



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**ANALISIS KEGAGALAN *AIR HEATER* PADA  
*CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER***

**YOLANDA VIVINA MITHAYA SUMARTONO**  
0211144000085

**Dosen Pembimbing**  
Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember





**TUGAS AKHIR – TM141585**

**ANALISIS KEGAGALAN AIR *PREHEATER*  
PADA *CIRCULATING FLUIDIZED BED*  
*BOILER***

**YOLANDA VIVINA MITHAYA SUMARTONO  
0211144000085**

**Dosen Pembimbing  
Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D  
NIP. 198005202005011003**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018**



**FINAL PROJECT – TM141585**

**FAILURE ANALYSIS OF AIR PREHEATER  
ON CIRCULATING FLUIDIZED BED  
BOILER**

**YOLANDA VIVINA MITHAYA SUMARTONO  
0211144000085**

**Supervisor  
Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D  
NIP. 198005202005011003**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Engineering  
Sepuluh Nopember institute of Technology  
Surabaya 2018**

# **ANALISIS KEGAGALAN AIR PREHEATER PADA CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER**

## **TUGAS AKHIR**

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

Oleh :

**YOLANDA VIVINA MITHAYA SUMARTONO**  
NRP. 0211144000085

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Suwarno, ST, MSc, PhD (Pembimbing)  
NIP. 19800520200501
2. Prof. Dr. Ir. Wajan (Penguji I)  
NIP. 195012111985621001
3. Dr. Eng. Sutikno, ST, MT (Penguji II)  
NIP. 197407032000031001
4. Indra Sidharta, ST, MSc (Penguji III)  
NIP. 198006192006011001



**SURABAYA**

**JULI, 2018**



# **ANALISIS KEGAGALAN AIR PREHEATER PADA CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER**

**Nama Mahasiswa** : Yolanda Vivina Mithaya Sumartono  
**NRP** : 02111440000085  
**Departemen** : Teknik Mesin  
**Dosen Pembimbing** : Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D

## **ABSTRAK**

*Konsumsi listrik masyarakat Indonesia terus meningkat, namun tidak diimbangi dengan jumlah ketersediaan listrik yang ada. Berdasarkan data Kementerian Energi Sumber Daya dan Mineral (KESDM) pada tahun 2017, persentase rasio elektrifikasi Indonesia sebesar 92,75%. Sehingga pemerintah mengembangkan Pembangkit listrik Tenaga Uap (PLTU) berkapasitas 2 x 25 MW. PLTU ini menggunakan boiler dengan tipe Circulating Fluidized Bed (CFB) untuk menghasilkan uap yang digunakan untuk memutar turbin. Salah satu komponen utama pada CFB Boiler adalah heat recovery area (HRA). HRA memanfaatkan panas dari flue gas untuk memanaskan fluida yang mengalir pada tube yang ada. Pada penelitian ini, telah ditemukan kegagalan berupa kebocoran tube dikarenakan adanya lubang dan penipisan atau pengurangan ketebalan tube air preheater di seluruh permukaan yang melebihi batas toleransi. Sehingga tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui penyebab dan mekanisme terjadinya kegagalan air preheater pada Circulating Fluidized Bed Boiler*

*Tahapan pengujian pada penelitian analisis kegagalan ini dilakukan dengan melakukan pengamatan makroskopis pada spesimen dengan cara visual inspection, melakukan pengukuran spesimen, kemudian spesimen dipotong menjadi beberapa sampel untuk dilakukan pengujian metalografi untuk mengetahui struktur*

*mikro, pengujian komposisi kimia menggunakan spektrometer dan Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) untuk mengetahui persentase komposisi penyusun spesimen, produk korosi dengan X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengetahui senyawa dari produk korosi, dan terakhir dilakukan pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) dan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) untuk mengetahui karakteristik struktur mikro serta menganalisa secara kuantitatif dari presentase suatu elemen.*

*Dari penelitian analisis kegagalan ini diketahui bahwa kegagalan pada tube air preheater disebabkan oleh mekanisme sulfuric acid dew point corrosion. Mekanisme sulfuric acid dew point corrosion terjadi ketika sulfur berikatan dengan oksigen serta uap air membentuk gas  $H_2SO_4$ . Dikarenakan gas  $H_2SO_4$  terkondensasi pada temperatur  $153,12\text{ }^{\circ}C$  dan berubah menjadi larutan asam sulfat, sedangkan temperatur dipermukaan luar tube adalah  $116,5\text{ }^{\circ}C$  maka terbentuklah produk korosi. Produk korosi ini terbentuk dikarenakan adanya reaksi antara larutan asam sulfat, uap air dan logam. Produk korosi yang terbentuk pada permukaan luar tube yaitu magnetite atau  $Fe_3O_4$ , sedangkan produk korosi yang terbentuk antara permukaan dalam tube dengan udara yaitu hematite atau  $Fe_2O_3$ . Korosi yang terjadi secara kontinu dan progresif menyebabkan ketebalan tube hanya 0,73 milimeter diseluruh permukaan melebihi batas toleransi sebesar 1,35 milimeter.*

***Kata kunci: air preheater, analisis kegagalan, CFB Boiler, korosi, sulfuric acid dew point corrosion .***



# **FAILURE ANALYSIS OF AIR PREHEATER IN CIRCULATION FLUIDIZED BED BOILER**

**Student's Name** : Yolanda Vivina Mithaya Sumartono  
**NRP** : 0211144000085  
**Department** : Teknik Mesin  
**Supervisor** : Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D

## **ABSTRACT**

*Indonesian electricity consumption is keep increasing. However, it is not followed by the increasing of electricity supplies. Based on Ministry of Energy and Mineral Resources (KESDM) data in 2017, Indonesia percentage of electrification ratio is 92.75%. Therefore, government developes Thermal Power Station with capacity of 2 x 25 MW. This thermal power station is using Circulating Fluidized Bed (CFB) type of boiler to produce steam to rotate the turbine. One of the main component in CFB Boiler is Heat Recovery Area (HRA). HRA utilize heat from gas flue to heaten flowing fluids in the tubes. This research has found several failure, which is tube leaking, caused by hole and reduction of the thickness if air preheater tube across all surface that surpassed tolerance limit. The purpose of this research is to finding out the cause and mechanism of air preheater in Circulating Fluidized Bed Boiler failure.*

*Testing steps in this failure analysis research is started by macroscopic observation of the specimen by visual inspection. Then the step followed by specimen measuring, and specimen cut into several sample to be tested using metallography test to understands the microstructure. After that chemical composition testing is done using spectrometer and Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) to obtain percentage of specimen constituent compositions and corrosion product using X-Ray Diffraction (XRD) to find the compound of the corrosion product.*

*Last, Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) is done to obtain microstructure characteristics and analyze quantitatively the presentation of the elements.*

*This failure analysis research obtained that failure in air preheater tube is caused by sulfuric acid dew corrosion mechanism. Sulfuric acid dew corrosion mechanism is due to sulfur bonded to oxygen and water vapor, forming  $H_2SO_4$  gas. This gas condensed in temperature of  $153.12^\circ C$  and turned into sulfate acid solution, where the tube surface temperature is  $116.5^\circ C$ , therefore corrosion is formed. This corrosion product is formed because of there was reaction between sulfate acid solution, water vapor, and metal. The formed corrosion product in tube outer surface is magnetite or  $Fe_3O_4$ , and the formed corrosion product in tube inner surface is hematite or  $Fe_2O_3$ . Corrosion is happened continuously and progressively, causing tube thickness only 0.35 millimeters across the surface, surpassing tolerance limits of 1.35 millimeters.*

***Key words: air preheater, failure analysis, CFB Boiler, corrosion, sulfuric acid dew point corrosion.***

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT karena hanya dengan rahmat, petunjuk dan kasih-Nya akhirnya penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan Tugas Akhir Ini. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberi suatu manfaat bagi pembaca, meskipun masih banyak kekurangan dalam kualitas penelitian Tugas Akhir ini.

Keberhasilan penulis dalam menyusun laporan Tugas Akhir ini tidak lepas dari berbagai pihak yang telah memberikan bantuan baik moral maupun material. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. **Agus Sumartono** dan **Susi Rahayu**, ayah dan ibu tercinta, sebagai motivator dan mentor segala hal serta sponsor utama. Terimakasih atas segalanya yang tidak bisa penulis ucapkan satu-persatu.
2. Bapak **Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D**, selaku dosen pembimbing tugas akhir. Terima kasih atas segala saran dan bimbingan untuk laporan tugas akhir penulis. Telah sabar memberikan arahan serta bantuan untuk melanjutkan kehidupan perkuliahan dan pasca perkuliahan.
3. Bapak **Dr. Eng Sutikno S.T, M.T** selaku dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingannya selama masa perkuliahan dan terimakasih atas pengertiannya untuk memberi tambahan sks (terimakasih pak).
4. Bapak **Dr. Eng Sutikno S.T, M.T**, Bapak **Indra Sidharta S.T, M.Sc**, dan Bapak **Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA** selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran untuk menyempurnakan penulisan tugas akhir ini.
5. **Pak Mantri, Pak Gatot, Pak Budi, Pak Nandang, Mas Agus** yang mau dan telah membantu penulis dalam mengambil data.
6. Keluarga besar **Himpunan Mahasiswa Mesin** khususnya periode 15/16 dan 16/17. Serta teman-teman seperjuangan yang ada di **Departemen Organisasi (Gembel, Rachma, Saiful, Aqil, Tiara, Aldo, Eka, Atul dan Zul)**

7. Taman Bermain **Laboratorium Metalurgi** yang telah menyediakan segala fasilitas untuk pengujian tugas akhir penulis.
8. **Rombongan Wisuda 118, 119 dan rombongan setelahnya** yang telah banyak menghibur dan membantu penulis dalam pengerjaan tugas akhir (**Singo, Joko, Edwin, Izda, Usi, Zuli, Afif, Rizqu, Ananta, Mas fendy, Anto, Wira, Nashir, Mas Yorgi, Mas Krisna, Amanda, Firman dan Mbak Galih, Fitri, Fikri, Engra, Tya, Mukor, Itak dll**) semoga diberikan kelancaran atas segala urusan
9. Kepada **Rozina Azizah, Mas Fian, Mas Nico dan Mbak Galih Ajeng** terimakasih atas bantuannya yang tidak bisa saya ucapkan satu-persatu. Terimakasih.
10. Kepada **Kelompok SC 12 Poros 2014** dan kangmas **Fitroh Dzulqornaen** dan **Kelompok SC Poros 2016** terimakasih atas pelajaran hidup yang banyak diberikan.
11. Segenap Keluargaku **M57**, semoga silaturahmi ini tetap terjaga dan semoga makin harmonis
12. Seluruh **Syarekat Merah Rakyat Merah** terimakasih atas suasana kampus yang dinamis hingga membentuk pribadi yang lebih baik

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan yang dapat digunakan sebagai pertimbangan untuk penelitian selanjutnya. Penulis mengharapkan kritik dan saran untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi kita Semua

Surabaya, September 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah dan Asumsi .....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II DASAR TEORI</b> .....	<b>5</b>
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Boiler.....	8
2.3 <i>Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler</i> .....	12
2.3.1 Sirkulasi Batubara pada <i>CFB Boiler</i> PLTU.....	15
2.3.2 Sirkulasi Air dan Uap pada <i>Boiler</i> CFB PLTU....	15
2.3.3 Sirkulasi Udara dan Gas Buang pada <i>CFB Boiler</i> PLTU.....	16
2.4 <i>Air Preheater</i> .....	17
2.5 Korosi.....	22
2.6 Jenis Korosi.....	23

2.6.1	Korosi Basah ( <i>Wet Corrosion</i> ) .....	23
2.6.2	Korosi Kering ( <i>Dry Corrosion</i> ) .....	26
2.7	Produk Korosi.....	30
2.8	Tegangan Akibat Adanya Perbedaan Temperatur .....	31
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>33</b>
3.1	Analisa Kegagalan .....	33
3.2	Diagram Alir Penelitian .....	34
3.3	Peralatan Penelitian .....	35
3.4	Langkah-Langkah Penelitian .....	38
<b>BAB IV ANALISA DATA .....</b>		<b>43</b>
4.1	<i>Cause and Effect Diagram</i> atau <i>Fishbone Diagram</i> .....	43
4.2	Kondisi Operasi Kerja Air Preheater pada Circulating Fluidized Bed Boiler.....	43
4.3	Analisis Temperatur Material Tube pada <i>Air Preheater</i>	46
4.4	Desain Tube Primary Air Preheater .....	52
4.4.1	Spesifikasi dan Ukuran Tube Primary Air Preheater	52
4.5	Analisa Visual dan Dimensi <i>Tube Primary Air Preheater</i>	55
4.5.1	Permukaan Luar dan Dalam Tube Primary Air Preheater.....	57
4.5.2	Pengukuran Ketebalan Tube Primary Air Preheater	62
4.5.3	Analisa.....	65
4.6	Pengamatan Mikro.....	66
4.6.1	Temperatur Acid Dew Point.....	66

4.6.2	Analisa Komposisi Material <i>Tube Primary Air Preheater</i> .....	67
4.6.3	Pengujian Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) .....	69
4.6.4	Pengujian X-Ray Diffraction (XRD) .....	70
4.6.5	Pengujian Metalografi .....	75
4.6.6	Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) dan dan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). .....	83
4.7	Pembahasan .....	87
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>		<b>91</b>
5.1	Kesimpulan.....	91
5.2	Saran.....	92
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>93</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>96</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>		<b>101</b>

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b>	(a) Tube air <i>preheater</i> spesimen 2 tampak depan, (b) tampak belakang, (c) tube air <i>preheater</i> spesimen 3 tampak depan, dan (d) tampak belakang.....	3
<b>Gambar 2.1</b>	(a) lapisan tebal dari endapan <i>flue gas</i> pada spesimen corten (b) perbesaran lapisan endapan (c) <i>pitting</i> dibawah endapan lapisan tebal [22]....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Sampel yang digunakan dalam penelitian [11]....	7
<b>Gambar 2.3</b>	<i>Fire Tube Boiler</i> [23] .....	8
<b>Gambar 2.4</b>	<i>Water Tube Boiler</i> [8] .....	9
<b>Gambar 2.5</b>	<i>Boiler</i> tipe <i>Stroker</i> [19] .....	10
<b>Gambar 2.6</b>	<i>Boiler</i> tipe <i>Pulverized</i> [5] .....	11
<b>Gambar 2.7</b>	<i>Boiler</i> tipe <i>Fluidized Bed</i> [4].....	12
<b>Gambar 2.8</b>	Skema <i>Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler</i> PLTU .....	13
<b>Gambar 2.9</b>	<i>General Arrangement of air preheater</i> [6].....	18
<b>Gambar 2.10</b>	Spesifikasi <i>air preheater</i> berdasarkan <i>performance test</i> 19 Februari 2017 .....	21
<b>Gambar 2.11</b>	<i>General Arrangement of air preheater</i> .....	21
<b>Gambar 2.12</b>	Klasifikasi Bentuk-Bentuk Korosi Basah ( <i>Wet Corrosion</i> ) [21].....	24
<b>Gambar 2.13</b>	Skema penyerangan <i>uniform corrosion</i> [9].....	25
<b>Gambar 2.14</b>	Skema Penyerangan <i>pitting corrosion</i> [21].....	26
<b>Gambar 2.15</b>	Korosi pada temperatur tinggi [21] .....	27
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian.....	35
<b>Gambar 3.2</b>	Grinder – Polisher GRIPO 300-1V .....	37

<b>Gambar 3.3</b>	Mikroskop Optis <i>digital olimpus BX60M</i> .....	37
<b>Gambar 3.4</b>	Bagian-bagian pemotongan pada spesimen.....	40
<b>Gambar 3.5</b>	Pengukuran dimensi spesimen .....	40
<b>Gambar 4.1</b>	<i>fishbone</i> diagram kebocoran <i>tube air preheater</i>	43
<b>Gambar 4.2</b>	Hasil komisioning tanggal 19 Feb 2017 .....	44
<b>Gambar 4.3</b>	<i>Performance air preheater</i> saat ditemukan kebocoran dilihat dari monitor <i>distributed control system (DCS)</i> .....	45
<b>Gambar 4.4</b>	Skema perpindahan panas .....	46
<b>Gambar 4.5</b>	Hasil Perhitungan Suhu Material pada Penampang 1/3 Bagian Lance Tube dengan metode <i>finite Difference</i> .....	50
<b>Gambar 4.6</b>	Input persamaan finite difference .....	50
<b>Gambar 4.7</b>	Persamaan <i>Finite-Difference</i> .....	52
<b>Gambar 4.8</b>	Spesifikasi <i>Tube Primary Air Heater</i> .....	54
<b>Gambar 4.9</b>	Letak dan Arah Aliran Udara dan <i>Flue Gas</i> pada <i>Air Preheater</i> .....	55
<b>Gambar 4.10</b>	Pembagian Sampel Tube Primary Air Preheater	56
<b>Gambar 4.11</b>	Spesimen 1 (a) tampak permukaan luar, (b) tampak kiri yang merupakan sampel 1.1, (c) tampak kanan yang merupakan sampel 1.6, dan (d) tampak dalam yang merupakan sampel 3.A dan 3.B.....	57
<b>Gambar 4.12</b>	Spesimen 2 (a) salah satu lokasi terdapatnya kerak pada tampak depan, (b) perbesaran spesimen yang terdapat bekas endapan dari abu, (c) kerusakan yang terdapat pada bagian samping spesimen, dan (d) bagian dalam spesimen.....	59

<b>Gambar 4.13</b>	Spesimen 3 (a) tampak depan terdapat lubang dibagian sampel 3.2 (b) terdapat kerak yang berwarna putih disepanjang spesimen akibat adanya pengendapan abu yang terbawa oleh <i>flue gas</i> (c) spesimen tampak belakang terdapat lubang dibagian sampel 3.2 (d) bagian dalam spesimen nampak adanya kerak berwarna merah kecokelatan di sepanjang spesimen, dan (e) kerusakan yang terdapat pada bagian samping spesimen. ....	61
<b>Gambar 4.14</b>	Pengukuran ketebalan ketiga Spesimen .....	62
<b>Gambar 4.15</b>	Grafik dari perhitungan diameter luar dan dalam spesimen 1 .....	63
<b>Gambar 4.16</b>	Grafik dari perhitungan diameter luar dan dalam specimen 2 .....	63
<b>Gambar 4.17</b>	Grafik dari perhitungan diameter luar dan dalam spesimen 2 .....	64
<b>Gambar 4.18</b>	Hasil pengujian XRD pada permukaan dalam <i>tube air preheater</i> .....	71
<b>Gambar 4.19</b>	hasil pengujian XRD pada permukaan luar <i>tube air preheater</i> .....	73
<b>Gambar 4.20</b>	Morfologi permukaan <i>tube air preheater</i> (a) produk korosi berupa $Fe_3O_4$ (b) pemetaan ( <i>mapping</i> ) komposisi kimia line 1 .....	84
<b>Gambar 4.21</b>	Hasil mapping menggunakan EDS <i>mapping line</i> .....	84
<b>Gambar 4.22</b>	Mikrografi dari pengujian SEM sampel yang terdeposit (kerak) (a) <i>outer surface</i> spesimen 2 (b) perbesaran (c) <i>outer surface</i> spesimen 3 (d) perbesaran .....	85

<b>Gambar 4.23</b>	Hasil EDS deposit spesimen 2 .....	86
<b>Gambar 4.24</b>	Hasil EDS deposit spesimen 3 .....	86

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Spesifikasi Boiler pada PLTU PT PLN berdasarkan <i>performance test</i> 19 Februari 2017 ..... 14
<b>Tabel 2.2</b>	Temperatur <i>Flue Gas</i> hasil <i>performance test</i> 17 Februari 2017..... 17
<b>Tabel 2.3</b>	Spesifikasi <i>air preheater</i> yang digunakan pada PLTU Amurang berdasarkan <i>performance test</i> 19 Februari 2017 ..... 19
<b>Tabel 2.4</b>	Spesifikasi Tube <i>Primary Air preheater</i> dari <i>General Arrangement of air preheater 2 of 2</i> PLTU ..... 21
<b>Tabel 3.1</b>	Aspek-aspek yang harus dilakukan saat melakukan penelitian analisis kegagalan..... 33
<b>Tabel 4.1</b>	Properti perhitungan nilai <i>ha</i> pada <i>outer tube air preheater</i> ..... 47
<b>Tabel 4.2</b>	Properti perhitungan nilai <i>hb</i> pada <i>outer tube air preheater</i> ..... 48
<b>Tabel 4.3</b>	Komposisi Kimia ASTM A213 Grade T12..... 53
<b>Tabel 4.4</b>	Data Tube <i>Primary Air Preheater</i> ..... 53
<b>Tabel 4.5</b>	Perbandingan <i>tube desain</i> dengan ketiga spesimen..... 64
<b>Tabel 4.6</b>	Hasil pengujian komposisi kimia menggunakan <i>spectrometer</i> yang dibandingkan dengan komposisi kimia menurut ASTM A213. .... 68
<b>Tabel 4.7</b>	Hasil pengujian AAS Unsur Sulfur ..... 69
<b>Tabel 4.8</b>	Hasil pengujian AAS Unsur klorin ..... 69
<b>Tabel 4.9</b>	Tabel struktur mikro spesimen 1 yang diamati di daerah membujur ..... 75

<b>Tabel 4.10</b>	Tabel struktur mikro spesimen 1 yang diamati di daerah melintang .....	76
<b>Tabel 4.11</b>	Tabel struktur mikro spesimen 2 yang diamati di daerah membujur .....	77
<b>Tabel 4.12</b>	Tabel struktur mikro spesimen 2 yang diamati di daerah melintang .....	78
<b>Tabel 4.13</b>	Tabel struktur mikro spesimen 3 yang diamati di daerah membujur .....	80
<b>Tabel 4.14</b>	Tabel struktur mikro spesimen 3 yang diamati di daerah melintang .....	81
<b>Tabel 4.15</b>	Hasil mapping EDS.....	84
<b>Tabel 4.16</b>	Hasil pengujian EDS kerak spesimen 2.....	86
<b>Tabel 4.17</b>	Hasil pengujian EDS kerak spesimen 3.....	86

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan masyarakat Indonesia akan listrik terus meningkat seiring dengan bertumbuhnya populasi masyarakat Indonesia. Hal tersebut menyebabkan konsumsi listrik terus meningkat namun tidak diimbangi dengan jumlah ketersediaan listrik yang ada. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2017, persentase wilayah yang teraliri listrik atau rasio elektrifikasi Indonesia sebesar 92,75% [1]. Defisit listrik di Indonesia sangat besar, khususnya pada PT.PLN (Persero) 40 MW sejak tahun 2010 [20]. Sehingga pemerintah membangun Pembangkit listrik thermal berkapasitas 2 x 25 MW yakni Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berlokasi di Sulawesi Utara yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar utamanya.

PLTU memiliki tiga komponen utama untuk menghasilkan listrik yaitu, *boiler*, turbin dan generator. *Boiler* berfungsi sebagai tungku pemanas yang mengubah air menjadi uap yang selanjutnya digunakan untuk memutar turbin. Putaran turbin disambungkan dengan generator yang mengubah energi kinetik dari putaran turbin menjadi energi listrik. Salah satu jenis *boiler* yang digunakan pada PLTU menggunakan tipe CFB (*Circulating fluidized Bed*). CFB *boiler* menggunakan konsep *fluidized bed* yang mensirkulasikan *bed material* dari *furnace* (ruang bakar) secara kontinu selama proses pembakaran untuk menghasilkan uap yang digunakan untuk memutar turbin. Terdapat 3 komponen utama pada CFB *boiler* yaitu *furnace* yang merupakan tempat terjadinya pembakaran, *cyclone* merupakan pemisah *flue gas* (gas-gas sisa pembakaran) dan *fly ash* (debu hasil pembakaran), dan *heat recovery area* (HRA) yaitu tempat yang memanfaatkan kalor dari gas sisa hasil pembakaran (*flue gas*) untuk memanaskan fluida yang mengalir di setiap *tube* yang ada.

