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory dan kehandalan area SA Nozzle rendah.	Frekuensi kegagalan refractory berkurang. Perbaikan mayor area SA Nozzle 5 tahun sekali
		Kick Of Zone elv.16 (Front&Rear)	Sering mengalami kegagalan refractory. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory dan kehandalan area Kick Of Zone elv.16 rendah.	Frekuensi kegagalan refractory berkurang. Perbaikan mayor area Kick of Zone elv.16 setiap 5 tahun sekali
		Kick Of Zone elv.16 (Right&Left)	Sering mengalami kegagalan refractory. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory dan kehandalan area Kick Of Zone elv.16 rendah.	Frekuensi kegagalan refractory berkurang. Perbaikan mayor area Kick of Zone elv.16 setiap 5 tahun sekali
3	Panel Superheat	Panel Area	Sering mengalami kegagalan refractory dan salah satu penyebab tube leak area Panel. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory dan kehandalan area panel watercooling maupun panel Superheat rendah.	Frekuensi kegagalan refractory berkurang dan refractory dapat melindungi tube dari tube leak. Perbaikan mayor area coal feeding 5 tahun sekali
4	Panel Watercooling			



5	Cyclone	Roof	Sering mengalami kegagalan refractory dan terjadi Hotspot. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory	Frekuensi kegagalan refractory berkurang dan perbaikan mayor refractory 5 tahun sekali
		Furnace to Cyclone Area (Bulnose Side)	Sering mengalami kegagalan refractory dan terjadi Hotspot. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory	Frekuensi kegagalan refractory berkurang dan perbaikan mayor refractory 5 tahun sekali
		Target Wall	Sering mengalami kegagalan refractory dan terjadi Hotspot. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory	Frekuensi kegagalan refractory berkurang dan perbaikan mayor refractory 5 tahun sekali
6	Sealpot	U- 90derajat	Sering mengalami kegagalan refractory dan terjadi Hotspot. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory	Frekuensi kegagalan refractory berkurang dan perbaikan mayor refractory 5 tahun sekali
		U- 45 derajat	Sering mengalami kegagalan refractory dan terjadi Hotspot. Setiap 6 bulan mengalami kegagalan Refractory	Frekuensi kegagalan refractory berkurang dan perbaikan mayor refractory 5 tahun sekali

## BIODATA PENULIS



**Norman Seno Prabowo** dilahirkan di ibukota Jakarta pada hari Sabtu, 1 Juni 1996. Penulis merupakan anak satu-satunya dari orang tua bernama Boris Budiarto dan Endang Prabasari. Perjalanan pendidikan penulis cukup normal, penulis menempuh pendidikan TK pada institusi milik Kak Seto yang bernama TK Mutiara Indonesia, kemudian melanjutkan jenjang sekolah dasar pada SD Bhakti YKKP Kemanggisan. Penulis

kemudian melanjutkan pendidikan sekolah menengah pertama dan sekolah menengah atas pada institusi yang sama yaitu *Labschool* Kebayoran dan jenjang tersebut di tempuh dengan tepat waktu sampai tahun 2014. Dimana studi dilanjutkan pada institusi impian anak bangsa yaitu Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada jurusan terbaik yaitu Teknik Mesin FTI-ITS.

Selama masa perkuliahan penulis merasa perlu aktif pada kegiatan kemahasiswaan, dipilahlah organisasi Mesin ITS Autosport dimana penulis memulai aktifitas dari staff sampai pada akhirnya mengemban tanggung jawab sebagai Ketua Organisasi. Pengalaman tersebut sangat menyenangkan, dimana penulis ditempa menjadi pribadi yang lebih baik. Untuk menyelesaikan tanggung jawab akademik, penulis memilih laboratorium Rekayasa Sistem Manufaktur. Jika ingin menghubungi penulis untuk saran dan kritik terkait penelitian yang jauh dari sempurna ini dapat menghubungi melalui *email* penulis yaitu [senonorman@gmail.com](mailto:senonorman@gmail.com).

