Dalam pengoperasiannya sering kali ditemukan kegagalan pada beberapa komponen di PLTU, khususnya pada *boiler*. Kegagalan pada komponen *boiler* dapat mengakibatkan dampak negatif apabila dilihat dari berbagai aspek, salah satunya masalah defisit listrik serta terhambatnya pasokan listrik yang terhenti akibat proses perbaikan komponen-komponen yang rusak. Suatu kegagalan yang terjadi dapat ditelusuri penyebabnya, sehingga dapat dilakukan upaya-upaya penanggulangan untuk meminimalisasi dampak negatif yang ditimbulkan dari kegagalan tersebut.

Salah satu contoh *tube* yang mengalami kegagalan pada PLTU yaitu seperti pada gambar 1.1 yang merupakan spesimen *air preheater* yang diambil dari *circulating fluidized bed boiler* yang berada pada bagian *heat recovery area*. Kegagalan ini ditemukan pada tanggal 21 Juli 2017 hingga 03 Januari 2018 pada Unit 2 sebanyak 703 *tube primary air preheater* dari total 1886 *tube*. Kegagalan ini menyebabkan durasi perbaikan pada Unit 2 PLTU ini terhitung dari *shutdown* sampai sinkron adalah 16 hari 4 jam dan 54 menit. Dalam kasus ini ditemukan kegagalan pada *air preheater* berupa kebocoran dikarenakan adanya lubang (*leakage*) serta penipisan atau pengurangan ketebalan *tube* diseluruh permukaan hingga melebihi batas toleransi sebesar 1,35 milimeter yang dihitung menggunakan ASME B31.3 hingga ketebalan sisa *tube* mencapai 0,73 milimeter. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian analisa kegagalan untuk menghindari terjadinya kasus kegagalan serupa di kemudian hari.







**Gambar 1.1** (a) Tube air *preheater* spesimen 2 tampak depan, (b) tampak belakang, (c) tube air *preheater* spesimen 3 tampak depan, dan (d) tampak belakang

## 1.2 Perumusan Masalah

Selama proses perbaikan yang dilaksanakan pada tanggal 21 Juli 2017 hingga 03 Januari 2018 telah ditemukan 703 *tube primary air preheater* dari total 1886 *tube* yang mengalami kegagalan. Dengan penggunaan *tube primary air preheater* semenjak tahun 2013, kegagalan yang muncul berupa lubang (*leakage*) dan penipisan atau pengurangan ketebalan *tube* hingga melebihi batas toleransi sebesar 1,35 milimeter hingga ketebalan sisa *tube* mencapai 0,73 milimeter. Kegagalan *air preheater* pada CFB *boiler* Unit 2 menyebabkan *boiler* berhenti beroperasi selama 16 hari 4 jam 54 menit. Dengan berhentinya sistem yang beroperasi, maka banyak kerugian yang ditimbulkan seperti kurangnya pasokan listrik yang diterima masyarakat.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian analisis kegagalan ini adalah :

1. Mengetahui penyebab terjadinya kegagalan *air preheater* pada *Circulating Fluidized Bed Boiler*.
2. Mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan *air preheater* pada *Circulating Fluidized Bed Boiler*.

#### **1.4 Batasan Masalah dan Asumsi**

Beberapa batasan masalah dan asumsi yang digunakan agar penelitian dapat berjalan dengan baik adalah :

1. Komponen *air preheater* memiliki komposisi material yang homogen dan tidak memiliki cacat awal.
2. Desain awal yang digunakan pada *air preheater* sudah sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.
3. Proses perakitan dan perawatan sudah sesuai dengan standar operasional yang telah ditentukan.
4. Spesimen diambil dari *air preheater* CFB boiler Unit 2.
5. Spesimen yang dianalisis merupakan spesimen yang berasal dari *primary air preheater*.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

1. Bagi perusahaan industri pembangkit dan bagian perawatan harian, dengan adanya penelitian analisa kegagalan. ini, dapat dijadikan pertimbangan dalam pelaksanaan operasi dan perawatan sehingga tidak terjadi kegagalan yang serupa.
2. Bagi kalangan akademis, dengan adanya analisa kegagalan ini diharapkan dapat menjadi tambahan ilmu yang dapat diaplikasi untuk menangani kasus kegagalan serupa.
3. Terjalin hubungan baik antara institusi pendidikan dengan instuisi perusahaan yang bersangkutan.

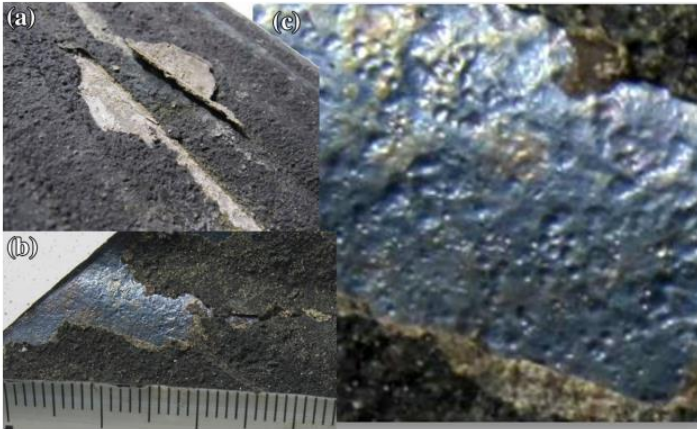
## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Penelitian Terdahulu**

Penelitian mengenai kegagalan *air preheater* yang serupa sudah banyak dilakukan sebelumnya. Penelitian-penelitian tersebut dapat dijadikan acuan dalam pengambilan data dan juga menjadi dasar teori dalam menemukan penyebab serta mekanisme kegagalan pada penelitian *air preheater* ini. Berikut merupakan penelitian terdahulu yang dapat dijadikan acuan ;

- M. R Shayan, dkk “*On the Failure Analysis of An Air Preheater in Steam Power Plant*” pada tahun 2015. Penelitian ini dilakukan pada suatu pembangkit yang menggunakan bahan bakar yang sering digunakan di benua Afrika yaitu mazud pada proses pembakaran di *boiler*. Terjadi kerusakan pada *air preheater* yang terbuat dari material tahan korosi (*corrosion resistant material/Corten*) untuk menahan *Acid Dew-point Corrosion* seperti pada gambar 2.1. Telah dilakukan *visual inspection*, analisis kimia dan metalurgi, pengamatan mikroskopik dari *air preheater* serta endapan yang ada. Menggunakan persamaan Verhoff dan Banchemo untuk mencari suhu titik embun asam sulfat (*sulfuric acid dew-point temperature (ADPT)*).

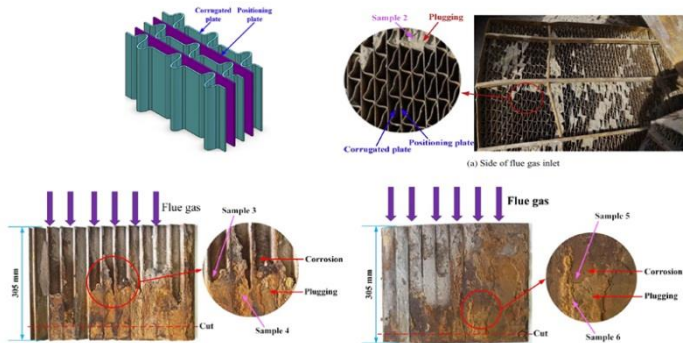


**Gambar 2.1** (a) lapisan tebal dari endapan *flue gas* pada spesimen corten (b) perbesaran lapisan endapan (c) *pitting* dibawah endapan lapisan tebal [22]

Sehingga analisis penyebab kegagalan pada baja Corten dapat disimpulkan bahwa kegagalan disebabkan oleh korosi titik embun asam sulfat (*sulfuric acid dew-point corrosion*) dan korosi *pitting* dibawah endapan. Menggunakan pengujian *X-ray Diffraction* (XRD) sehingga didapatkan data dari produk korosi yang terbentuk yaitu Besi Sulfat [ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ], Besi Sulfida [ $\text{FeS}$ ], *Hematite* [ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ] dan *Magnetite* [ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ]. Kegagalan tersebut berasal dari penggunaan bahan bakar berkualitas rendah yaitu bahan bakar mazud pada pembangkit. *Sulfuric ADPT* dihitung menggunakan konsentrasi  $\text{SO}_2$  yang sangat rendah dan yang sangat tinggi yang diambil dari analisis *flue gas*, dan didapatkan kisaran temperatur 138-142°C [22].

- Heng Chen, dkk “*Corrosion and Viscous ash Deposition of a rotary air preheater in a coal-fired power plan*” pada tahun 2016. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik korosi dan endapan abu kental pada *rotary air preheater*. Sampel seperti pada gambar 2.2 merupakan sampel yang terkorosi dan terdapat pengendapan diambil dari *air*

*preheater* pembangkit 300 MW di China dan dianalisis menggunakan XRF, XRD, SEM serta EDS.



**Gambar 2.2** Sampel yang digunakan dalam penelitian [11]

Hasil analisis menunjukkan bahwa temperatur titik embun asam sulfat yaitu  $100,76^{\circ}\text{C}$  menggunakan perhitungan *Soviet thermodynamic*. Terdapat korosi yang lebih serius serta endapan kental abu dari bagian *air preheater* yang disebabkan oleh kondensasi asam sulfat daripada yang disebabkan oleh kondensasi amonium bisulfat (ABS). Produk korosi terutama  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan  $\text{FeS}$  dan reaksi utama yang muncul antara logam atau logam oksida diperoleh dari kondensasi asam sulfat. Sebagian besar kondensasi asam sulfat memungkinkan untuk bereaksi dengan abu untuk membentuk ikatan sulfat seperti  $\text{K}_3\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  and  $\text{CaSO}_4$ . Namun reaksinya jauh lebih lambat daripada proses yang mengembungkan asam sulfat yang melekat pada partikel abu. Karena partikel abu halus memiliki area permukaan yang lebih besar dan asam sulfat kental rentan terserap ke partikel abu halus. Partikel abu halus lengket ini memainkan peran pengikat dalam deposisi abu kental. Deposisi abu kental dan korosi hampir dimulai pada saat yang sama dan endapan abu kental sangat membantu untuk mengurangi korosi. Endapan tidak hanya diserap dan direaksikan dengan sulfat yang terkondensasi, tetapi juga membentuk 'lapisan pelindung' di luar permukaan logam

untuk menghentikan gas / asam sulfat cair mencapai ke permukaan logam [11].

## 2.2 Boiler

*Boiler* atau katel uap adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap bertekanan dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari hasil pembakaran bahan bakar seperti batubara, minyak bumi maupun gas pada ruang bakar, dimana air dengan volume besar diubah menjadi uap panas bertekanan dengan volume yang lebih kecil yang selanjutnya digunakan untuk memutar turbin uap [7]. Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa, maka *Boiler* diklasifikasikan menjadi dua, yaitu:

### 1. *Fire Tube Boiler*

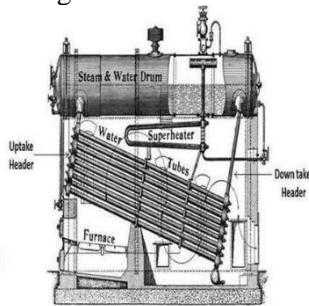
Prinsip kerja dari *fire tube boiler* adalah mengalirkan gas panas sisa pembakaran melalui pipa. Dimana disekeliling pipa terdapat air sehingga gas panas tersebut memanaskan air yang terdapat di dalam *boiler* secara konduksi panas sehingga terbentuk uap panas. Uap yang dihasilkan memiliki tekanan dan kapasitas yang rendah. Menggunakan bahan bakar minyak maupun gas dalam pengoperasiannya [Doughlas W. Karkow, 2014].



**Gambar 2.3** *Fire Tube Boiler* [23]

## 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.

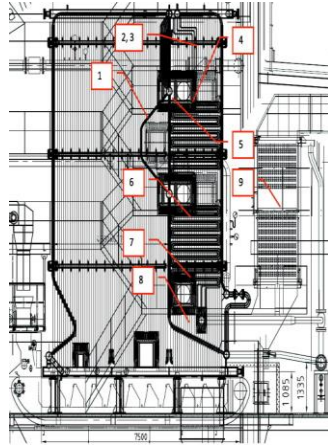


**Gambar 2.4** *Water Tube Boiler* [8]

Berdasarkan teknologi pembakarannya, secara umum *Boiler* dibagi menjadi tiga jenis, yaitu :

### 1. *Boiler tipe stoker*

*Boiler tipe stoker* menggunakan rantai berjalan (*belt conveyor*) sebagai tempat pembakaran bahan bakar yang umumnya berupa padatan. Secara singkat proses kerjanya adalah dengan meniupkan udara panas dari bawah *belt conveyor* sehingga bahan bakar padat seperti batubara terbakar. Sistem pembakaran dengan memasukkan bahan padat pada bed pembakaran yang tetap, udara yang digunakan untuk proses pembakaran diperasikan dengan kecepatan yang kecil [17].

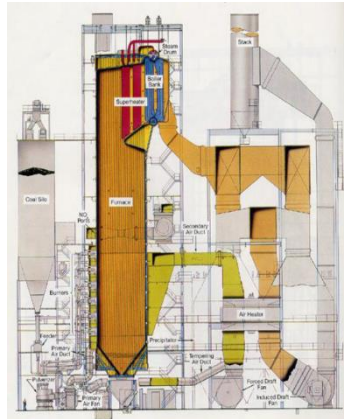


**Gambar 2.5** Boiler tipe *Stoker* [19]

## 2. Sistem *Pulverized*

*Boiler tipe Pulverized* merupakan *Boiler* yang paling banyak digunakan pada saat ini, khususnya di Indonesia. Prinsip kerjanya adalah dengan menggunakan *mill* atau *pulverizer* yang merupakan alat bantu pada *Boiler* untuk menggiling batubara kasar agar menjadi batubara halus atau serbuk (*coal finesses*). Tujuan penghalusan batubara ini adalah agar batubara lebih mudah dibakar sehingga pembakaran sempurna tercapai. Kemudian batubara halus menuju ruang bakar menggunakan media udara panas yang dihembuskan oleh *nozzle* [5].

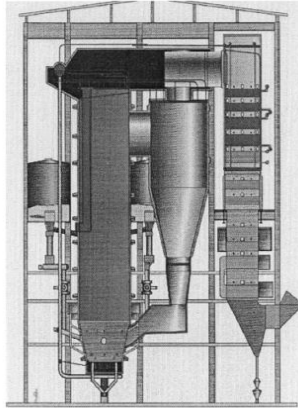




**Gambar 2.6** Boiler tipe *Pulverized* [5]

### 3. Sistem *Fluidized Bed*

Prinsip kerja dari *Fluidized bed Boiler* hampir sama dengan *Boiler stoker*, namun pada *Boiler* ini tidak menggunakan *belt conveyor*, akan tetapi menggunakan tumpukan bed material (pasir kuarsa, pasir kapur, dan lain-lain) yang diletakan dibagian bawah ruang bakar *Boiler* sebagai media memanaskan udara dan ruang bakar. Udara dengan tekanan dan kecepatan tinggi dihembuskan dari dasar tungku melalui *nozzle-nozzle* dan menembus tumpukan bed material sehingga batubara yang berada diatas bed material tersebut dapat melayang dan terbakar dalam ruang bakar. Batubara yang belum habis terbakar kemudian ikut bersama *flue gas* hasil pembakaran yang nantinya akan dipisahkan pada *cyclone*. Batubara yang masih bisa digunakan akan kembali ke ruang bakar agar terbakar sempurna [4].



**Gambar 2.7** Boiler tipe *Fluidized Bed* [4].

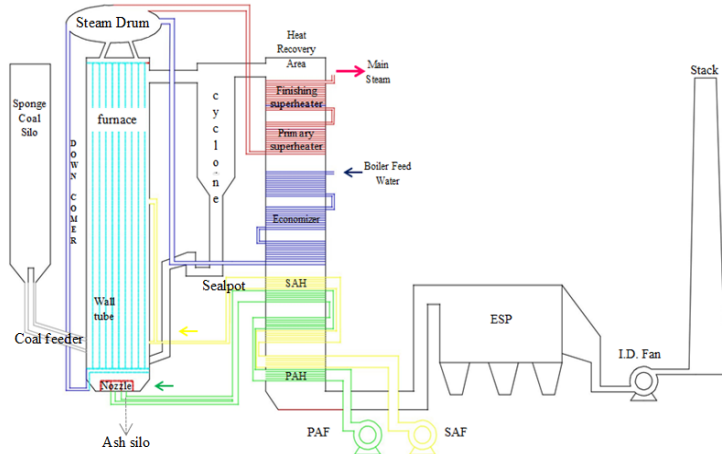
### 2.3 *Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*

*Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler* pada gambar 2.6 adalah perangkat yang menggunakan konsep *fluidized bed* yang mensirkulasikan bed material pada *furnace* secara kontinu selama proses pembakaran. Bed Material difluidisasikan oleh udara berkecepatan tinggi oleh *primary air fan* melalui *nozzle* pada bagian dasar *furnace*. Fluidisasi merupakan istilah dimana bed material dihembuskan oleh udara berkecepatan tinggi sehingga bed material seolah-olah mengalir selayaknya fluida. Selama bersirkulasi bed material dan *fly ash* dipisahkan menggunakan alat pemisah yaitu pada bagian *cyclone* agar bed material yang masih dapat digunakan masuk kembali kedalam *furnace* sehingga terjadi pembakaran yang sempurna.

Bed material yang disirkulasikan menyerap panas dari hasil pembakaran batubara yang kemudian ditransferkan secara konveksi menuju dinding-dinding *water wall*. Panas inilah yang digunakan yang kemudian digunakan untuk memanaskan air di dalam *water wall* yang nantinya menghasilkan produk uap bertekanan di dalam steam drum [4].

Pemanasan awal pada *Boiler* dilakukan dengan melakukan pembakaran menggunakan bahan bakar minyak *High Diesel Speed* (HSD) hingga mencapai suhu  $593^{\circ}\text{C}$  kemudian batubara mulai diumpankan. Ketika suhu telah mencapai  $789^{\circ}\text{C}$ , bahan bakar minyak HSD akan dinonaktifkan. Udara dengan tekanan dan kecepatan tinggi dihembuskan dari dasar tungku melalui *nozzle-nozzle* dan menembus tumpukan bed material sehingga batubara yang berada diatas bed material tersebut dapat melayang dan terbakar dalam ruang bakar [6].

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Unit 2 menggunakan *Boiler* yang menggunakan bahan bakar utama fosil yaitu batubara dan menggunakan teknologi pembakaran batubara dengan tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) *Boiler* yang lebih ramah lingkungan seperti pada gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Skema *Circulating Fluidized Bed* (CFB) *Boiler* PLTU

Komponen Utama *Boiler* CFB pada gambar 2.8 terdiri dari :

1. *Furnace* yang berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pembakaran bahan bakar batubara. Terdiri dari *Wall tube*.
2. *Cyclone* yang berfungsi untuk mensirkulasikan kembali material pembakaran dari *furnace* untuk dikembalikan ke

furnace. Disini juga terjadi proses pemisahan batubara yang belum terbakar dan bed material sisa pembakaran untuk disirkulasikan ke *furnace* dan *flue gas* untuk di teruskan ke *Electrostatic presipitator* (ESP) atau *backpass*. Terdiri dari *Cyclone*, *Sealpot*.

3. *Backpass* atau *heat recovery area* yang berfungsi sebagai ruang pemanfaatan kalor dari *flue gas*. Terdiri dari *Finishing Superheater*, *Finishing Superheater*, *Economizer* dan *Air Preheater*.

*Boiler* pada PLTU PT.PLN memiliki spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Spesifikasi Boiler pada PLTU PT PLN berdasarkan *performance test* 19 Februari 2017

Merek Pabrik	China Wastern Power Industrial Co. Ltd
Tipe	CFB (Circulating Fluidized Bed) Boiler
Parameter Utama	
Kapasitas Maksimum	120 ton/hour
<i>Main Steam Pressure</i>	8,34 Mpa
<i>Main Steam Temperature</i>	534 °C
<i>Feed Water Temperature</i>	215 °C
<i>Output Primary Air Preheater</i>	265,7 °C
<i>Output Secondary Air Preheater</i>	264,8 °C
Efisiensi Boiler	79,32 %
Konsumsi batubara	21.54 ton/hour
Nilai <i>Moisture</i> Batubara	36,67 %
Jenis Bahan Bakar	Lignite

### 2.3.1 Sirkulasi Batubara pada CFB Boiler PLTU

Batubara yang berada di *sponge coal silo* diteruskan menuju *coal feeder* yang berfungsi mengatur jumlah aliran batubara ke *furnace* (ruang bakar) *Boiler*. Pemanasan awal pada *Boiler* dilakukan dengan melakukan pembakaran menggunakan bahan bakar minyak *High Diesel Speed* (HSD) hingga mencapai suhu 593°C kemudian batubara mulai diumpankan. Ketika suhu telah mencapai 789°C, bahan bakar minyak HSD akan dinonaktifkan. Di dalam *furnace* batubara dicampur dengan bed material (pasir kuarsa, pasir kapur, dan lain-lain), dan udara sehingga terjadi pembakaran yang mengubah air yang ada di *waterwall* menjadi uap [6].

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. Material solid yang belum terbakar masuk kembali ke dalam bagian dalam *cyclone* menuju *sealpot* dan diinjeksikan kembali menuju ke *furnace*. *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. Sementara bed material dikumpulkan melalui *ash silo* dan dibawa menggunakan truk ke *ash yard*.

### 2.3.2 Sirkulasi Air dan Uap pada Boiler CFB PLTU

Pada sirkulasi air pada gambar 2.2 , air yang diambil dari sungai atau laut melalui *water intake* disemprotkan senyawa natrium hipoclorit (NaOCl) yang berfungsi untuk memabukkan atau melemahkan mikro organisme laut untuk menghindari terjadinya pengerakkan (*scaling*) pada pipa-pipa akibat perkembangbiakan mikro organisme laut kemudian dipompakan ke *Cooling Water (CW) pipe* melalui *circulating water pump*. Dari *CW Pipe* air sungai yang mengalir terbagi menjadi 2, sebagai suplai air di kondensor uap mengkodensasikan atau mengubah gas yang bertekanan tinggi menjadi air yang

bertekanan tinggi dan *demineralizer plant* yang berfungsi untuk menghilangkan kadar mineral yang terkandung dalam air tawar karena jika air masih mengandung mineral berarti konduktivitasnya tinggi sehingga dapat menyebabkan gaya gerak listrik induksi pada saat air melewati jalur perpipaan yang dapat menimbulkan korosi pada peralatan *Boiler*. Dari *demineralizer plant* air masuk melalui *Boiler Feed Pump* (BFP) dan langsung dialirkan menuju *economizer*.

Air yang masuk ke *economizer* langsung dialirkan ke *steam drum*. *Steam drum* berfungsi sebagai tempat dimana uap dan air ditampung kemudian akan didistribusikan ke masing-masing saluran yang berupa *tube-tube*. Air yang ada di *steam drum* turun ke *down comer* yaitu saluran turun yang akan mendistribusikan air dan menyalurkannya ke *waterwall tube* yang terletak di dalam *furnace*. Air di dalam *waterwall tube* dipanaskan sampai menjadi uap jenuh dan kemudian masuk kembali ke *steam drum* yang akan memisahkan air dan uap. Air akan masuk kembali menuju *down comer* sementara uap jenuh langsung dialirkan menuju *Primary Superheater* dan *Finishing Superheater* untuk dinaikan temperatur menggunakan *flue gas*. Keluaran dari *superheater* ini akan langsung masuk ke turbin. Uap bekas keluaran turbin akan dikembalikan menjadi air di kondensor.

### **2.3.3 Sirkulasi Udara dan Gas Buang pada CFB Boiler PLTU**

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.

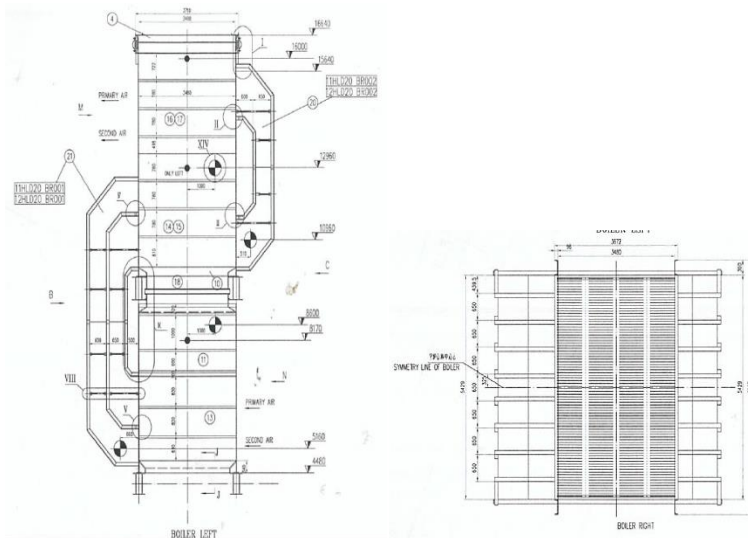
**Tabel 2.2** Temperatur *Flue Gas* hasil *performance test* 17 Februari 2017

<i>Flue Gas</i>	Temperatur (°C)
<i>Input Heat Recovery Area</i>	869,20
<i>Output Finishing Superheater</i>	575,70
<i>Output Primary Superheater</i>	508,30
<i>Output Economizer</i>	328,10
<i>Output Air Preheater</i>	202,30
<i>Output ESP</i>	187,10

## 2.4 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 [11]. 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* [16]. *Boiler* yang ada di PLTU Unit 2 menggunakan tipe *tube air preheater* yang cara kerjanya dibantu dengan *Primary Air Fan* dan *secondary Air Fan* yang berfungsi untuk menyerap udara yang ada di lingkungan. Udara tersebut lalu kemudian dialirkan melewati *tube air preheater* untuk dinaikan suhunya dengan memanfaatkan sisa kalor dari *flue gas* kemudian dialirkan menuju ruang pembakaran (*furnace*) yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



**Gambar 2.9** General Arrangement of air preheater [6]



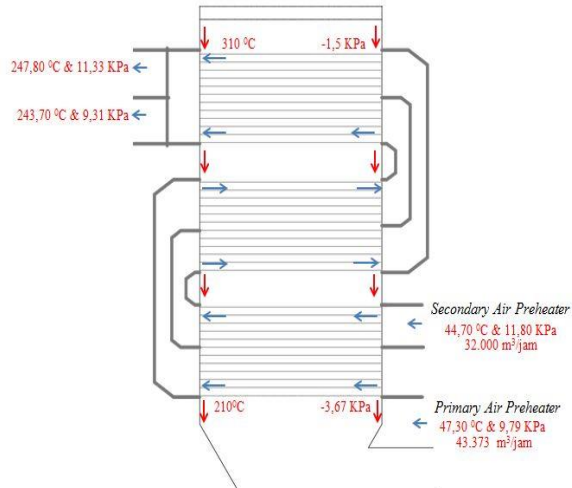
**Tabel 2.3** Spesifikasi *air preheater* yang digunakan pada PLTU Amurangng berdasarkan *performance test* 19 Februari 2017

Air Preheater			
Ukuran <i>Air preheater</i>		<i>length x width x height</i> (m)	5,935 x 3,48 x 10,7
No	Komponen		
1	<i>Tube box</i>	<i>length x width</i> (m)	2,5 x 2,6
2	<i>Tube Sheet</i>	<i>length x width</i>	2,28 x 3,48
3	<i>Manhole</i>		
4	Air Preheater		
	Primary Air Preheater		
	Primary Air Preheater	total	1886
	Input Air Preheater Temperature	C	48,6
	Input Air Preheater Temperature	Kpa	9,61
	Output Air Preheater Temperature	C	265,7
	Output Air Preheater Pressure	Kpa	9,23
	PA Fan A Flow	m3/h	19043
	PA Fan B Flow	m3/h	16791
	Secondary Air Preheater		
Secondary Air preheater	total	1312	

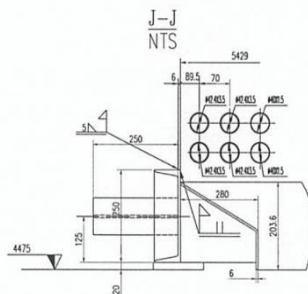
<i>Input Air Preheater Temperature</i>	C	44,7
<i>Input Air Preheater Pressure</i>	Kpa	11,33
<i>Output Air Preheater Temperature</i>	C	264,8
<i>Output Air Preheater Pressure</i>	Kpa	10,81
<i>Flow</i>	m <sup>3</sup> /h	32000

Pada gambar 2.10 udara primer berasal dari udara luar yang masuk ke dalam *primary air fan* kemudian udara dihembuskan menuju ke *tube primary air heater* tempat dimana pertukaran panas antara udara primer dan flue gas terjadi. Udara primer yang akan masuk menuju *tube primary air heater* masuk dengan temperatur 47,30°C. Setelah melewati *tube primary air heater* temperatur udara primer menjadi 243,70 °C kemudian udara primer yang telah panas masuk ke dalam bagian bawah furnace dan akan dihembuskan melalui *nozzle-nozzle* yang terletak dibagian bawah furnace yang berfungsi menjaga temperatur di furnace stabil dan sebagai udara pembakaran .

Udara sekunder berasal dari udara luar yang masuk ke dalam *secondary air fan* kemudian udara dihembuskan menuju ke *tube secondary air heater* tempat dimana pertukaran panas antara udara primer dan flue gas terjadi. Udara sekunder yang akan masuk menuju *tube secondary air heater* masuk dengan temperatur 44,7°C. Setelah melewati *tube secondary air heater* temperatur udara primer menjadi 246,80 °C kemudian udara sekunder yang telah panas masuk ke dalam bagian bawah furnace dan akan dihembuskan melalui *nozzle-nozzle* yang terletak dibagian bawah furnace yang berfungsi pada saat *startup burner* dengan menggunakan HSD.



**Gambar 2.10** Spesifikasi air preheater berdasarkan performance test 19 Februari 2017



**Gambar 2.11** General Arrangement of air preheater

**Tabel 2.4** Spesifikasi Tube Primary Air preheater dari General Arrangement of air preheater 2 of 2 PLTU

Primary Air Preheater		
Outside Diameter	mm	42,4
Inside Diameter	mm	35,4
Thickness	mm	3,5

## 2.5 Korosi

Pengertian korosi menurut NACE (*national Assosiation of Corrosion Engineer*) adalah perusakan logam karena interaksi dengan lingkungannya. Korosi merupakan fenomena alamiah yang tidak dapat dihentikan seluruhnya namun dapat dikendalikan. Selama manusia masih menggunakan logam sebagai bahan suatu komponen, selama itu pula korosi akan terus terjadi. Berbagai usaha dan upaya pun dilakukan untuk menanggulangi atau mengurangi laju korosi yang terjadi. Interaksi logam dan lingkungannya akan mengakibatkan berlangsungnya reaksi korosi yang menghasilkan produk korosi dan dapat melindungi logam dari serangan korosi[18].

Kerusakan suatu material biasanya diidentikan dengan perusakan akibat proses mekanik. Suatu benda atau material juga bisa dikatakan mengalami kerusakan diakrenakan terbentuknya produk korosi yang mengurangi massa dan dimensi benda tersebut. Hal ini dapat menyebabkan benda atau material tersebut tidak berfungsi seperti seharusnya, sehingga dapat dikatakan rusak[10].

Proses korosi berkaitan dengan energi bebas Gibbs. Nilai energi bebas Gibbs dapat ditentukan dengan persamaan 2.1 dan 2.2.

$$G = H - TS \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana : G = Energi bebas Gibbs

H = Entalpi

T = Temperatur

S = Entropi

Energi bebas Gibbs sulit diukur, namun dapat ditentukan melalui potensial oksida yang dimiliki material seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.2.

$$\Delta G = -nEF \dots \dots \dots (2.2)$$

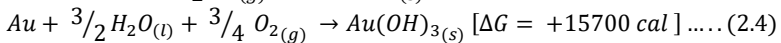
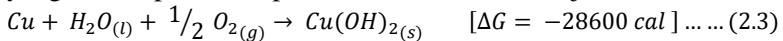
dimana:  $\Delta G$  = Perubahan energi bebas Gibbs (Joule)

n = Jumlah elektron per mol produk

F = Bilangan Faraday (96500 Coloumb/equivalent)

E = Potensial oksidasi (volt)

Berdasarkan persamaan 2.2, Perubahan energi bebas Gibbs dari reaktan menjadi produk yang memiliki nilai kurang dari nol ( $\Delta G < 0$ ) menunjukkan bahwa reaksi terjadi secara spontan. Apabila  $\Delta G > 0$  menunjukkan bahwa reaksi tersebut membutuhkan energi untuk berlangsung. Sedangkan reaksi yang memiliki  $\Delta G = 0$  menunjukkan bahwa reaksi terjadi secara setimbang dua arah yang berarti produk dapat bereaksi kembali menjadi reaktan.



Walaupun korosi merupakan reaksi spontan, bukan berarti hasil korosi (produk korosi) terjadi secara spontan, namun bertahap seperti proses. Reaksi spontan adalah reaksi yang tidak memerlukan gaya atau energi dari luar untuk terjadi [13].

## 2.6 Jenis Korosi

Berdasarkan lingkungan dimana reaksi korosi berlangsung korosi berlangsung, korosi dapat dibedakan menjadi dua macam, yakni korosi kering dan korosi basah.

### 2.6.1 Korosi Basah (*Wet Corrosion*)

Untuk terjadi proses korosi basah pada suatu logam dibutuhkan adanya beda potensial antara dua logam yang terhubung secara elektrolit dan elektrolit. Secara umum ada 4 syarat yang harus dipenuhi untuk terjadinya sebuah korosi basah, yaitu :

1. Anoda
  - Elektoda tempat terjadinya reaksi oksidasi (pelepasan elektron)
  - Elektroda yang menyerap anion dari elektrolit
2. Katoda
  - Elektroda tempat terjadinya reaksi reduksi (penangkapan elektron)
  - Elektroda yang menangkap kation dari elektrolit

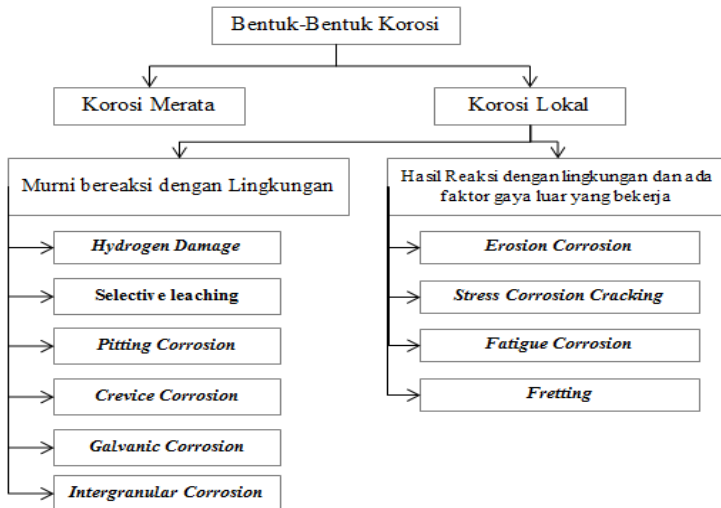
### 3. Larutan Elektrolit

Elektrolit adalah larutan yang memiliki ion-ion yang dapat bereaksi dengan elektroda.

### 4. Konduktor

Suatu media yang dapat menghantarkan aliran elektron.

Secara Umum korosi basah dapat dibedakan lagi menjadi beberapa jenis seperti pada gambar 2.8 [21].



**Gambar 2.12** Klasifikasi Bentuk-Bentuk Korosi Basah (*Wet Corrosion*) [21]

#### 2.6.1.1 *Uniform Corrosion* atau Korosi Merata

Korosi merata merupakan korosi yang terjadi di permukaan logam yang mengalami kontak langsung dengan media korosifnya. Korosi ini dapat mengurangi ketebalan benda kerja sehingga luas penampang menurun menyebabkan kemampuan menahan beban/gaya menurun, sedangkan beban yang sedang bekerja tetap. Korosi ini menyebabkan tegangan yang di terima pun menjadi meningkat melebihi batas kemampuan material hingga akhirnya benda kerja menjadi rusak.

Pengurangan atau penipisan pada *uniform corrosion* ini memiliki laju yang sama pada seluruh permukaan logam seperti pada gambar 2.9. Penyerangan jenis ini dapat dilihat hanya dengan *visual inspection* dan mudah diprediksi dibandingkan dengan penyerangan lokal. [9]



**Gambar 2.13** Skema penyerangan *uniform corrosion* [9]

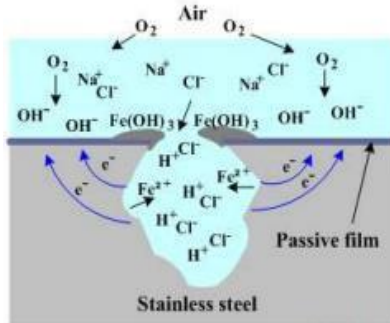
### 2.6.1.2 *Pitting Corrosion* atau korosi sumuran

*Pitting Corrosion* atau korosi sumuran merupakan korosi lokal yang terjadi pada suatu logam akibat penyerangan pada lapisan oksida yang merupakan produk korosi dari suatu logam yang melidungi logam tersebut. Lapisan oksida memiliki *properties* yang berbeda dengan logamnya. Jika dilihat dari sisi kerapatannya, lapisan oksida memiliki kerapatan yang lebih kecil dibandingkan dengan logamnya. Selain itu beberapa lapisan oksida memiliki ciri-ciri yang berpori. Dengan lapisan oksida yang berpori, logam tersebut memiliki kerentanan terdapat *pitting corrosion*. Jika suatu media korosif mengalir dan terjebak dalam pori-pori lapisan oksida tersebut maka hal tersebut dapat memulai proses *pitting corrosion* seperti gambar 2.15

Mekanisme terjadinya korosi celah yaitu terjadinya korosi merata. Kemudian ada celah yang memungkinkan untuk masuknya fluida. Didalam celah terjadi stagnasi fluida dan terjadi korosi merata yang memiliki reaksi anoda :  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  dan reaksi katoda :  $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{OH}^-$  kemudian terjadi defisit atau kekurangan oksigen pada daerah celah sehingga terjadi penipisan oksigen yang menyebabkan pembentukan  $\text{OH}^-$  terhambat.

Akibatnya terjadi kekurangan ion negatif sehingga kelebihan ion positif  $\text{Fe}^{2+}$  yang menarik ion negatif dari luar celah

(Cl<sup>-</sup>) berdifusi masuk kedalam celah untuk menyeimbangkan muatan  $2\text{Cl}^- + 2\text{Fe}^{2+} \rightarrow 2\text{FeCl}$ . Kemudian  $2\text{FeCl}$  bereaksi dengan air :  $\text{FeCl} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCl} + \text{Fe}(\text{OH})_3$  dimana  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  merupakan produk korosi. HCl dalam air terurai menjadi H<sup>+</sup> dan Cl<sup>-</sup> yang kemudian ion Cl<sup>-</sup> kembali mengikat Fe<sup>2+</sup> kembali.

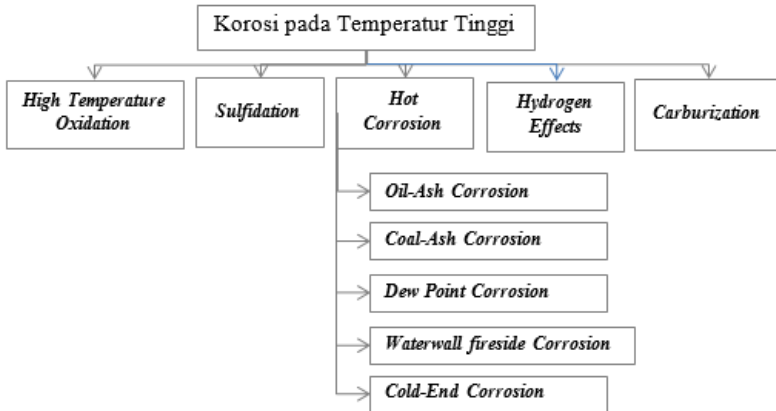


**Gambar 2.14** Skema Penyerangan *pitting corrosion* [21]

### 2.6.2 Korosi Kering (*Dry Corrosion*)

Korosi kering dapat didefinisikan sebagai fenomena korosi yang berlangsung pada media yang tidak melibatkan liquid sebagai elektrolitnya. Korosi kering biasa terjadi pada material yang-material yang beroperasi pada temperatur tinggi seperti *Boiler, furnace, dan burner*. Oleh karena itu, korosi kering juga bisa disebut sebagai korosi pada temperatur tinggi (*high temperature corrosion*). Berikut ini adalah beberapa bentuk korosi yang sering terjadi pada *Boiler* pada gambar 2.15 [21].





**Gambar 2.15** Korosi pada temperatur tinggi [21]

### 2.6.2.1 Oksidasi (*Oxidation*)

Proses oksidasi atau yang lebih sering dikenal dengan *high temperature oxidation* adalah proses oksidasi pada temperatur tinggi yang menghasilkan lapisan oksida, dimana lapisan oksida ini menempel pada permukaan logam. Lapisan oksida yang dihasilkan ada yang bersifat protektif namun ada pula yang bersifat tidak protektif. Lapisan oksida yang bersifat protektif berfungsi untuk melindungi logam dari pengaruh media korosif. Adapun pelindung yang sering digunakan pada dunia industri, seperti  $\text{Fe}_3\text{O}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{SiO}_2$ .

Adapun kriteria-kriteria yang harus dimiliki oleh lapisan oksida pelindung adalah :

1. Memiliki temperatur cair yang tinggi
2. Memiliki kelekatan yang bagus pada logam yang dilindungi
3. Memiliki stabilitas termodinamika yang baik
4. Memiliki *Pilling-Bedworth* rasio  $\geq 1$

Persyaratan diatas harus dimiliki lapisan oksida agar dapat bersifat protektif, sehingga tidak mengakibatkan kerusakan pada logam yang dilindunginya. Pada beberapa kasus yang sering

terjadi di dunia industri, kerusakan lapisan oksida pelindung dapat disebabkan oleh beberapa hal berikut :

1. Adanya siklus termal yang menyebabkan lapisan oksida pelindung terkelupas
2. Adanya serangan kimia, yaitu kerusakan karena terjadinya reaksi di bawah endapan yang menempel pada permukaan logam
3. Adanya peristiwa mekanik, seperti abrasi dan impact
4. Adanya degradasi pada lapisan pelindung, terutama pada saat  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  teroksidasi menjadi  $\text{CrO}_3$  yang mudah menguap

#### 2.6.2.2 Sulfidasi (*Sulfidation*)

Sulfidasi adalah proses berdifusinya sulfur pada logam atau paduan yang dapat membentuk sulfida. Apabila pada logam atau paduan tersebut mengandung kromium, maka sulfur akan bereaksi dengan kromium sehingga membentuk kromium sulfida. [2]. Apabila pada logam atau paduan tersebut mengandung khromium, maka sulfur bereaksi dengan khromium sehingga membentuk khromium sulfida. Akibat adanya reaksi antara sulfur dengan kromium tersebut, logam atau paduan menjadi kekurangan khromium sehingga mudah teroksidasi. Reaksi oksidasi tersebut menghasilkan lapisan oksida yang tidak murni terbentuk dari kromium, namun sudah mengandung sulfida. Jika distribusi sulfida pada lapisan logam terjadi secara kontinyu, lapisan oksida tidak protektif yang menempel pada permukaan logam akan menyebabkan logam tersebut mengalami kerusakan.

Serangan material yang korosif harus diminimalkan dan dan ketidakmurnian (*impurities*) seperti  $\text{SO}_x$  yang harus dikontrol. Selama pembakaran dan di sepanjang jalur *flue gas*,  $\text{SO}_3$  terbentuk menjadi  $\text{SO}_2$  dalam reaksi :



Parameter yang berpengaruh secara signifikan terhadap konsentrasi  $\text{SO}_3$ , yaitu :

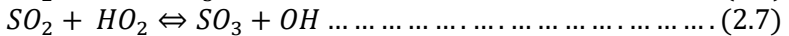
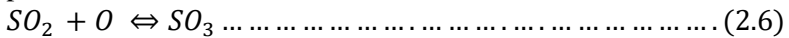
- Kandungan sulfur pada batubara
- Tekanan parsial oksigen
- Senyawa abu seperti  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Kandungan sulfur pada batubara mempengaruhi tekanan  $SO_2$  secara parsial dan karenanya secara tidak langsung kadar  $SO_3$  dan merupakan parameter terpenting yang mempengaruhi konsentrasi  $SO_3$  dalam gas buang. Kandungan sulfur yang lebih tinggi menyebabkan  $SO_2$  yang lebih tinggi dan menyebabkan konsentrasi  $SO_3$  yang lebih tinggi. [15].

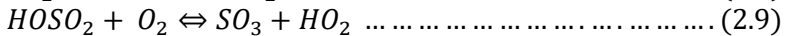
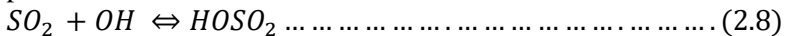
### 2.6.2.3 Dew Point Corrosion

*Dew point corrosion* adalah korosi yang disebabkan oleh adanya endapan sulfur yang mengembun dan memiliki pH asam rendah. Reaksi korosif terjadi karena adanya sulfur yang mereduksi permukaan logam pada saat temperatur logam pada *Boiler* lebih rendah daripada titik embun dari sulfur tersebut [15]. Kecenderungan untuk memanfaatkan kalor dari gas buang cukup tinggi. Hal yang ditakutkan ketika menurunkan temperatur flue gas adalah terjadinya titik embun asam sulfat. *Low temperature corrosion* diasumsikan terjadi karena kondensasi asam sulfat. Oleh karena itu temperature flue gas dijaga tetap stabil diatas titik embun suatu asam[Vainio Emil, 2014].

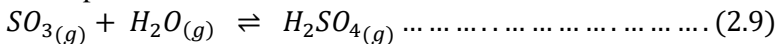
Mekanisme terjadinya yaitu, pada saat pembakaran sebagian kecil  $SO_2$  yang terbentuk dioksidasi menjadi  $SO_3$  seperti pada reaksi 2.6 dan 2.7:



Sulfur trioksida juga dapat dibentuk dengan adanya OH dan  $HOSO_2$  sebagai perantara reaksi seperti pada persamaan 2.8 dan persamaan 2.9.



Ketika temperature gas buang turun dibawah  $500^{\circ}C$ ,  $SO_3$  mulai bereaksi dengan uap air untuk membentuk asam sulfat dalam bentuk gas. Pada temperatur  $200^{\circ}C$ , hampir semua  $SO_3$  telah diubah menjadi  $H_2SO_4$  dibawah kondisi flue gas dan mencapai titik embun asam sulfat.



Dibawah titik embun asam sulfat, asam sulfat terbentuk dalam keadaan gas dan mengembun di permukaan material. Korosi Suhu rendah (*low temperature corrosion*) yang parah terjadi disekitar saluran flue gas dalam hal ini pada *heat recovery area* yang meliputi *superheater*, *economizer* dan *air preheater* ketika temperatur gas buang lebih rendah dari titik embun asam sulfat. Dengan menggunakan persamaan Verhoff dan Banchero, titik embun asam sulfat dapat dihitung, melalui persamaan

$$T_{DEW} = \frac{1000}{[2,275 - 0,029 \ln(PH_2O) - 0,0858 \ln(PSO_3) + 0,0062 \ln(PH_2O) \ln(PSO_3)]}$$

Dimana  $T_{DEW}$  adalah temperatur titik embun asam sulfat dalam satuan K dan tekanan parsial ( $PSO_3$  dan  $PH_2O$ ) dalam mmHg. Korosi karena hal ini bisa dihindari dengan menjaga temperatur flue gas disulurh permukaan komponen yang dilewatinya diatas titik embun asam atau menggunakan baja tahan asam [22]

## 2.7 Produk Korosi

Reaksi korosi akan menghasilkan prosuk korosi (deposit) yang memiliki penampakan yang berbeda-beda bergantung pada jenis reaksi yang terjadi. Produk korosi dapat membentuk suatu lapisan yang bisa melindungi material agar tidak kontak dengan lingkungannya, sehingga tidak terjadi reaksi korosi. Beberapa contoh dari produk korosi adalah :

- *Ferri Oksida/maghemite* ( $Fe_2O_3$ ) yang merupakan produk korosi dari reaksi antara *austenitic steel* dengan oksigen. Produk korosi ini memiliki penampakan dengan warna merah kecoklatan.
- *Besi Sulfida* ( $FeS$ ), yang merupakan produk korosi dari reaksi antara *ferrous* dengan sulfur. Produk korosi ini memiliki penampakan dengan warna abu-abu metalik.
- *Magnetite* ( $Fe_3O_4$ ), yang merupakan produk korosi dari reaksi antara *ferrous* dengan oksigen. Produk korosi ini memiliki penampakan dengan warna hitam

## 2.8 Tegangan Akibat Adanya Perbedaan Temperatur

Pemanasan atau pendinginan yang tidak equilibrium pada suatu material akan menyebabkan terjadinya perbedaan temperatur antara bagian permukaan dan dalam permukaan. Pada pemanasan, temperatur bagian permukaan akan lebih dulu meningkat, sehingga cenderung memuai, namun pada bagian dalam permukaan akan cenderung menahan pemuaian tersebut karena temperaturnya lebih rendah. Hal ini menyebabkan bagian permukaan menerima tegangan tekan dan bagian dalam permukaan menerima tegangan tarik. Pada pendinginan, bagian permukaan akan mengalami penurunan temperatur yang cenderung lebih cepat dibandingkan di dalam permukaan, sehingga terjadi penyusutan yang lebih besar pada bagian permukaan. Hal ini menyebabkan bagian permukaan mengalami tegangan tarik sedangkan bagian dalam permukaan akan mengalami tegangan tekan. Permukaan material akan mengalami retak (*crack*) ataupun pecah (*rupture*) yang disebabkan oleh perbedaan tegangan pada kedua bagian tersebut yang disertai dengan temperatur operasi yang tinggi[2].

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Analisa Kegagalan

Kegagalan adalah ketidakmampuan suatu *part* atau komponen untuk dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Kondisi umum suatu kerusakan apabila jika tidak dapat dioperasikan lagi, masih dapat beroperasi tetapi tidak berfungsi semestinya, dan kerusakan serius atau tidak aman untuk digunakan.

Dalam penelitian analisa kegagalan suatu material diperlukan beberapa langkah untuk dapat mencapai tujuan dari penelitian tersebut. Walaupun tiap kasus kegagalan mempunyai karakteristik yang berbeda namun secara umum langkah investigasi yang dilakukan dapat dikatakan seragam, namun hasil dan detail metodologi disesuaikan dengan kasus yang dihadapi. Adapun aspek-aspek yang harus dimiliki seseorang dalam melakukan serangkaian penelitian hasil yang maksimal adalah :

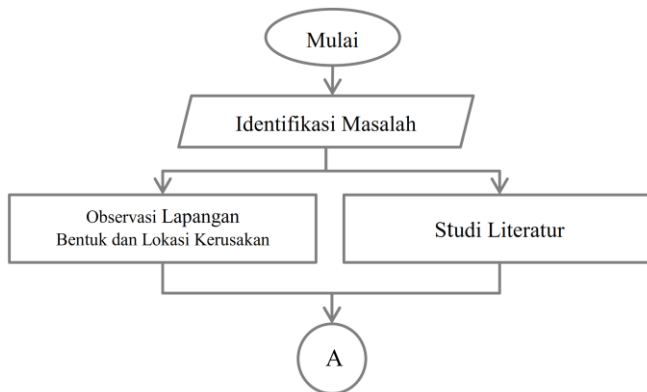
**Tabel 3.1** Aspek-aspek yang harus dilakukan saat melakukan penelitian analisis kegagalan

No	ASPEK	KETERANGAN
1.	Alat pembesar	Pemeriksaan visual komponen subyek secara rinci terhadap tanda atau bercak pada material termasuk karena korosi dan mekanik
2.	<i>Macro fractography</i>	Melengkapi pemahaman tentang kronologi peristiwa kegagalan dan informasi tentang tegangan dan orientasinya
3.	Pengamatan visual kerusakan lingkungan	Memperoleh petunjuk penting tentang faktor lingkungan yang merusak (korosif) dari produk korosi yang terbentuk

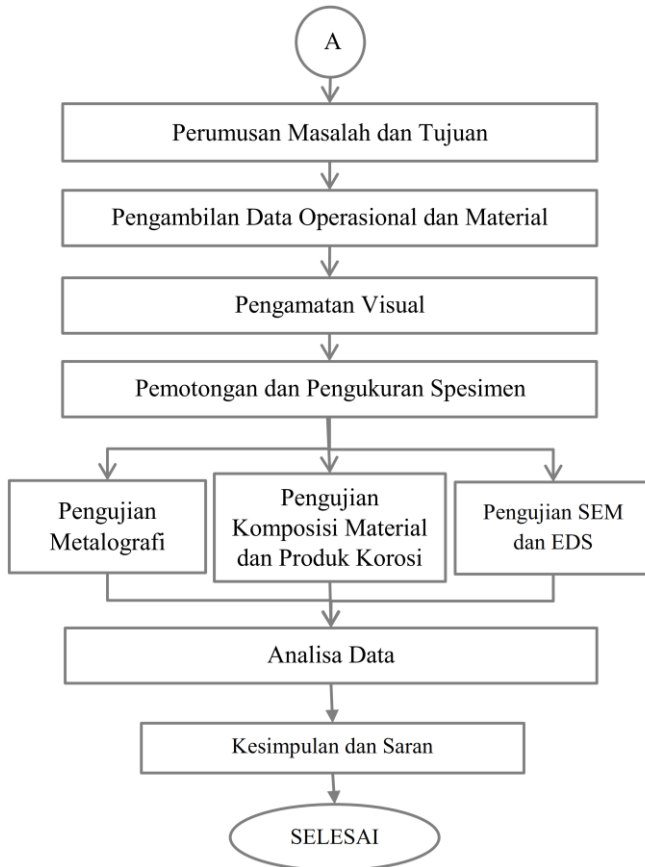
	(termasuk korosi)	
4.	Pengambilan gambar makro ( <i>close up</i> )	Mendokumentasikan tempilan kerusakan komponen sebelum dilakukan pengujian merusak
5.	<i>Micro fractography</i>	Untuk mengetahui kerusakan yang terjadi pada <i>tube</i> dengan pengujian <i>scanning electron microscope</i> (SEM) dan komposisi kimia penyusun komponen dengan pengujian <i>energy dispersive spectroscopy</i> (EDS)
6.	Metalografi	Mengevaluasi struktur mikro yang dimiliki oleh komponen
7.	Analisa komposisi	Menentukan unsur apa saja yang terkandung pada komponen yang diamati

### 3.2 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini secara singkat dapat digambarkan melalui diagram alir penelitian seperti dibawah ini.







**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

### 3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan untuk melakukan penilitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Kamera Digital

Merupakan alat yang digunakan untuk melakukan pengamatan visual yang dilakukan pada benda kerja sekaligus mendokumentasikan bentuk benda kerja

2. Penggaris dan Jangka Sorong  
Penggaris yang digunakan pada penelitian ini memiliki ketelitian 0,1 mm, sedangkan jangka sorong yang digunakan memiliki ketelitian 0,01 mm. Penggaris dan jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi panjang dan diameter dari material yang akan menjadi benda kerja serta mengukur dimensi lain yang dianggap perlu.
3. Mesin Potong *Jigsaw*  
Merupakan mesin potong otomatis dengan merk CPSG model G7016 yang digunakan untuk memotong benda kerja sesuai dimensi yang diinginkan dan telah diukur sebelumnya. Cara kerjanya seperti gergaji besi yang biasa digunakan secara manual.
4. Perangkat *Mounting*  
Proses ini menggunakan *polyester* dan katalis yang berguna untuk mempercepat proses pembekuan dari *polyester*. Serta diperlukan gelas ukur, pengaduk, wadah pengaduk, pipa PVC sebagai cetakan, plastisin, dan keramik untuk menunjang proses *mounting* spesimen benda kerja.
5. Perangkat *etching*  
Proses ini menggunakan larutan nital 2% yang terdiri dari 2 ml HNO<sub>3</sub> ditambah 98 ml etanol. Diperlukan gelas ukur, pipet, wadah kaca, *hair dryer*, dan aquades untuk menunjang proses etsa spesimen benda kerja.
6. Perangkat *Grinding* dan *Polishing*  
Spesimen benda kerja menggunakan mesin Grinder Polisher Metkon GRIPO 300-IV dengan kertas amplas grit 80, 120, 240, 320, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, dan 2000. Sedangkan proses *polishing* menggunakan mesin yang sama seperti proses *grinding* dengan menggunakan kain beludru dan serbuk alumina yang dicampurkan dengan air.



**Gambar 3.2** Grinder – Polisher GRIPO 300-1V

7. *Spectrometer ARC-Met 8000*

Merupakan alat yang digunakan untuk pengujian komposisi kimia agar mengetahui kandungan komposisi kimia serta unsur-unsurnya secara *kuantitatif* yang terdapat pada benda kerja yang akan diamati.

8. Mesin Uji Komposisi Kimia XRD dan AAS

Mesin XRD digunakan untuk mengetahui produk korosi yang telah diekstrak pada spesimen secara akurat. Sedangkan mesin AAS digunakan untuk mengetahui % massa dalam konsentrasi yang kecil.

9. Mikroskop Optis *digital olimpus BX60M*

Merupakan alat yang digunakan untuk melakukan pengamatan struktur mikro dan melihat kontur kerusakan serta pengurangan ketebalan pada benda kerja



**Gambar 3.3** Mikroskop Optis *digital olimpus BX60M*

10. Mesin *Scanning Electron Microscope*

Merupakan alat yang digunakan untuk melihat lapisan yang terdapat pada permukaan spesimen.

### 3.4 Langkah-Langkah Penelitian

Dalam melaksanakan penelitian analisis kegagalan ini, serangkaian kegiatan penelitian dilakukan menjadi beberapa tahapan agar penelitian ini berjalan dengan baik dan sistematis. Adapun tahapan-tahapan yang ada pada penelitian analisis kegagalan ini adalah sebagai berikut :

#### 1. Identifikasi Masalah

Setelah dilakukan pemeriksaan terhadap *Circulating Fluidized Bed Boiler* ditemukan adanya kerusakan pada *tube air preheater*. Kerusakan ini terlihat dari adanya perubahan warna serta adanya penurunan ketebalan dikarenakan korosi seluruh permukaan dan adanya kegagalan berupa lubang dan pecah pada *tube*.

#### 2. Observasi Lapangan

Observasi lapangan merupakan kegiatan yang bertujuan untuk mengumpulkan data-data awal berupa kondisi aktual yang terjadi dilapangan meliputi lokasi, fungsi, cara kerja serta foto dari benda kerja yang diteliti untuk membantu merumuskan masalah pada penelitian analisis kegagalan pada *tube air preheater* pada *circulating fluidized bed Boiler*.

#### 3. Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses pencarian informasi terhadap buku dan jurnal yang terkait dengan kasus kegagalan serupa. Hal ini termasuk mengumpulkan materi kuliah pendukung untuk digunakan sebagai referensi atau pustaka pada penelitian. Studi literatur dilakukan terus menerus hingga penelitian selesai.

#### 4. Perumusan Masalah dan Tujuan

Setelah melakukan tahapan-tahapan diatas maka *tube* yang digunakan pada *Circulating fluidized Bed Boiler* ditetapkan sebagai objek penelitian ini. Penelitian ini

bertujuan untuk mencari penyebab dan mekanisme terjadinya kegagalan pada *tube* tersebut. Perumusan masalah disertai dengan penetapan Batasan masalah untuk memperjelas lingkup penelitian.

#### **5. Pengambilan Data Operasional dan Material**

Pengambilan data operasional dan material adalah tahapan yang dilakukan dalam rangka untuk memperoleh informasi atau data-data yang berhubungan dengan kegagalan yang terjadi pada *tube*. Pengambilan data dilakukan dengan mencari rincian sebagai berikut :

- a. Kondisi Operasi, meliputi semua data yang berkaitan dengan pengoperasian *tube* didalam *Boiler*, antara lain : temperature, tekanan, dan letak, dan kapasitas pengoperasian.
- b. Media yang mengalami kontak langsung dengan bagian *tube* yang mengalami kegagalan. Media dalam dan luar *tube* meliputi wujud/bentuk fluida yang mengalir di dalam dan luar *tube* serta pengaruhnya terhadap sistem.
- c. Material *tube* yang meliputi ukuran, bahan, properties, dan dimensi material.

#### **6. Pengamatan Visual**

Pengamatan visual dilakukan pada spesimen dengan tujuan untuk menemukan letak cacat yang terlihat tanpa alat bantu yang kemudian menggunakan bantuan kamera digital untuk mendapatkan bentuk dan penampakan kerusakan pada bagian dalam dan luar *tube* meliputi bentuk dan warna kerusakan. Kemudian spesimen dipotong ke dalam beberapa sampel.

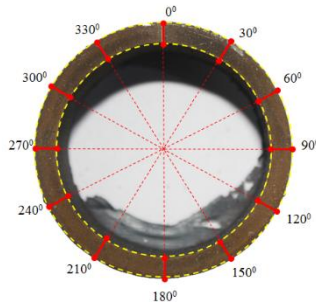
#### **7. Pemotongan dan Pengukuran Dimensi**

Pengukuran dimensi dilakukan untuk mengetahui ukuran serta penipisan yang terjadi pada specimen secara akurat dan menyeluruh pada permukaan pipa. Pemotongan dilakukan dengan cara memotong specimen menjadi beberapa bagian dengan gergaji tangan sepanjang 10 mm

di beberapa bagian spesimen seperti pada gambar 3.4, kemudian sisanya dipotong menjadi dua bagian untuk melihat bagian dalam *tube*. Kemudian potongan-potongan spesimen tersebut akan dilakukan pengukuran ketebalan dengan menggunakan jangka sorong dari sudut  $0^{\circ}$  hingga  $330^{\circ}$ . Hasil pengukuran kemudian dicatat dan dijadikan dalam satu file excel untuk diolah menjadi data ukuran dari spesimen.



**Gambar 3.4** Bagian-bagian pemotongan pada spesimen



**Gambar 3.5** Pengukuran dimensi spesimen

## 8. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi bertujuan untuk mengetahui struktur mikro yang terdapat pada material. Pemeriksaan dilakukan untuk memeriksa ada tidaknya kerusakan struktur mikro dengan mengetahui bentuk dan profil struktur mikro dari penampang membujur dan melintang spesimen. Pengujian metalografi diawali dengan beberapa persiapan yang meliputi *etching* menggunakan *etchant* atau *etching reagent* yaitu larutan nital dengan konsentrasi

2%. Setelah itu sampel spesimen akan dilihat dengan mikroskop elektronik dengan perbesaran 100 hingga 1000 untuk menganalisa mikro struktur.

**9. Pengujian Komposisi Kimia dan Produk Korosi**

Pengujian komposisi kimia erat kaitannya dengan analisa kegagalan. Hal ini dilakukan untuk membedakan komposisi kimia material yang masih baik dengan material yang sudah mengalami kegagalan. Pengujian komposisi kimia menggunakan mesin *Optical Emission Spectrofotometer*. Pengujian produk korosi dilakukan untuk mengetahui produk korosi yang ada pada spesimen dengan cara mengekstrak produk korosi dengan menggunakan amplas dengan *grid* 240 kemudian diuji dengan menggunakan *X-Ray Powder Diffraction*.

**10. Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)**

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui komposisi dan informasi topografi, morfologi dan komposisi suatu material. Topografi digunakan untuk menganalisa permukaan dan tekstur (kekerasan dan reflektivitas). Morfologi digunakan untuk menganalisa bentuk dan ukuran dari benda sampel. Dan pengujian komposisi suatu material digunakan untuk menganalisa komposisi dari permukaan benda secara kuantitatif dan kualitatif.

**11. Pengujian Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)**

Pengujian EDS dilakukan dengan cara menembakan Sinar X ke posisi yang ingin diamati komposisinya. Setelah ditembakkan pada posisi yang diinginkan maka akan muncul puncak – puncak tertentu yang mewakili suatu unsur yang terkandung. EDS dapat membuat elemental mapping (pemetaan elemen) dengan memberikan warna berbeda – beda dari masing – masing elemen di permukaan bahan serta untuk menganalisa secara kuantitatif dari persentase masing – masing elemen.

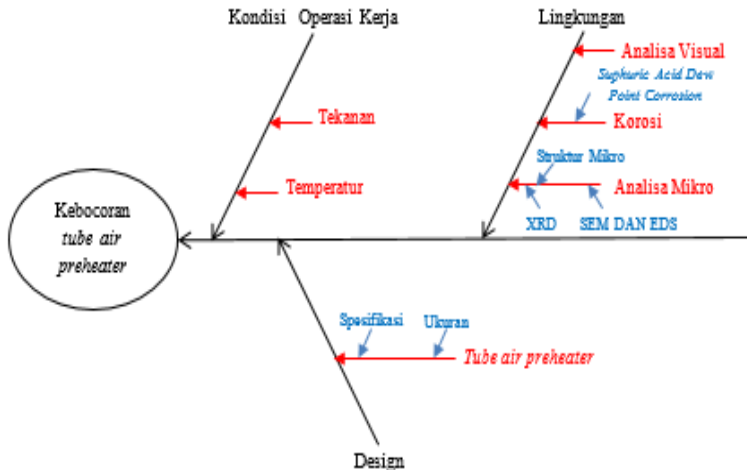
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB IV ANALISA DATA

### 4.1 Cause and Effect Diagram atau Fishbone Diagram

Cause and effect diagram atau fishbone diagram adalah salah satu metode untuk menganalisa penyebab dari sebuah permasalahan. Pada penelitian analisis kegagalan air preheater pada circulating fluidized bed Boiler digunakan fishbone diagram untuk mengidentifikasi dan mengorganisasi penyebab-penyebab dari permasalahan yang ada seperti pada gambar 4.1.

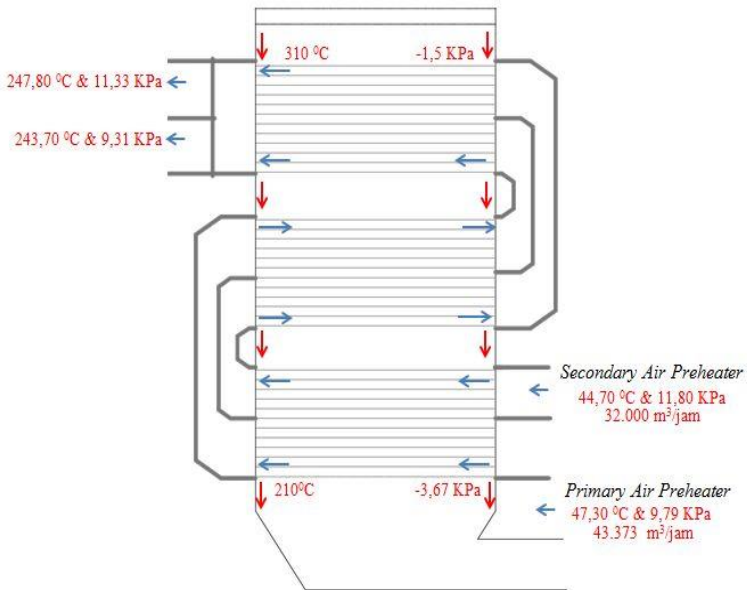


Gambar 4.1 fishbone diagram kebocoran tube air preheater

### 4.2 Kondisi Operasi Kerja Air Preheater pada Circulating Fluidized Bed Boiler

Telah dilakukan performance test pada circulating fluidized bed (CFB) Boiler yang dilakukan oleh PT. PJB Services pada tanggal 19 Februari 2017. Data dibawah merupakan data hasil komisioning yang telah dilakukan dapat terlihat bahwa temperatur udara yang masuk ke air preheater sebesar 47,3 °C dan udara yang keluar setelah melalui air preheater adalah

243,70 °C. Data operasi kerja *air preheater* dapat dilihat pada gambar 4.2.

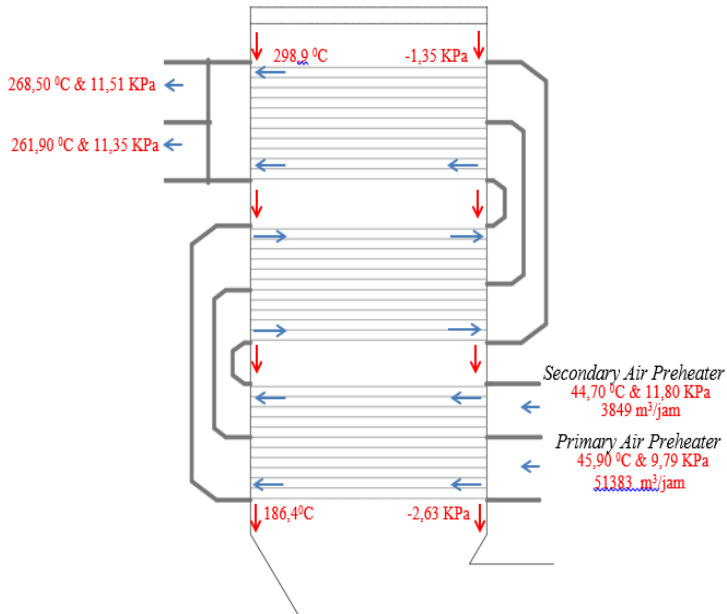


**Gambar 4.2** Hasil komisioning tanggal 19 Feb 2017

Gambar 4.2 merupakan hasil dari *performance test air preheater* setelah komisioning yang dilakukan pada tanggal 19 Februari 2017 untuk mengetahui apakah sistem dari *Boiler* masih beroperasi sesuai dengan desain yang telah dibuat. Pada tanggal 21 Juli 2017 – 3 Januari 2018 ditemukan kebocoran *tube primary air preheater* pada CFB *Boiler* dengan total 703 *tube* dan 334 *tube* dari t. Sehingga dilakukan perbaikan kebocoran *tube air preheater* pada tanggal 3-18 Januari 2018 dan didapatkan hasil seperti gambar 4.3.

Dari data yang telah diperoleh melalui proses komisioning pada tanggal 19 Februari 2018 seperti pada gambar 4.2 kemudian dibandingkan dengan data yang didapatkan pada saat *air preheater* mengalami kebocoran pada tanggal 3 Januari

2018. Didapatkan bahwa terjadi penurunan temperature dari *flue gas* dikarenakan aliran udara masuk melalui *secondary* dan *secondary air preheater* tidak sesuai dengan desain.



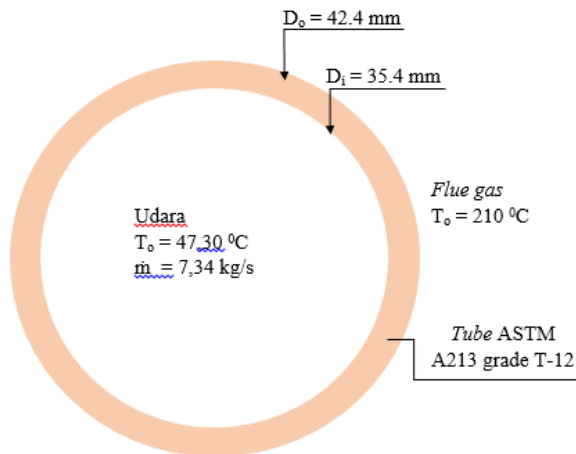
**Gambar 4.3** Performance air preheater saat ditemukan kebocoran dilihat dari monitor *distributed control system* (DCS)

Aliran yang masuk melalui *primary* dan *secondary air preheater* yaitu 51383 m<sup>3</sup>/h dan 3849 m<sup>3</sup>/h, sedangkan aliran yang dibutuhkan sebesar 43.374 m<sup>3</sup>/h dan 32.000 m<sup>3</sup>/h. Dikarenakan udara dari *primary air* dan *secondary air fan* tidak tercapai maka menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna didalam *furnace*. Pembakaran yang tidak sempurna pada *furnace* menyebabkan teperatur pada *Boiler* mengalami penurunan. Serta kecepatan udara input *secondary air preheater* menurun sehingga temperature *secondary air preheater* meningkat yang

menyebabkan meningkatnya perpindahan panas secara konveksi kearah *primary air preheater*. Dikarenakan hal tersebut, pemanasan udara pada *primary air preheater* emningkat dan dapat dilihat pada temperatur *output* dari udara *primary air preheater*.

### 4.3 Analisis Temperatur Material Tube pada Air Preheater

Untuk menganalisis temperatur *tube* saat operasi dan saat terjadinya kegagalan. Untuk mengetahui temperatur *tube* saat operasi dilakukan analisis perpindahan panas dengan pendekatan *Finite-Difference* dengan asumsi perpindahan panas terjadi secara dua dimensi dan pada keadaan *steady*. Adapun skema analisis yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.4, sehingga :



**Gambar 4.4** Skema perpindahan pannaas

Asumsi yang digunakan untuk mempermudah perhitungan adalah sebagai berikut:

1. *Steady state, two-dimensional conduction*
2. *Steady state natural convection* pada *flue gas* di *outer lance pipe*

3. *Steady state force convection* pada *water vapor* di *inner lance pipe*
4. Geometri *circular tube* didekati dengan *square channel*
5. Properti *flue gas* didekati dengan properti udara
6. *Constant properties*
7.  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

Analisis temperatur *lance tube* dengan menggunakan metode *Finite-Difference* membutuhkan data berupa koefisien konveksi *outer lance tube*,  $h_a$ , koefisien konveksi *inner lance tube*,  $h_b$ , dan koefisien konduksi dinding *lance tube*,  $k$ . Nilai dapat diperoleh dari tabel A.1 *textbook Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7<sup>th</sup> edition by Incropera et al.* Nilai  $h_a$  dan  $h_b$  diperoleh dari perhitungan berikut.

- Mencari nilai  $h_a$  pada *outer tube air preheater*

Properti yang digunakan berdasarkan sebagian tabel A.4 *Incropera et al*

**Tabel 4.1** Properti perhitungan nilai  $h_a$  pada *outer tube air preheater*

Properti berdasarkan $T_f = \frac{T_a + T_s}{2}$	Nilai
$T_s$ (asumsi awal)	128,65 °C / 401,65 K
$T_a$	210 °C / 483 K
$\beta$	$\frac{1}{T_a} \text{ K}^{-1}$
$\nu$	$36,614 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
$k_a$	$39,544 \times 10^{-3} \text{ W/mK}$
$Pr$	0,68468

Pada kasus *natural convection* sangat penting untuk mengetahui nilai *Reyleigh number* ( $Ra$ ). Nilai  $Ra$  dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$Ra = Gr \times Pr$$

$$Ra = \frac{g\beta (T_a - T_s) D_o}{\nu} \times Pr$$

$$Ra = \frac{9,8 \frac{1}{483} (483 - 401,65) 42,4 \times 10^{-3}}{36,614 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \times 0,68468$$

$$Ra = 1308,708$$

Ra = 1308,708 mengindikasikan aliran bersifat laminar sehingga untuk memperoleh *Nusselt number* (Nu) dengan geometri sesuai skema adalah sebagai berikut :

$$Nu = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \times 1308,708^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{0,68468} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 2,757$$

Nilai  $h_a$  dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$ha = \frac{Nu \times ka}{Do} = \frac{2,757 \times 39,544 \times 10^{-3}}{42,4 \times 10^{-3}} = 2,57 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Jadi nilai *koeffisien konveksi flue gas* pada bagian *outer tube air preheater* yaitu sebesar 2,57 W/m<sup>2</sup>K

- Mencari nilai  $h_b$  pada *inner tube air preheater*

Properti yang digunakan berdasarkan sebagian tabel A.4 *Incopera et al*

**Tabel 4.2** Properti perhitungan nilai  $h_b$  pada *outer tube air preheater*

Properti berdasarkan	Nilai
$Tf = \frac{Tb+Ts}{2}$	

Tb	47,30 °C / 320,3 K
$\rho$	0.0884838 kg/m <sup>3</sup>
k <sub>b</sub>	33,567 x 10 <sup>-3</sup> W/mK
$\mu$	23,13 x 10 <sup>-6</sup> N.s/m <sup>2</sup>
Pr	0,69846

Pada kasus *force convection* sangat untuk mengetahui nilai *reynold number* (Re). Nilai Re dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$Re = \frac{p v D}{\mu} = \frac{p \frac{\dot{m}}{p A} D}{\mu} = \frac{\dot{m} D}{A \mu}$$

$$Re = \frac{\frac{\dot{m}}{A} D}{\mu} = \frac{\frac{0,0016276}{\pi/4(35,4 \times 10^{-3})^2} 35,4 \times 10^{-3}}{23,13 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 2532,2069$$

Re = 2532,2096 mengindikasikan bersifat turbulen pada pipa sehingga memperoleh *Nusselt number* (Nu) dengan geometri sesuai skema adalah sebagai berikut :

$$Nu = 0,0243 Re^{4/5} Pr^{0,4}$$

$$Nu = 0,0243 14521612,51^{4/5} 0,7042^{0,4}$$

$$Nu = 11331,74$$

Nilai h<sub>b</sub> dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$hb = \frac{Nu \times kb}{Db} = \frac{11331,74 \times 27,860 \times 10^{-3}}{35,4 \times 10^{-3}}$$

$$hb = 8,9 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Setelah menghitung nilai koefisien konveksi pada sisi luar, h<sub>a</sub>, dan sisi dalam *tube air preheat*, maka dilakukan perhitungan suhu material *tube air preheater* dengan metode *Finite-Difference*. Adapun metode tersebut dijelaskan sebagai berikut :

210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
122	118	116	115	114	113	113	113	113	113	113	113	113
102	98	95	94	93	93	93	93	93	93	93	93	93
78	75	74	73	73	72	72	72	72	72	72	72	72
45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45

**Gambar 4.5** Hasil Perhitungan Suhu Material pada Penampang 1/3 Bagian Lance Tube dengan metode *finite Difference*

Pada Analisa *finite difference* suhu kerja material dihitung berdasarkan suhu titik-titik disekitarnya. Setiap titik yang dianalisa dihitung menggunakan persamaan yang sesuai dengan metode perpindahan panasnya. Model perpindahan panas pada suatu titik dapat dilihat pada tabel rangkuman persamaan *finite difference* pada suatu titik sesuai **tabel 4.** Pada analisis ini, bentuk *circular tube* didekati dengan menggunakan *square channel*.

210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45

Keterangan :

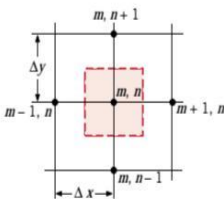
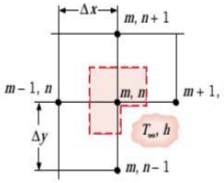
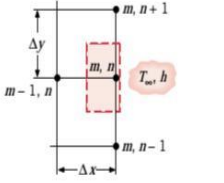
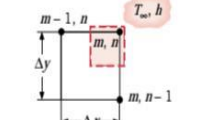
1. Angka 1,2,3, dan 4 merupakan nomor dari persamaan yang akan diinput berdasarkan case *finite difference* yang digunakan berdasarkan tabel rangkuman persamaan *finite difference* pada suatu titik.
2. Pada kolom yang menunjukkan angka 210 merupakan suhu luar *tube air preheater*.
3. Pada kolom yang menunjukkan angka 45 merupakan suhu dalam *tube air preheater*.

**Gambar 4.6** Input persamaan finite difference



Gambar 4.6 menunjukkan input persamaan *finite difference* sesuai dengan case yang tersedia pada tabel. Analisis ini dilakukan pada Microsoft Excel, dan digunakan solver yang tersedia pada mendapatkan nilai suhu *tube air preheater* berdasarkan persamaan matriks. Beberapa data yang diperlukan dalam analisa *finite difference* ini antara lain koefisien konveksi aliran sisi luar *tube*,  $h_a$ , koefisien konveksi sisi dalam *tube*,  $h_b$  dan konduktivitas material *tube air preheater*,  $k$ . Data-data tersebut telah dihitung pada sub-bab sebelumnya.

Hasil analisis suhu material *tube air preheater* dengan kondisi aliran udara di dalam *tube* dengan laju alir massa sebesar 0,00163 kg/s dengan temperatur 44,7 °C serta terjadi aliran *flue gas* dengan asumsi terjadinya konveksi alami dengan suhu *flue gas* sebesar 210 °C sehingga didapatkan suhu material *tube air preheater* sebesar 99,82 °C. Suhu tersebut didapatkan dengan menghitung rata-rata suhu titik hasil perhitungan *Finite-Difference* pada gambar 4.5.

Configuration	Finite-Difference Equation for $\Delta x = \Delta y$
	$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0$ <p><b>Case 1. Interior node</b></p>
	$2(T_{m-1,n} + T_{m,n+1}) + (T_{m+1,n} + T_{m,n-1}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2\left(3 + \frac{h\Delta x}{k}\right)T_{m,n} = 0$ <p><b>Case 2. Node at an internal corner with convection</b></p>
	$(2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) + \frac{2h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2\left(\frac{h\Delta x}{k} + 2\right)T_{m,n} = 0$ <p><b>Case 3. Node at a plane surface with convection</b></p>
	$(T_{m,n-1} + T_{m-1,n}) + 2\frac{h\Delta x}{k}T_{\infty} - 2\left(\frac{h\Delta x}{k} + 1\right)T_{m,n} = 0$ <p><b>Case 4. Node at an external corner with convection</b></p>

**Gambar 4.7** Persamaan *Finite-Difference*

## 4.4 Desain Tube Primary Air Preheater

### 4.4.1 Spesifikasi dan Ukuran Tube Primary Air Preheater

Material yang digunakan pada penelitian analisa kegagalan ini adalah *tube primary air preheater* pada *circulating fluidized bed Boiler* yang diambil secara acak. Material ini berasal dari PT. PLN (Persero) Unit 2 PLTU . Material yang digunakan pada *tube air preheater* ini adalah *seamless ferritic alloy steel* dengan standar ASTM A213 dengan Grade T12 [3].

**Tabel 4.3** Komposisi Kimia ASTM A213 Grade T12

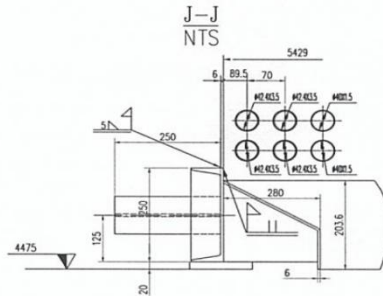
Grade	Chemical Composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
T12	0,05	0,5 max	0,30	0,025 max	0,045 max	-	0,80	0,44
	- 0,15		- 0,61				- 1,25	- 0,65

Sumber : ASTM A-213 [3]

**Tabel 4.4** Data Tube *Primary Air Preheater*

	Keterangan	Data
Material	Jenis Material	<i>Seamless ferritic alloy steel</i> ASTM A-213 Grade T12
	Periode Penggunaan	5 Tahun ( 2013 - 2018 )
	Diameter Luar (mm)	42,4
	Diameter dalam (mm)	35,4
	Ketebalan (mm)	3,5
Kondisi Kerja	Batas Maksimal Temperatur Kerja ( $^{\circ}\text{C}$ )	310
	Batas Maksimal Tekanan (psi)	32,63
	<i>Flow Rate</i> ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	35834

Pada tabel 4.3 dan 4.4 didapatkan data dari *tube primary air preheater* yang menggunakan *seamless tube ferritic alloy steel* dengan standar ASTM A-213 grade T-12. Pada gambar 4.4 *tube* tersebut memiliki ketebalan luar (*outside diameter*) sebesar 42,4 milimeter, ketebalan dalam (*inside diameter*) 35,4 milimeter dan ketebalan *tube* (*thickness*) 3,5 milimeter. Dimana *tube* tersebut digunakan dari tahun 2013 hingga tahun 2018. Desain dari *air preheater* memiliki standar kondisi kerja yang harus dijadikan acuan dalam pengoperasiannya.



**Gambar 4.8** Spesifikasi *Tube Primary Air Heater*

Dengan mengetahui kondisi kerja seperti pada tabel 4.2, ketebalan minimal *tube primary air preheater* dapat dihitung menggunakan standar ASME B31.3 sehingga didapatkan rumus :

$$t = \frac{P D}{2 (SE + PY)}$$

$$tm = t + CA$$

Dengan menggunakan nilai *pressure* (P) *primary air preheater* sebesar 1,338698 psi, Diameter luar (D) sebesar 42,4 milimeter, *Allowable stress in tension* (S) sebesar 9000 psi yang didapatkan dari hasil *yield strength* yang dibagi dengan *safety factor* bernilai 4, kemudian *quality factor* (E) dari *seamless pipe* sebesar 1, dan *material factor* dari *ferritic steels* yang digunakan pada temperatur kerja dibawah  $\leq 482$  °C sebesar 0,4. Dan *Corrosion Allowance* (CA) sebesar 0,05. Maka didapatkan :

$$t = \frac{1,338698 \cdot 42,4}{2 (9000 \cdot 1 + 1,338698 \cdot 0,4)}$$

$$t = 0,00315$$

Dan nilai dari ketebalan minimum pipa :

$$tm = t + CA$$

$$tm = 0,00315 + 0,05$$

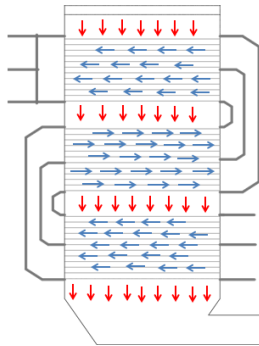
$$tm = 0,05315 \text{ in}$$

$$tm = 1,35 \text{ mm}$$

Sehingga didapatkan ketebalan minimum dari *tube primary air preheater* adalah 1,35 mm.

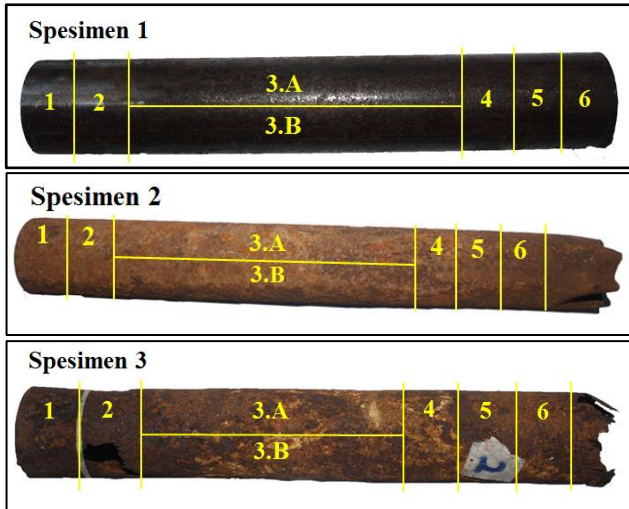
#### 4.5 Analisa Visual dan Dimensi *Tube Primary Air Preheater*

Analisa visual dilakukan pada permukaan dalam dan luar *tube primary air preheater* untuk melihat adanya kerusakan berupa lubang, pembentukan produk korosi dan perubahan warna yang terjadi pada spesimen. Terdapat tiga buah *tube primary air preheater* yang digunakan sebagai sampel pada penelitian ini, dimana sampel yang ada diambil secara acak pada bagian bawah *tube primary air preheater* seperti pada gambar 4.8, dengan panah berwarna merah menunjukkan aliran *flue gas* dan panah berwarna biru yang menunjukkan arah aliran udara yang masuk ke *air preheater*.



**Gambar 4.9** Letak dan Arah Aliran Udara dan *Flue Gas* pada *Air Preheater*

Berdasarkan gambar 4.8, spesimen yang didapatkan diambil secara acak dan terdapat tiga buah sampel seperti pada gambar 4.9. Setiap spesimen dipotong menjadi beberapa bagian yang akan digunakan untuk tiap-tiap pengujian.



**Gambar 4.10** Pembagian Sampel Tube Primary Air Preheater

Pada Gambar 4.10 spesimen 1, 2 dan 3 memiliki masing-masing enam sampel yang akan diuji. Spesimen 1 merupakan spesimen awal yang belum mengalami kegagalan dikarenakan spesimen tersebut belum digunakan pada *air preheater*. Spesimen 1 dibagi menjadi beberapa sampel yang akan dipotong sepanjang 10 mm seperti pada bagian sampel nomor 1,2,4,5, dan 6. Pada sampel nomor 3 akan dipotong secara melintang menjadi bagian sampel 3.A dan 3.B.

Spesimen 2 dan 3 merupakan spesimen yang telah digunakan pada air preheater dan mengalami kegagalan berupa pengurangan ketebalan yang merata serta terdapat lubang pada spesimen 3. Spesimen 2 dan 3 dibagi menjadi beberapa sampel yang dipotong sepanjang 10 mm seperti pada sampel nomor 1,2,4,5, dan 6. Pada bagian sampel nomor 3 spesimen 2 dan 3 dipotong secara melintang menjadi bagian 3.A dan 3.B.

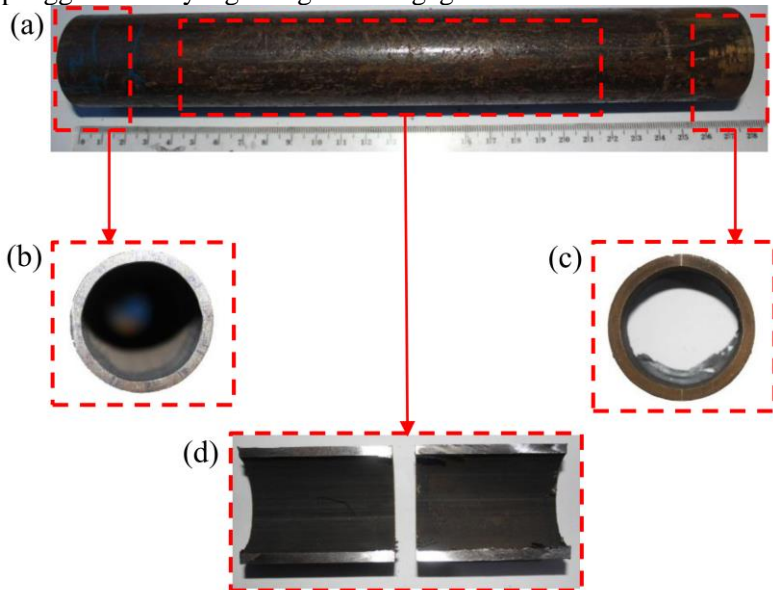
Langkah selanjutnya untuk melakukan perhitungan ketebalan spesimen pada sampel nomor 1 dan 6 di masing-masing spesimen. Lalu setiap sampel akan diamati pola kerusakan, lapisan produk korosi yang terbentuk, dan perubahan warna yang terjadi

baik pada permukaan dalam dan luar spesimen *tube primary air preheater*.

#### 4.5.1 Permukaan Luar dan Dalam Tube Primary Air Preheater

##### 4.5.1.1 Spesimen 1

Pada pengamatan visual yang dilakukan pada spesimen 1 yang merupakan spesimen *tube primary air preheater* yang belum digunakan pada *air preheater*, sehingga tube belum mengalami kegagalan. Tidak ditemukan kerusakan, perubahan warna maupun penipisan atau pengurangan ketebalan dan merupakan spesimen awal yang nantinya akan digunakan sebagai pengganti *tube* yang mengalami kegagalan.



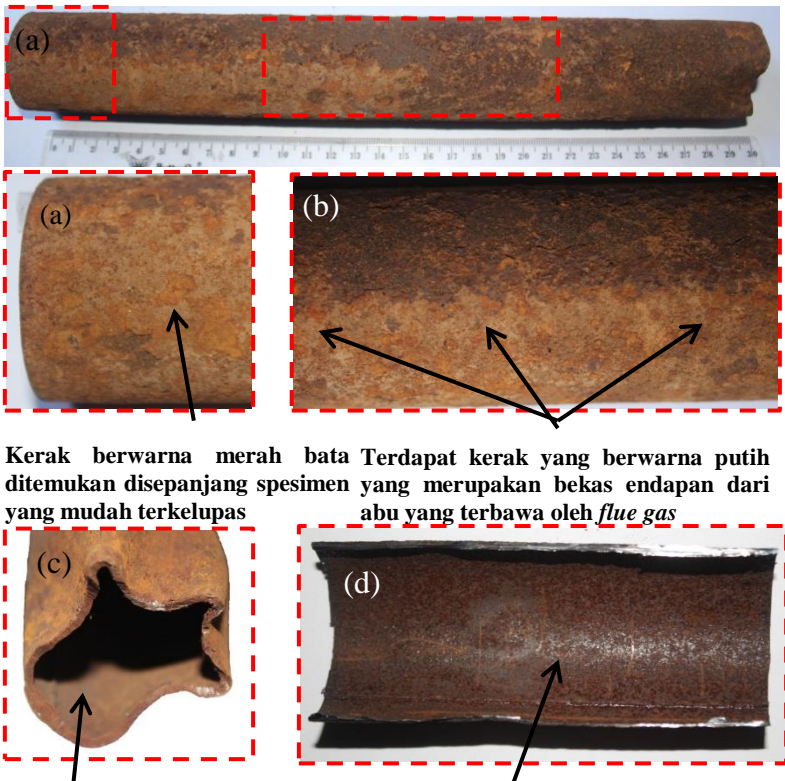
**Gambar 4.11** Spesimen 1 (a) tampak permukaan luar, (b) tampak kiri yang merupakan sampel 1.1, (c) tampak kanan yang merupakan sampel 1.6, dan (d) tampak dalam yang merupakan sampel 3.A dan 3.B

Tabel 4.3 Hasil pengamatan visual pada spesimen 1

Lokasi Pengamatan	Hal Yang Diamati	Hasil Pengamatan
Permukaan Luar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bentuk Spesimen</li>   <li>• Warna</li>   <li>• Ketebalan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak terdapat kerak yang menempel di permukaan</li> <li>• Tidak terdapat lubang</li> <li>• Merupakan <i>seamless tube</i> yang memiliki ukuran yang sesuai dengan desain (sesuai dengan tabel 4.9 )</li> <li>• Hitam (lapisan pelindung)</li> <li>• Masih sesuai dengan desain (tabel 4.9 )</li> <li>• Tidak mengalami penurunan ketebalan secara progresif (tabel 4.6)</li> </ul>
Permukaan Dalam	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bentuk</li>   <li>• Warna</li>   <li>• Ketebalan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak terdapat kerak maupun goresan yang menempel di permukaan</li> <li>• Tidak terdapat lubang</li> <li>• Merupakan <i>seamless tube</i> yang memiliki ukuran yang sesuai dengan desain (sesuai dengan tabel 4.9)</li> <li>• Hitam (lapisan <i>coating</i>)</li> <li>• Masih sesuai dengan desain (tabel 4.9)</li> <li>• Tidak mengalami penurunan ketebalan secara progresif (tabel 4.6)</li> </ul>



#### 4.5.1.2 Spesimen 2



Kerak berwarna merah bata Terdapat kerak yang berwarna putih ditemukan disepanjang spesimen yang merupakan bekas endapan dari abu yang mudah terkelupas *flue gas*

Terdapat kerusakan yang disebabkan pada proses pelepasan spesimen dari *tubesheet*

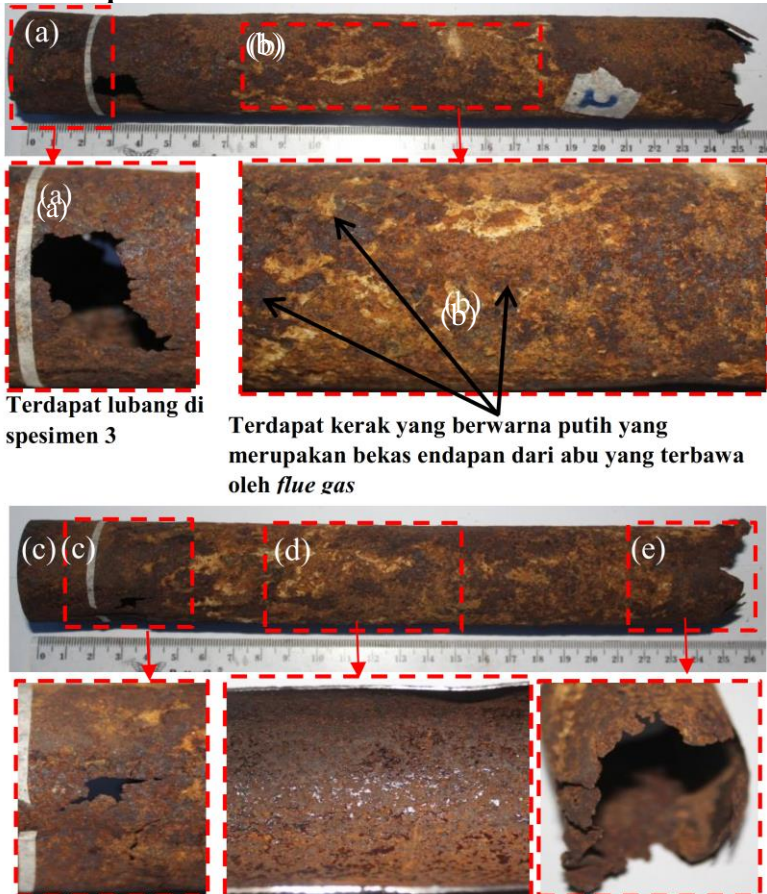
Terdapat kerak disepanjang spesimen bagian dalam berwarna merah kecoklatan

**Gambar 4.12** Spesimen 2 (a) salah satu lokasi terdapatnya kerak pada tampak depan, (b) perbesaran spesimen yang terdapat bekas endapan dari abu, (c) kerusakan yang terdapat pada bagian samping spesimen, dan (d) bagian dalam spesimen.

Tabel 4.4 Hasil pengamatan visual pada spesimen 2

Lokasi Pengamatan	Hal Yang Diamati	Hasil Pengamatan
Permukaan Luar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bentuk spesimen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terdapat kerak berwarna merah bata yang mudah terkelupas disepanjang spesimen</li> <li>• Terdapat kerak berwarna putih yang disebabkan oleh endapan abu pada sebagian lokasi yang ada di spesimen</li> <li>• Pada bagian samping kanan spesimen ditemukan kerusakan yang disebabkan oleh proses pengambilan <i>tube</i> pada <i>tube:heet</i></li> <li>• Tidak terdapat lubang</li> <li>• Merupakan seamless tube</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warna</li> <li>• Ketebalan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Merah bata (kerak yang mudah terkelupas), hitam (lapisan dibawah kerak), putih kekuningan (bekas endapan abu yang terbawa oleh <i>flue gas</i>)</li> <li>• Tidak sesuai dengan desain (tabel 4. 9)</li> <li>• Terjadi penurunan nilai ketebalan secara progresif (hasil pengukuran pada tabel 4.7)</li> </ul>
Permukaan Dalam	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bentuk Spesimen</li> <li>• Warna</li> <li>• Ketebalan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terdapat kerak berwarna merah kecoklatan yang tidak mudah terkelupas diseluruh permukaan dalam spesimen</li> <li>• Tidak terdapat lubang</li> <li>• Merupakan seamless <i>tube</i></li> <li>• Merah kecoklatan (merata diseluruh permukaan)</li> <li>• Tidak sesuai dengan desain (tabel 4. 9)</li> <li>• Terjadi penurunan nilai ketebalan secara progresif (hasil pengukuran pada tabel 4.7)</li> </ul>

### 4.5.1.3 Spesimen 3

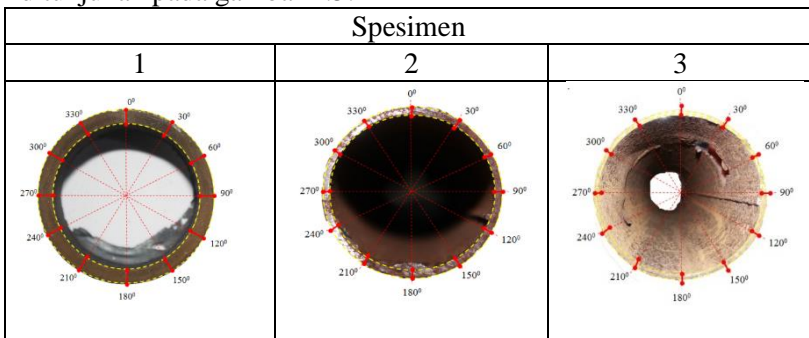


**Gambar 4.13** Spesimen 3 (a) tampak depan terdapat lubang dibagian sampel 3.2 (b) terdapat kerak yang berwarna putih disepanjang spesimen akibat adanya pengendapan abu yang terbawa oleh *flue gas* (c) spesimen tampak belakang terdapat lubang dibagian sampel 3.2 (d) bagian dalam spesimen nampak

adanya kerak berwarna merah kecokelatan di sepanjang spesimen, dan (e) kerusakan yang terdapat pada bagian samping spesimen.

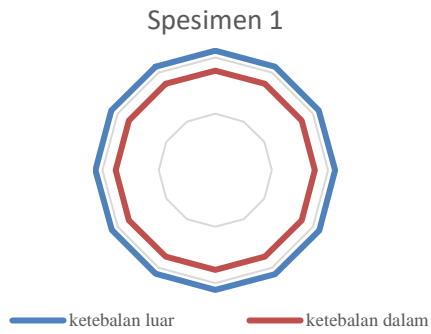
#### 4.5.2 Pengukuran Ketebalan Tube Primary Air Preheater

Untuk melihat adanya perubahan ketebalan dari hasil pengamatan, maka dilakukan pengukuran ketebalan pada ketiga spesimen. Lokasi pengukuran ketebalan diambil dari sampel nomor 1 dan 6 tiap-tiap spesimen pada gambar 4.2. berikut merupakan gambar dari spesimen yang diukur ketebalannya yang ditunjukkan pada gambar 4.5.

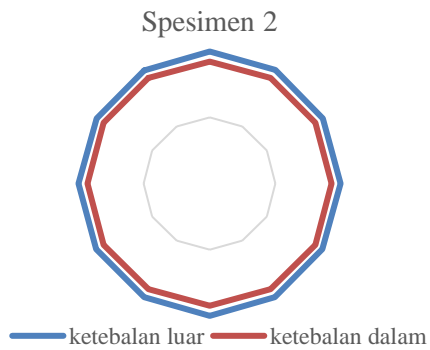


**Gambar 4.14** Pengukuran ketebalan ketiga Spesimen

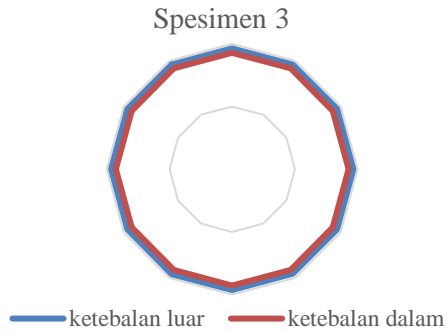
Pengukuran ketebalan setiap sampel diperlukan untuk mengetahui ketersediaan ukuran spesimen dengan desain awal atau tidak. Serta untuk mengetahui besarnya nilai penipisan atau pengurangan ukuran spesimen yang mengalami kegagalan. Pertama spesimen dipotong menjadi sampel. Kemudian dilakukan pengukuran dengan mengambil nilai pengukuran sebanyak 12 titik dari  $0^{\circ}$  hingga  $330^{\circ}$  dengan setiap perbedaan sebesar  $30^{\circ}$ . sehingga didapatkan hasil pada gambar 4.14.



**Gambar 4.15** Grafik dari perhitungan diameter luar dan dalam spesimen 1



**Gambar 4.16** Grafik dari perhitungan diameter luar dan dalam spesimen 2



**Gambar 4.17** Grafik dari perhitungan diameter luar dan dalam spesimen 2

Melalui perhitungan yang telah dilakukan (*terlampir*) didapatkan hasil dari ketebalan, diameter dalam, dan diameter luar. Sehingga didapatkan perbandingan ukuran diameter luar, diameter dalam, dan ketebalan *tube* ketiga spesimen yang diuji dengan ukuran *tube* yang ada pada desain seperti pada tabel 4.8.

**Tabel 4.5** Perbandingan *tube desain* dengan ketiga spesimen spesimen

Perbandingan <i>Tube</i>				
	Desain (mm)	Spesimen 1 (mm)	Spesimen 2 (mm)	Spesimen 3 (mm)
Diameter Luar ( <i>Outside Diameter</i> )	42,4	42,4587	39,7996	38,574
Diameter Dalam ( <i>Inside Diameter</i> )	35,4	35,3305	37,01883	37,117
Ketebalan ( <i>Thickness</i> )	3,5	3,56408	1,37583	0,7285

### 4.5.3 Analisa

Analisa visual yang dilakukan berupa pengamatan kerusakan dan pembentukan produk korosi terjadi pada permukaan dalam sampel yang mengalami kegagalan yaitu sampel yang berasal dari spesimen 2 dan 3. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh permukaan dalam *tube air preheater* memiliki lapisan berwarna merah kecoklatan yang merata di sepanjang permukaan dalam pipa. Hal tersebut menunjukkan indikasi terjadi proses korosi yang berhubungan dengan udara sebagai media korosif atau elektrolit. Pada spesimen 1 tidak terlihat adanya kerusakan berupa garis retakan ataupun lubang pada permukaan dalam *tube primary air preheater*, sehingga penyerangan korosi pada permukaan dalam *tube* tergolong jenis *uniform corrosion*. Sedangkan pada spesimen 2 terdapat lubang yang diindikasikan berasal dari proses korosi dari arah luar ke dalam dan juga tidak menampakan adanya garis retakan ataupun lubang, sehingga penyerangan korosi pada permukaan *tube* tergolong jenis *uniform corrosion*.

Pada permukaan luar spesimen 2 dan 3 *tube primary air preheater*, terdapat kerak yang berwarna merah bata, hitam dan putih kekuningan yang menyebar disepanjang permukaan spesimen seperti pada gambar 4.8 dan 4.9. Kerak yang menempel pada *outer surface tube* berasal dari hasil pembakaran tidak sempurna dimana pembakaran tersebut menghasilkan abu (*ash*) yang mudah melekat dan bereaksi dengan *tube*. Tidak ditemukan adanya lubang pada spesimen 2 namun terdapat lubang pada spesimen 3 yang berasal dari proses korosi tersebut. Korosi ini menyebabkan adanya penipisan atau penurunan ketebalan secara progresif pada permukaan luar spesimen seperti pada tabel 4.9.

Ketebalan awal dari *tube primary air preheater* adalah 3,5 milimeter, sedangkan ketebalan minimum yang diizinkan pada saat *tube* beroperasi diperoleh dari proses perhitungan menggunakan ASME B 31.3, sehingga batas toleransi ketebalannya adalah 1,35 milimeter. Jika ketebalan *tube* bernilai lebih besar daripada 1,35 milimeter maka *tube* masih aman

digunakan. Namun, jika ketebalan *tube* bernilai lebih kecil maka *tube* tersebut sudah tidak mampu menahan tekanan kerja atau tidak aman, sehingga harus dilakukan pergantian *tube* yang baru. Pada kenyataannya spesimen 2 dan 3 memang harus dilakukan pergantian karena diameter *tube* sudah tidak sesuai dengan desain.

Dari hasil analisa permukaan dalam dan luar serta pengukuran didapatkan bahwa spesimen *tube primary air preheater* sudah tidak aman lagi digunakan dikarenakan *tube* mengalami kegagalan berupa kebocoran serta terjadi penipisan atau pengurangan ukuran yang terjadi pada spesimen 2 dan spesimen 3 hingga menyebabkan spesimen 3 hanya bersisa 0,73 milimeter. Permukaan luar terdapat lapisan kerak berwarna merah bata di seluruh permukaannya dan permukaan dalam terdapat lapisan kerak berwarna merah kecoklatan yang mengindikasikan adanya proses korosi. Proses korosi ini menyebabkan spesimen mengalami kegagalan dengan terjadinya penipisan dan membentuk lubang dari arah luar ke dalam spesimen.

#### 4.6 Pengamatan Mikro

Dari hasil pengamatan visual dapat dilihat adanya perubahan warna dan ketebalan di *outer* maupun *inner surface*. Pengamatan mikro yang dilakukan meliputi pengujian XRD atau *X-Ray Diffraction* (XRD), metalografi, *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) untuk mengetahui produk korosi *outer* maupun *inner surface*, struktur mikro, lapisan permukaan dan unsur penyusun material.

##### 4.6.1 Temperatur Acid Dew Point

Dengan menggunakan persamaan Verhoff dan Banchemo, temperatur dari *sulfuric acid dew-point* dapat dihitung. Berdasarkan analisa dari *flue gas*, konsentrasi SO<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>O dalam ppm (*part per million*) dapat diperoleh dan dikonversikan ke tekanan parsial dengan kondisi mmHg. Dengan menggunakan hasil analisa fly ash yang telah dilakukan pada tanggal 19 Januari



2017, didapatkan nilai Tekanan parsial dari SO<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>O dengan menggunakan tekanan kerja sebesar 10,31 Kpa atau setara dengan 81,075 mmHg :

$$\% \text{SO}_3 = 0,72 = 7200 \text{ ppm} = 0,58374 \text{ mmHg}$$

$$\% \text{H}_2\text{O} = 0,56 = 5600 \text{ ppm} = 0,454 \text{ mmHg}$$

Sehingga :

$$T_{DEW} = \frac{1000}{[2,275 - 0,029 \ln(P_{H_2O}) - 0,0858 \ln(P_{SO_3}) + 0,0062 \ln(P_{H_2O}) \ln(P_{SO_3})]}$$

$$T_{DEW} = \frac{1000}{[2,275 - 0,029 \ln(0,454) - 0,0858 \ln(0,5837) + 0,0062 \ln(0,454) \ln(0,5837)]}$$

$$T_{DEW} = \frac{1000}{[2,275 - 0,029(-0,79) - 0,0858 (-0,5383) + 0,0062 (-0,79)(-0,5383)]}$$

$$T_{DEW} = \frac{1000}{[2,275 + 0,02291 + 0,0462 + 0,00264]}$$

$$T_{DEW} = \frac{1000}{2,345}$$

$$T_{DEW} = 426,12^{\circ}\text{K}$$

$$T_{DEW} = 153,12^{\circ}\text{C}$$

Sulfur trioksida dan uap air yang terkandung pada *flue gas* akan membentuk senyawa gas asam sulfat yang terkondensasi sehingga berubah fase dari gas menjadi *liquid* pada temperatur kerja 153,12°C.

#### 4.6.2 Analisa Komposisi Material *Tube Primary Air Preheater*

Komposisi kimia didapatkan dari tiap-tiap spesimen *tube primary air preheater* yang diambil pada sampel nomor 5. Sampel tersebut kemudian diuji menggunakan *spectrometer* dan dibandingkan dengan komposisi kimia menurut standar ASTM A213 pada tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Hasil pengujian komposisi kimia menggunakan *spectrometer* yang dibandingkan dengan komposisi kimia menurut ASTM A213.

Unsur- Unsur Penyusun	%			
	ASTM A 213 Grade T12	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3
C	0,05 - 0,15	0,103	0,096	0,1
Fe	<i>balance</i>	<i>balance</i>	<i>balance</i>	<i>balance</i>
Si	0,5	0,219	0,367	0,366
Mn	0,30 - 0,61	0,447	0,412	0,42
P	0,025 max	0,008	0,834	0,8
S	0,045 max	0,008	0,311	0,312
Ni	-	0,098	0,132	0,14
Cr	0,80 - 1,25	0,112	0,467	0,476
Mo	0,44 - 0,65	0,034	0,0097	0,011

Setelah dibandingkan dengan komposisi kimia standar yaitu ASTM A213, *tube* yang belum mengalami kegagalan adalah spesimen 1 yang memiliki komposisi kimia sesuai dengan ASTM A213. *Tube* yang mengalami kegagalan yaitu spesimen 2 dan 3 tidak memiliki komposisi kimia yang sesuai dengan ASTM A213. Hasil *spectrometer* menunjukkan adanya kenaikan unsur sulfur (S) pada specimen 3 jika dibandingkan dengan specimen 1 maupun 2, hal itu menyebabkan kenaikan senyawa  $H_2SO_4$  s dan membuat lingkungan kerja *air preheater* specimen 3 menjadi lingkungan asam. Karena adanya *ash* sisa pembakaran yang mengendap pada *tube* sehingga bereaksi dengan asam sulfat yang sangat terkonsentrasi kemudian lama-kelamaan merusak baja. Terjadi

penurun kadar Fe yang disebabkan oleh adanya pembentukan produk korosi yang menyebabkan Fe berikatan dengan oksigen dan membentuk produk korosi.

#### 4.6.3 Pengujian Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS)

Pengujian *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) atau spektrofotometri serapan atom adalah salah satu metode analisi yang dapat digunakan untuk mengukur unsur di dalam suatu bahan dengan kepekaan, ketelitian dan selektifitas yang sangat tinggi. metode ini cukup spesifik artinya hasil analisis sebagian unsur tidak dipengaruhi oleh adanya unsur lain. Berikut merupakan hasil pengujian AAS unsur sulfur dan klorida pada tabel 4.7 dan 4.8.

**Tabel 4.7** Hasil pengujian AAS Unsur Sulfur

No	Sampel	Hasil	Unit	Method
1	Sampel 2	0,5	% w/w	AAS
2	Sampel 3	0,58		

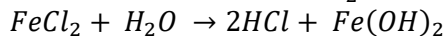
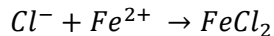
**Tabel 4.8** Hasil pengujian AAS Unsur klorin

No	Sampel	Hasil	Unit	Method
1	Sampel 2	0,11	% w/w	AAS
2	Sampel 3	0,12		

Dari hasil pengujian AAS pada tabel 4.7 didapatkan bahwa unsur sulfur pada spesimen 2 lebih kecil daripada spesimen 3 yaitu 0,5 dan 0,58. Spesimen 3 merupakan spesimen yang mengalami kegagalan yang paling parah dikarenakan ketebalan

sisa *tube* hanya 0,73 milimeter. Lapisan luar tersusun atas *magnetite* yang memiliki ketebalan 0,3 milimeter dan lapisan dalam yang tersusun atas *hematite* dengan ketebalan 0,1 milimeter, sehingga sisa dari logam tube itu sendiri adalah 0,3 milimeter. Penyusun unsur terbesar dari produk korosi atau kerak yang menjadi sampel pengujian AAS pada spesimen 3 yaitu sulfur dengan 0,58 %w/w. Sulfur semakin diperkaya karena endapan abu yang menempel pada *tube* dibagian bawah *air preheater*. Hal ini diindikasikan bahwa sulfur adalah yang sangat mempengaruhi dalam proses korosi yang terjadi pada Spesimen 3.

Pada tabel 4.8 menunjukkan nilai dari unsur klorin sebesar 0,11 % pada spesimen 2 dan 0,12 % pada spesimen 3. Unsur klorin mengindikasikan adanya *pitting corrosion* yang terjadi pada *tube* karena *pitting corrosion* identik dengan reaksi antara ion Cl dan Fe. *Pitting corrosion* merupakan korosi lokal yang terjadi dikarenakan adanya penyerangan pada lapisan oksida yang merupakan produk korosi. Berikut mekanisme *pitting corrosion* :

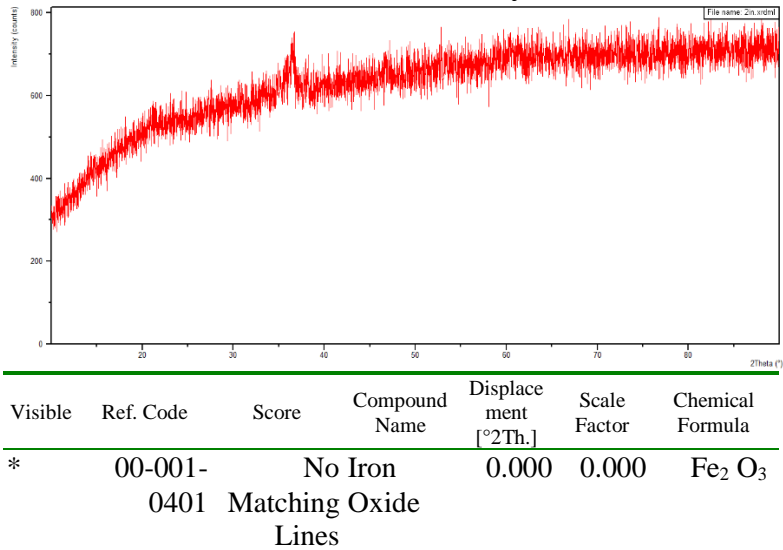


Fe(OH)<sub>2</sub> merupakan produk korosi dari mekanisme *pitting corrosion*. Kemudian HCl hasil dari reaksi akan terurai dalam air menjadi H<sup>+</sup> dan Cl<sup>-</sup>. Lalu kemudian ion Cl<sup>-</sup> kembali mengikat ion Fe<sup>2+</sup>.

#### 4.6.4 Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD atau *X-Ray Diffraction*, dilakukan untuk mendapatkan senyawa yang terkandung pada permukaan dalam dan luar *tube primary air preheater*. Pengujian ini menggunakan sampel nomor 2 dari spesimen 2 dan spesimen 3 seperti pada gambar 4.2. Hasil pengujian SRD akan digunakan untuk melakukan analisa lanjutan terkait proses korosi yang terjadi pada *tube primary air preheater*.

#### 4.6.4.1 Permukaan Dalam Tube Primary Air Preheater

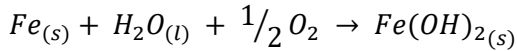


**Gambar 4.18** Hasil pengujian XRD pada permukaan dalam *tube air preheater*

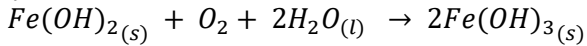
Gambar 4.18 menunjukkan hasil pengujian XRD pada permukaan dalam *tube primary air preheater*. Lapisan kerak yang terbentuk berwarna merah kecoklatan pada permukaan dalam terbaca sebagai produk korosi yaitu Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atau hematite. Hematite terbentuk akibat Fe yang berada pada lingkungan kerja yang berkontak langsung dengan udara secara terus menerus. Umumnya penyerangan korosi pada hematite adalah berupa *uniform corrosion* tanpa terlihat adanya garis retakan korosi.

Reaksi kimia yang terjadi pada saat pembentukan *hematite* adalah logam Fe yang berkontak langsung dengan udara yang mengandung oksigen sehingga melepaskan elektronnya. Ketika logam Fe kehilangan elektron dan menjadi ion Fe<sup>2+</sup> dan oksigen menjadi ion O<sup>2-</sup>, kedua ion tersebut bergabung dan menjadi oksida Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atau *hematite* dan membentuk lapisan pada

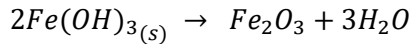
permukaan logam Fe tersebut. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Ferro hidroksida [  $Fe(OH)_2$  ] yang terjadi merupakan hasil sementara yang dapat teroksidasi secara alami oleh udara, menjadi ferri hidroksida [  $Fe(OH)_3$  ], sehingga mekanisme reaksi selanjutnya adalah :

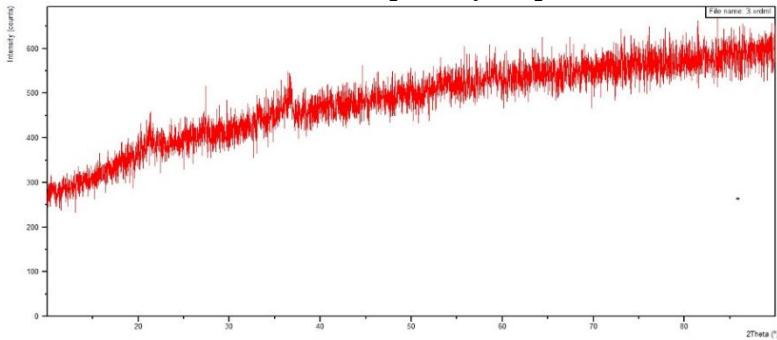


Ferri hidroksida yang terbentuk akan berubah menjadi  $Fe_2O_3$  yang berwarna merah kecoklatan yang biasanya disebut *hematite*. Reaksinya adalah :



*Hematite* yang ada pada permukaan dalam *tube primary air preheater* terbentuk secara menyeluruh. Proses korosi yang terjadi secara kontinu karena adanya kontak langsung antara Fe dengan udara yang menyebabkan pengurangan ketebalan pada permukaan dalam *tube*. Dari gambar 9.8 didapatkan bahwa permukaan dalam *tube air preheater* tidak tercemar unsur logam lain sehingga korosi yang terjadi pada permukaan dalam *tube* murni dikarenakan adanya reaksi korosi antara Fe dan udara.

#### 4.6.4.2 Permukaan Luar *Tube primary air preheater*



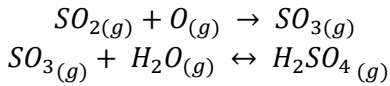
Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-075-1609	7	Iron Oxide	1.073	0.954	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>

**Gambar 4.19** hasil pengujian XRD pada permukaan luar *tube air preheater*

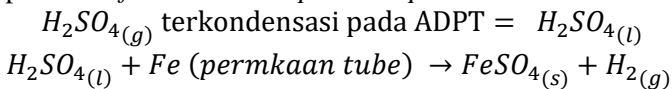
Gambar 4.19 menunjukkan hasil pengujian XRD pada permukaan luar *tube primary air preheater*. Terdapat lapisan kerak tipis berwarna merah bata, merah kecoklatan serta kerak yang berwarna putih kekuningan pada permukaan luar *tube primary air preheater* yang terbaca sebagai produk korosi yaitu Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> atau *magnetite*.

Pada permukaan luar *tube primary air preheater*, terjadi proses korosi yang berbeda dibandingkan pada permukaan dalam. Hal tersebut dikarenakan media korosif berupa *flue gas* pada kisaran temperatur 186,4 - 298,9 °C dan diindikasikan bahwa proses yang terjadi merupakan *sulfuric acid dew point corrosion*. Korosi tersebut disebabkan oleh adanya senyawa asam pada *flue gas* yang terkondensasi pada temperature 153,12 °C. Sehingga menyebabkan adanya endapan yang terakumulasi dari abu kental yang menempel pada permukaan *tube primary air preheater*.

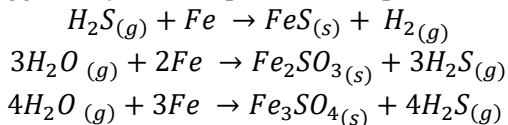
Berikut merupakan reaksi dari proses pembentukan larutan asam pada *tube* :



Senyawa sulfur yang terdapat pada bahan bakar batu bara ( $SO_2$ ) bereaksi dengan oksigen sehingga membentuk  $SO_3$ .  $SO_3$  yang terdapat pada permukaan luar *tube* bereaksi dengan uap air yang ada pada lingkungan *air preheater* dan membentuk gas  $H_2SO_4$ . Pada *Acid dew-point temperature* (ADPT), larutan korosif mulai terkondensasi di permukaan *tube*. Biasanya muncul pada bagian air preheater yang temperaturnya lebih rendah yaitu bagian paling bawah air preheater dimana temperatur kerjanya rendah dan mencapai temperatur *sulfuric acid dew point*. Larutan asam terkondensasi dan langsung bereaksi dengan permukaan tube dan dengan abu kental dengan jumlah banyak yang kemudian membentuk fouling. Fouling yang terakumulasi di permukaan tube akan menyumbat aliran *flue gas*. Berikut merupakan reaksi dari proses *sulfuric acid dew-point temperature* :



Kemudian, permukaan tube diselimuti dengan fe yang teroksidasi dan endapan abu. Lalu larutan asam terkondensasi pada lapisan luar tube dan bereaksi dengan tube dan endapan abu tersebut. Kondensasi larutan asam dapat berpenetrasi melalui lapisan abu dan mencapai permukaan tube. Senyawa dari fe dengan oksigen dan sulfur terbentuk yaitu  $FeSO_4$ , karena adanya oksigen dan sulfur sehingga menyebabkan persamaan seperti berikut :



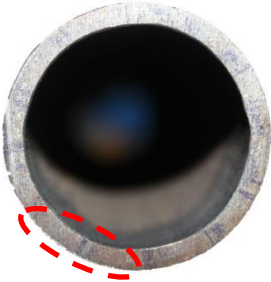


Magnetite ( $Fe_3SO_4$ ) pada permukaan luar *tube* terbentuk secara menyeluruh dengan ketebalan yang tipis. Produk korosi magnetite sesuai dengan keadaan lingkungan kerja tube, dimana suhu kerja diluar tube  $186,4^\circ C$  sehingga terbentuk senyawa  $Fe_3SO_4$ .

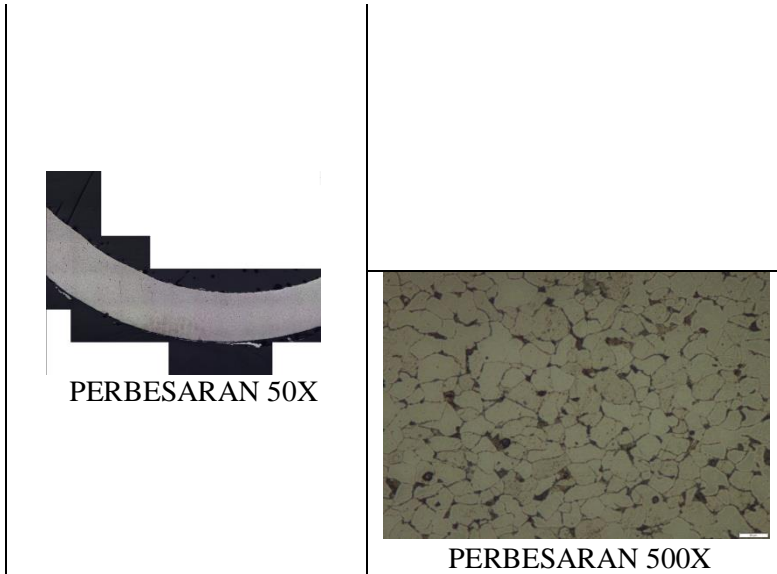


#### 4.6.5 Pengujian Metalografi

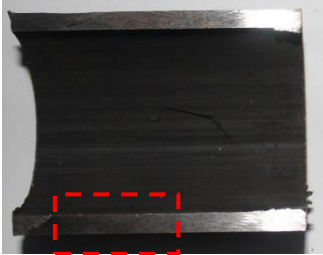
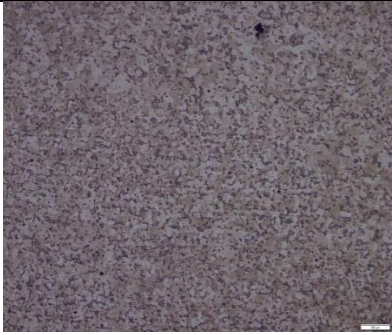
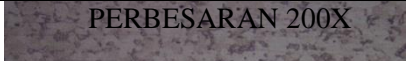
Analisa mikrostruktur dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari suatu spesimen ASTM A213 dengan Grade T12 akibat lingkungan kerjanya. ASTM A213 dengan Grade T12 merupakan golongan *low carbon steel* dengan komposisi karbon maksimal 0,15%. Permukaan luar tube air preheater berkontak langsung dengan gas sisa pembakaran (*flue gas*) Boiler pada kisaran temperatur 186,4 - 298,9 °C dan permukaan dalam tube air preheater berkontak langsung dengan udara pada temperatur 44,7 °C. Sampel yang digunakan pada pengujian mikro struktur adalah spesimen 1, 2 dan 3 seperti pada gambar 4.6 dengan sampel nomer 3.

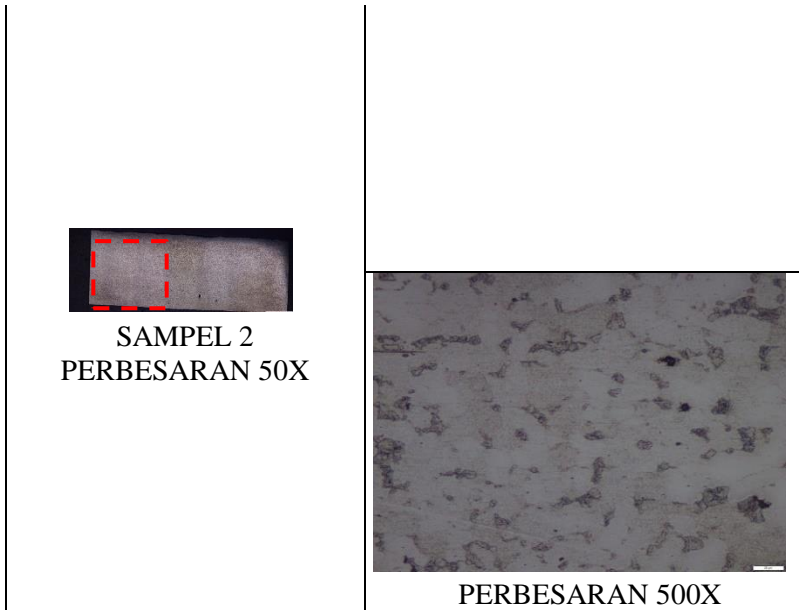
**Tabel 4.9** Tabel struktur mikro spesimen 1 yang diamati di daerah membujur

TITIK PENGUJIAN	STRUKTUR MIKRO
 <p data-bbox="275 1193 437 1222">SPESIMEN 1</p>	 <p data-bbox="613 994 880 1023">PERBESARAN 100X</p>
	



**Tabel 4.10** Tabel struktur mikro spesimen 1 yang diamati di daerah melintang

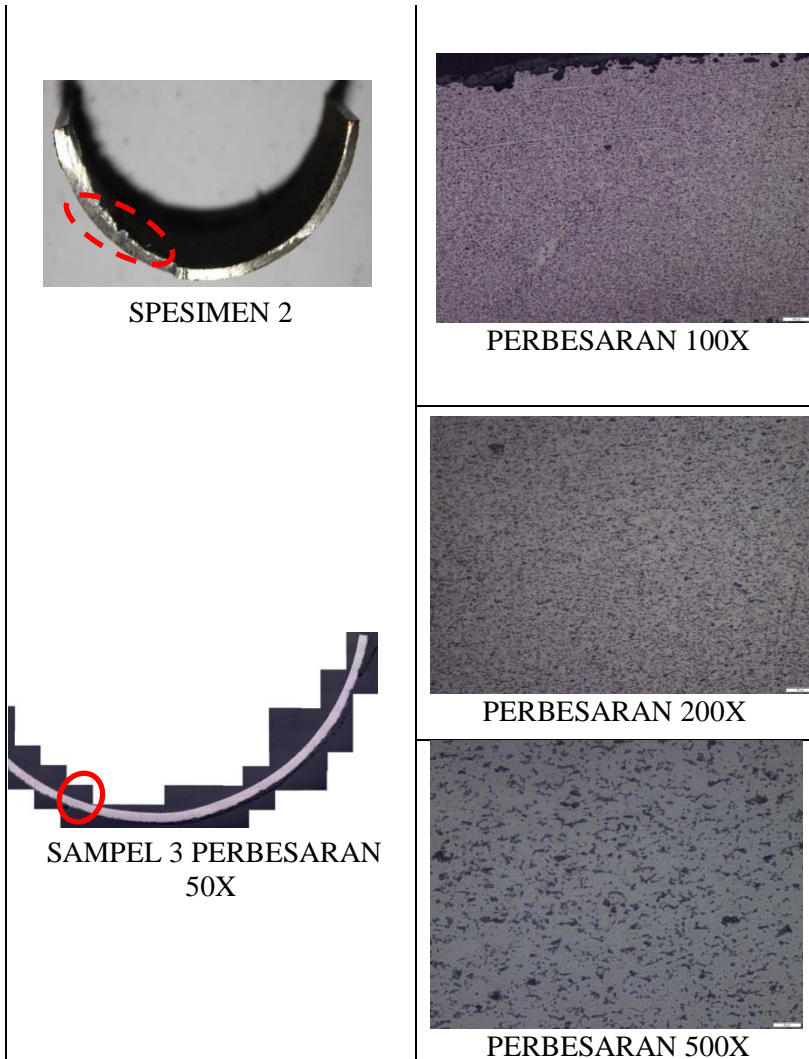
TITIK PENGUJIAN	STRUKTUR MIKRO
 <p>SPESIMEN 1</p>	 <p>PERBESARAN 100X</p>
	 <p>PERBESARAN 200X</p>



Tabel 4.13 dan Tabel 4.14 merupakan hasil pengujian metalografi spesimen 1 yang merupakan spesimen *tube* yang tidak mengalami kegagalan. Hasil analisa pada tabel 4.13 dan 4.14 menunjukkan produk korosi belum terbentuk pada *outer* maupun *inner surface*. Mikrostruktur yang terbentuk yaitu *ferrite* ditunjukkan dengan warna putih dan *pearlite* yang terbentuk pada spesimen ditunjukkan dengan warna hitam kecoklatan. Dengan komposisi kimia dari spesimen yang berstandar ASTM A213, spesimen *tube air preheater* tergolong *low carbon steel*. Gambar-gambar yang terdapat pada tabel 4.10 dan 4.11 menunjukkan kesesuaian spesimen *tube air preheater* dengan mikrostruktur *low carbon steel*.

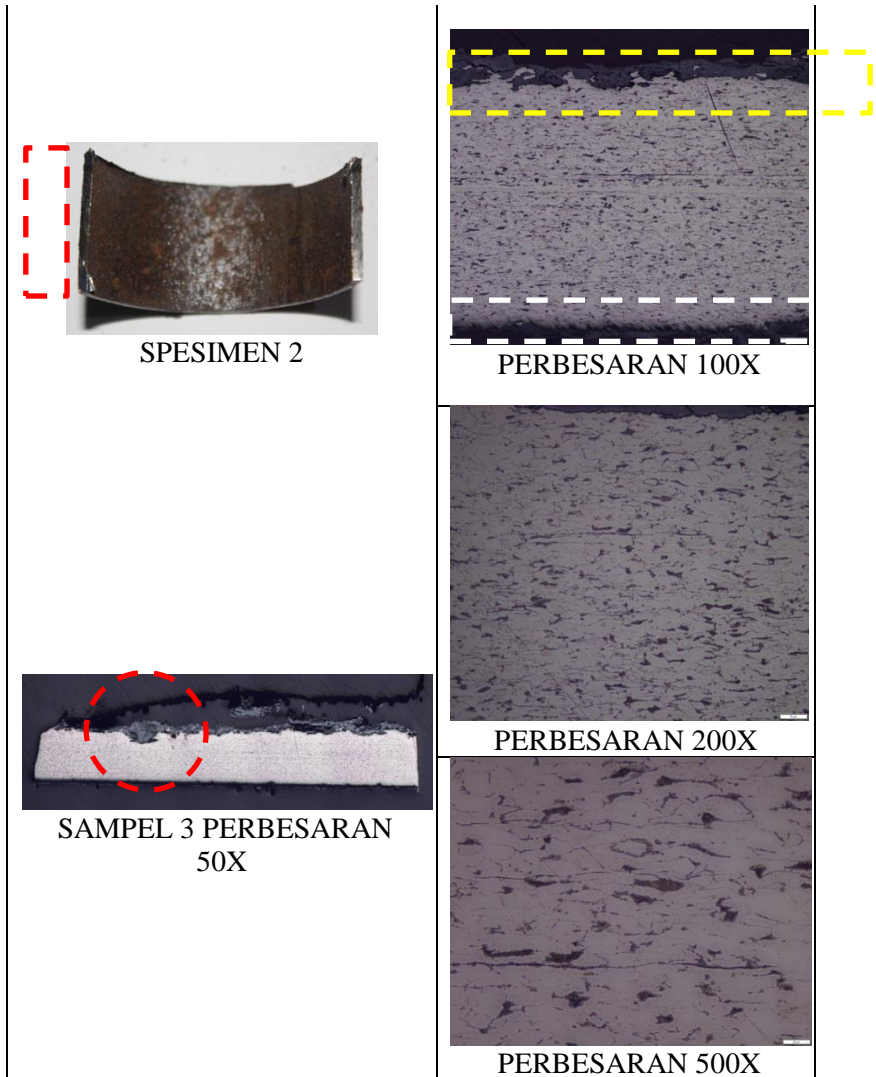
**Tabel 4.11** Tabel struktur mikro spesimen 2 yang diamati di daerah membujur

TITIK PENGUJIAN	STRUKTUR MIKRO
-----------------	----------------



**Tabel 4.12** Tabel struktur mikro spesimen 2 yang diamati di daerah melintang

TITIK PENGUJIAN	STRUKTUR MIKRO
-----------------	----------------



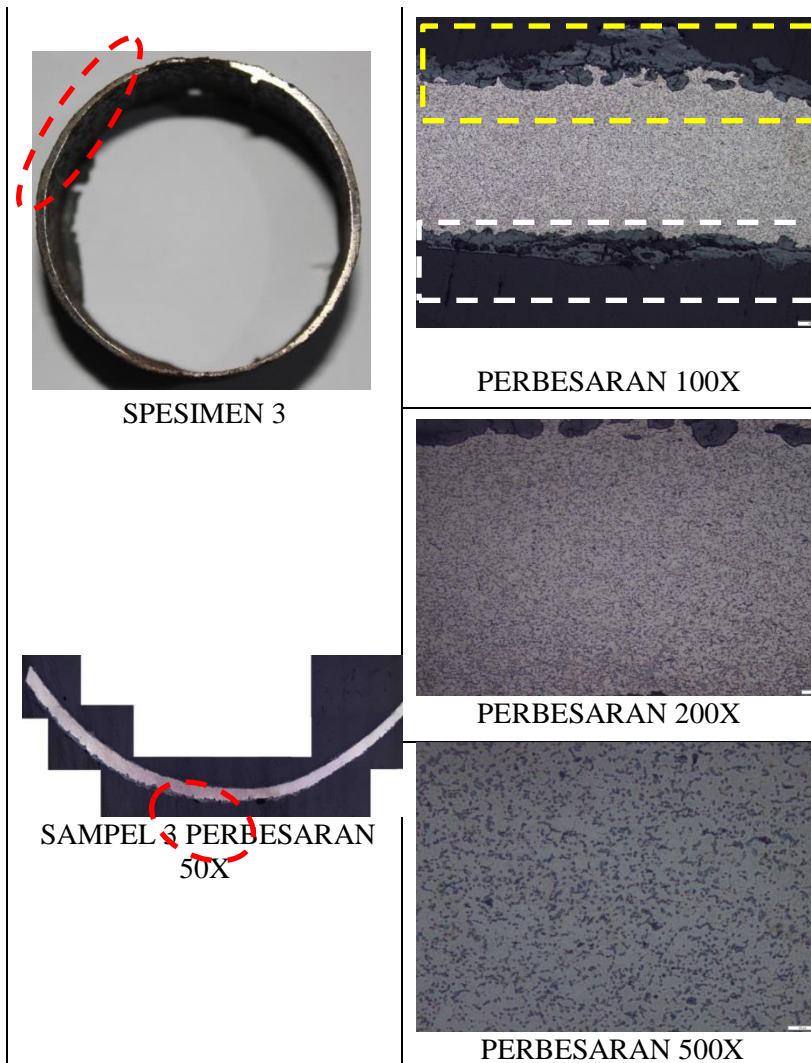
Analisa mikrostruktur pada tabel 4.15 dan 4.16 merupakan analisa yang dilakukan menggunakan spesimen 2 yang diamati secara membujur dan melintang. Hasil analisa menunjukkan

adanya lapisan produk korosi yang terbentuk dari proses oksidasi pada *outer* maupun *inner surface*. Pada permukaan dalam (*inner*) *tube air preheater* menunjukkan terbentuknya lapisan yang berwarna merah bata atau *hematite* dengan ketebalan 50 micrometer atau 0,05 milimeter. Sedangkan pada permukaan luar (*outer*) terbentuk lapisan yang berwarna hitam kecoklatan atau *maghnetite* dengan ketebalan 0,1 milimeter. Dapat terlihat pada tabel 4.15 dan 4.16 gambar mikrostruktur dengan perbesaran 100 kali, terdapat lapisan  $Fe_3O_4$  yang ditunjukkan dengan warna kuning dan lapisan  $Fe_2O_3$  yang ditunjukkan dengan warna putih.

Mikrostruktur yang ditunjukkan pada tabel 4.15 dan 4.16 yaitu *ferrite* yang terbentuk ditunjukkan dengan warna putih dan *pearlite* yang terbentuk pada spesimen ditunjukkan dengan warna hitam kecoklatan. Pada tabel 4.16 bentuk butir kristal menjadi pipih dengan orientasi kearah tangensial searah dengan arah aliran *flue gas* sehingga mengalami deformasi plastis yang permanen. Pada spesimen 2 terjadi proses pemanasan oleh *flue gas* yang temperaturnya masih dibawah temperature rekristalisasi, sehingga menyebabkan terjadinya proses rekristalisasi yang tidak sempurna. Rekristalisasi merupakan perubahan struktur kristal dalam waktu tertentu. Dikarenakan proses rekristalisasi tidak sempurna sehingga menyebabkan terjadi perubahan ukuran butir dan ukuran *grain boundary* membesar.

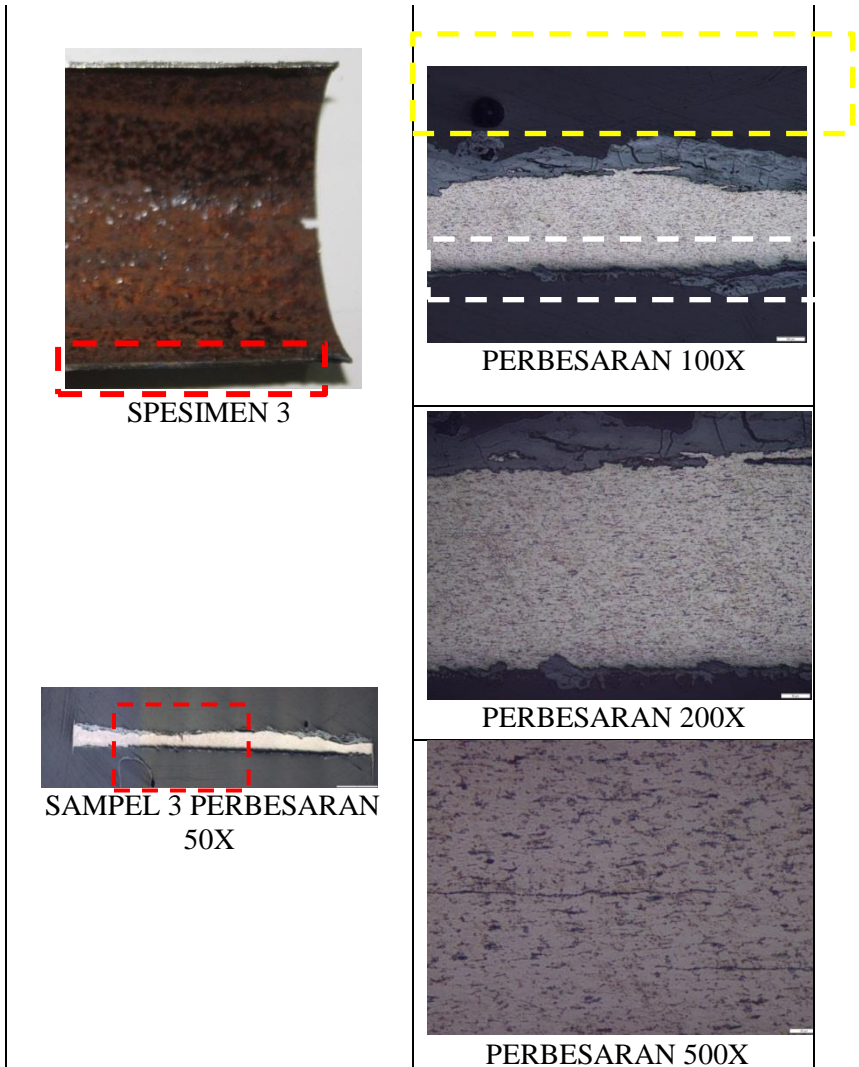
**Tabel 4.13** Tabel struktur mikro spesimen 3 yang diamati di daerah membujur

TITIK PENGUJIAN	STRUKTUR MIKRO
-----------------	----------------



**Tabel 4.14** Tabel struktur mikro spesimen 3 yang diamati di daerah melintang

TITIK PENGUJIAN	STRUKTUR MIKRO
-----------------	----------------



Analisa mikrostruktur pada tabel 4.17 dan 4.18 merupakan analisa yang dilakukan menggunakan spesimen 3 yang diamati secara membujur dan melintang. Hasil analisa menunjukkan adanya lapisan produk korosi yang terbentuk dari proses oksidasi

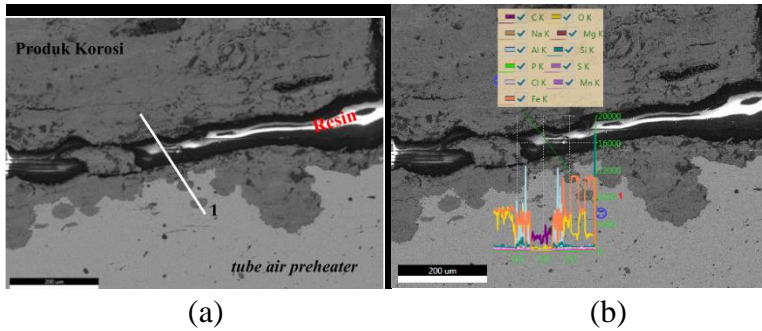


pada *outer* maupun *inner surface*. Pada permukaan dalam (*inner tube air preheater*) menunjukkan terbentuknya lapisan yang berwarna merah bata atau *hematite* dengan ketebalan 0,1 milimeter. Sedangkan pada permukaan luar (*outer*) terbentuk lapisan yang berwarna hitam kecoklatan atau *maghnetite* dengan ketebalan 0,1 milimeter. Dapat terlihat pada tabel 4.17 dan 4.18 gambar mikrostruktur dengan perbesaran 100 kali, terdapat lapisan  $Fe_3O_4$  yang ditunjukkan dengan warna kuning dan lapisan *hematite* atau  $Fe_2O_3$  yang ditunjukkan dengan warna putih.

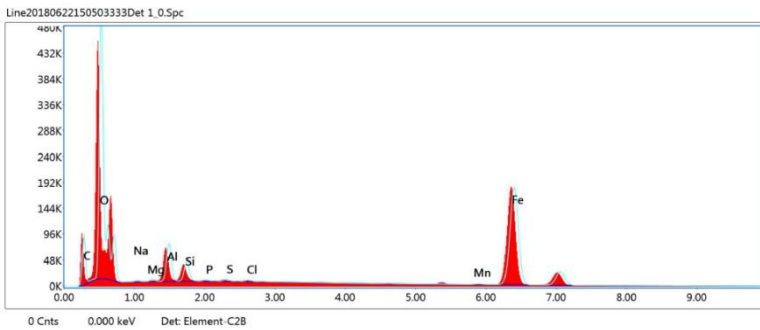
Mikrostruktur yang ditunjukkan pada tabel 4.17 dan 4.18 yaitu *ferrite* yang terbentuk ditunjukkan dengan warna putih dan *pearlite* yang terbentuk pada spesimen ditunjukkan dengan warna hitam kecoklatan. Pada tabel 4.18 bentuk butir kristal menjadi pipih dengan orientasi kearah tangensial searah dengan arah aliran *flue gas* sehingga mengalami deformasi plastis yang permanen. Pada spesimen 3 terjadi proses pemanasan oleh *flue gas* yang temperaturnya masih dibawah temperature rekristalisasi, sehingga menyebabkan terjadinya proses rekristalisasi yang tidak sempurna. Rekristalisasi merupakan perubahan struktur kristal dalam waktu tertentu. Dikarenakan proses rekristalisasi tidak sempurna sehingga menyebabkan terjadi perubahan ukuran butir dan ukuran grain boundary membesar.

#### **4.6.6 Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) dan dan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)**

Berdasarkan terjadinya fenomena perubahan ketebalan yang dialami oleh *outer surface* pada pengamatan visual, dilakukan pengujian SEM dan EDS pada penampang membujur untuk mengamati bentuk morfologi serta unsur- unsur penyusun yang terdapat pada spesimen 2 dan 3.



**Gambar 4.20** Morfologi permukaan *tube air preheater* (a) produk korosi berupa  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (b) pemetaan (*mapping*) komposisi kimia line 1

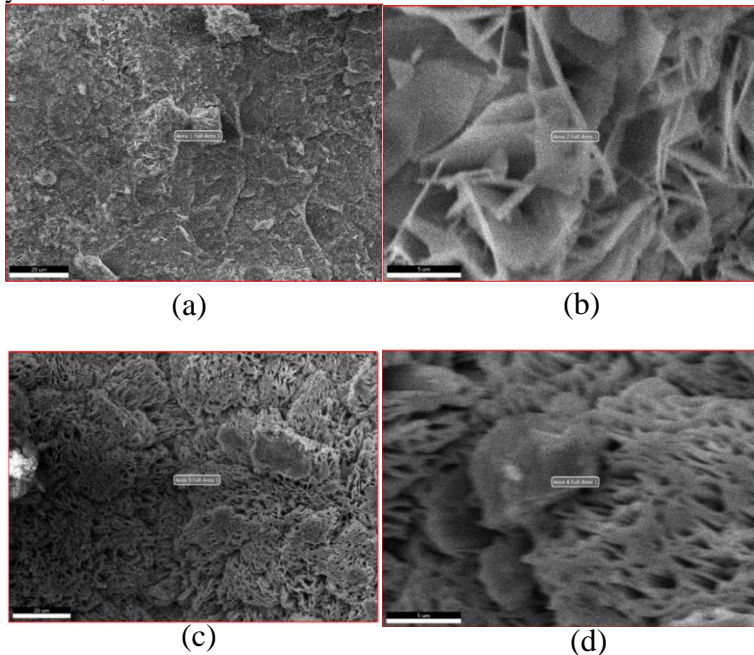


**Gambar 4.21** Hasil mapping menggunakan EDS *mapping line*

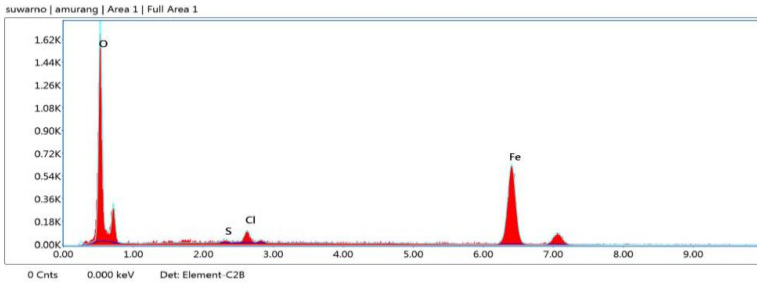
**Tabel 4.15** Hasil mapping EDS

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
O K	23,72	40,84	1629,03	6,71
Fe K	59,28	29,23	1332,54	2,32
S K	0,23	0,2	19,26	5,18
Cl K	0,2	0,15	15,28	6,28

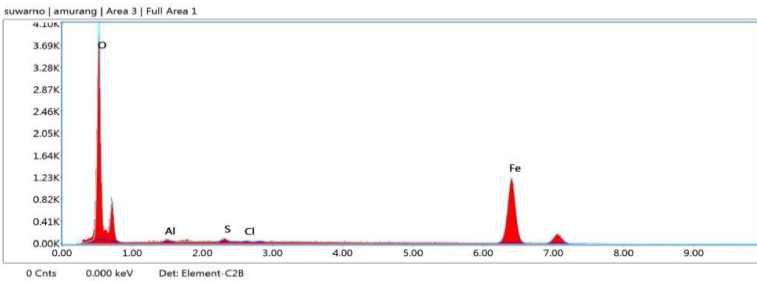
Untuk mengetahui komposisi kimia dari unsur-unsur penyusun dari spesimen 3 maka dilakukan proses *mapping line* yang dilakukan dengan cara menarik garis dari *tube air preheater* hingga produk korosi. Titik nomor 1 merupakan titik awal proses dilakukannya *mapping*. Hasil analisis EDS tabel 4.16 dari sampel yang diambil dari spesimen 3 menunjukkan bahwa sampel mengandung banyak Fe dan O daripada S dan Cl. Hal ini berarti terjadi proses korosi pada *air preheater* dan terkait dengan kondensasi asam sulfat pada permukaan luar *tube air preheater*. Dan setelah menggunakan pengujian XRD seperti pada gambar 4.12 didapatkan senyawa yang terdapat pada produk korosi utama yaitu  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .



**Gambar 4.22** Mikrografi dari pengujian SEM sampel yang terdeposit (kerak) (a) *outer surface* spesimen 2 (b) perbesaran (c) *outer surface* spesimen 3 (d) perbesaran



**Gambar 4.23** Hasil EDS deposit spesimen 2



**Gambar 4.24** Hasil EDS deposit spesimen 3

**Tabel 4.16** Hasil pengujian EDS kerak spesimen 2

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
O K	24,05	51,94	35,39	6,82
Fe K	73,1	45,23	29,32	3,57
S K	0,57	0,62	0,85	29,21
Cl K	2,28	2,22	3,1	11,21

**Tabel 4.17** Hasil pengujian EDS kerak spesimen 3

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
O K	27,1	55,96	83,24	5,97

Fe K	71,57	42,48	55,88	3,15
S K	0,64	0,67	1,86	20,44
Cl K	0,2	0,19	0,53	59,09

Hasil analisis SEM-EDS dari sampel yang terdeposit (kerak) yang diambil dari permukaan luar *tube* spesimen 2 seperti pada gambar 4.15 (a) dan (b) menunjukkan bahwa permukaan logam sangat terkorosi sehingga kita bisa melihat retak dengan jelas. Hasil dari pengujian EDS pada gambar 4.16 dan tabel 4.20 menunjukkan adanya unsur S sebesar 0,57 % dan memiliki nilai Cl yang cukup tinggi yaitu 2,28 %. Lapisan korosi yang padat mengandung banyak retakan lapisan ini sangat rawan untuk lepas dari metalnya atau rontok. Sedangkan pada sampel yang terdeposit (kerak) pada spesimen 3 seperti gambar 4.15 (c) dan (d) menunjukkan bahwa produk korosi yang terbentuk memiliki banyak pori-pori. Dari hasil EDS pada gambar 4.17 dan tabel 4.21 menunjukkan nilai S sebesar 0,64 % dan nilai Cl sebesar 0,2 %. Dengan lapisan oksida yang berpori, logam semakin rentan terhadap *pitting corrosion*. Jika media korosif mengalir dan terjebak dalam pori-pori maka lapisan oksida tersebut dapat dikatakan telah mengalami *pitting corrosion*.

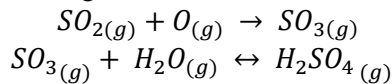
#### 4.7 Pembahasan

Ketika gas sisa pembakaran (*flue gas*) datang ke bagian *air preheater*, temperatur *flue gas* dibawah 200<sup>0</sup>C dan sebagian besar SO<sub>3</sub> bergabung dengan uap air dan membentuk uap asam sulfat. Pada tabel 4.9 Kandungan S dalam produk korosi atau lapisan korosi relatif tinggi sehingga menunjukkan adanya *sulphuric acid dew-point corrosion*. Hasil analisa yang dilakukan dengan pengujian XRD pada gambar 4.8 dan 4.9 menunjukkan bahwa produk korosi yang terbentuk yaitu *hematite* (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dan *maghnetite* (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>).

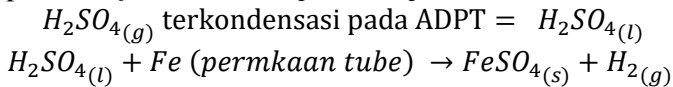
Diawali dengan ketidak sempurnaan proses pembakaran pada furnace yang menyebabkan banyak gas maupun abu sisa pembakaran yang terbawa ke daerah *heat recovery area* atau

*backpass* menyebabkan abu menjadi mengendap pada *tube-tube* yang ada pada area tersebut salah satunya pada *air preheater*. Salah satu unsur abu yaitu sulfur, dimana sulfur semakin diperkaya ketika endapan semakin banyak. Sulfur tersebut lama-kelamaan akan bereaksi dengan logam dan terkondensasi menjadi larutan asam yang reaktif terhadap logam tersebut sehingga menyebabkan logam menjadi teroksidasi.

Diawal mula korosi, reaksi utama yang muncul antara logam atau oksidasi logam dan kondensasi asam sulfat yaitu :

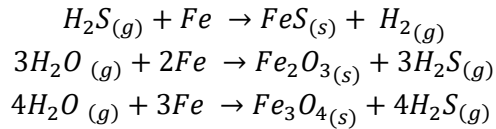


Senyawa sulfur yang terdapat pada bahan bakar batu bara ( $SO_2$ ) bereaksi dengan oksigen sehingga membentuk  $SO_3$ .  $SO_3$  yang terdapat pada permukaan luar *tube* bereaksi dengan uap air yang ada pada lingkungan *air preheater* dan membentuk gas  $H_2SO_4$ . Pada *Acid dew-point temperature* (ADPT), larutan korosif mulai terkondensasi di permukaan *tube*. Biasanya muncul pada bagian air preheater yang temperaturnya lebih rendah yaitu bagian paling bawah air preheater dimana temperatur kerjanya rendah dan mencapai temperatur *sulfuric acid dew point*. Larutan asam terkondensasi dan langsung bereaksi dengan permukaan tube dan dengan abu kental dengan jumlah banyak yang kemudian membentuk fouling. Fouling yang terakumulasi di permukaan tube akan menyumbat aliran *flue gas*. Berikut merupakan reaksi dari proses *sulfuric acid dew-point temperature* :



Kemudian, permukaan tube diselubungi dengan fe yang teroksidasi dan endapan abu. Lalu larutan asam terkondensasi pada lapisan luar tube dan bereaksi dengan tube dan endapan abu tersebut. Kondensasi larutan asam dapat berpenetrasi melalui lapisan abu dan mencapai permukaan tube. Senyawa dari fe dengan oksigen dan sulfur terbentuk yaitu  $FeSO_4$ , karena adanya

oksigen dan sulfur sehingga menyebabkan persamaan seperti berikut :



Magnetite ( $Fe_3SO_4$ ) pada permukaan luar *tube* terbentuk secara menyeluruh dengan ketebalan yang tipis. Produk korosi magnetite sesuai dengan keadaan lingkungan kerja tube, dimana suhu kerja diluar tube  $186,4\text{ }^{\circ}C$  dan didalam tube sebesar  $46,6\text{ }^{\circ}C$  sehingga temperature tube  $116,5\text{ }^{\circ}C$  sehingga terjadilah mekanisme proses *sulphuric acid dew point corrosion*.

Jadi dapat disimpulkan bahwa kegagalan terutama yang terjadi pada *tube air preheater* adalah *sulfuric acid dew-point corrosion* dan pada tingkat konsentrasi yang lebih rendah terdapat mekanisme *pitting corrosion*. Hal ini menyebabkan *tube air preheater* mengalami penipisan atau pengurangan ketebalan diseluruh permukaannya secara progresif dan akhirnya mengalami kegagalan berupa kebocoran *tube*.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dari analisa kegagalan *tube air preheater circulating fluidized bed Boiler* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal pada penelitian ini. Diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Temperatur kerja *tube air preheater* yang dihitung menggunakan *finite difference* didapatkan sebesar 99,82 °C.
2. Temperatur *Sulfuric Acid Dew Point* yang dihitung menggunakan konsentrasi SO<sub>3</sub> yang diambil melalui analisis gas buang, sehingga ditemukan 153,12 °C.
3. Temperatur *Sulfuric acid dew point corrosion* tersebut menyebabkan penipisan atau pengurangan ketebalan secara progresif hingga melebihi batas toleransi sebesar 1,35 milimeter yang dihitung menggunakan ASME B31.3 hingga ketebalan sisa *tube* sebesar 0,73 milimeter.
4. Temperatur kerja *tube air preheater* beroperasi dibawah *Sulfuric Acid Dew Point* sehingga mempercepat mekanisme *sulfuric acid dew point corrosion*.
5. Mekanisme *sulfuric acid dew point corrosion* terjadi ketika sulfur berikatan dengan oksigen serta uap air membentuk gas H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Dikarenakan gas H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> terkondensasi pada temperatur 153,12 °C dan berubah menjadi larutan asam sulfat, sedangkan temperatur dipermukaan luar *tube* adalah 99,82 °C maka terbentuklah produk korosi. Produk korosi ini terbentuk dikarenakan adanya reaksi antara larutan asam sulfat, uap air dan logam.
6. Produk korosi yang terbentuk pada permukaan luar *tube* yaitu *magnetite* atau Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, sedangkan produk korosi yang terbentuk antara permukaan dalam *tube* dengan udara yaitu *hematite* atau Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 5.2 Saran

Beberapa hal yang dapat disarankan untuk pencegahan dan penanganan kegagalan serupa adalah sebagai berikut :

1. Sistem kontrol dan pemeriksaan ketebalan pipa serta membersihkan kerak yang menempel di *outer surface* atau permukaan luar *tube air preheater* secara rutin agar dapat meminimalkan terjadinya kerusakan serupa.
2. Pada penelitian lebih lanjut diperlukan analisa yang lebih detail mengenai laju korosi pada *tube* sehingga dapat diketahui umur pipa akibat proses korosi.
3. Menggunakan *filter* udara agar udara yang melewati *tube air preheater* agar tidak menyebabkan adanya kotoran yang akan mengendap.

## DAFTAR PUSTAKA

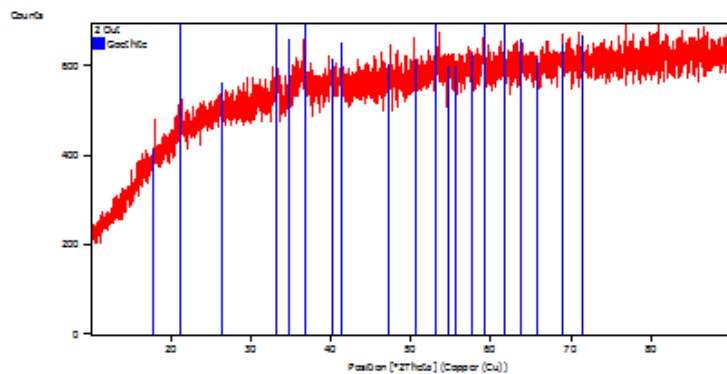
- [1] **3 Tahun Kinerja Sektor ESDM: Meningkatkan Rasio Elektrifikasi Menyediakan Listrik Bagi Seluruh Indonesia**  
<https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/3-tahun-kinerja-sektor-esdm-meningkatkan-rasio-elektrifikasi-menyediakan-listrik-bagi-seluruh-indonesia>  
diakses pada tanggal 20 Februari 2018
- [2] ASM handbook committee,. **Corrosion 9th edition**, American Society for Metal, Volume 13 2003
- [3] **ASTM A-213**
- [4] Basu, Prabir. 2015. **Circulating Fluidized Bed Boiler : Design, Operation and Maintenance**. Switzerland : Springer International Publishing
- [5] Basu, Prabir. 2015. **Pulverized Coal Boiler Unit** .Switzerland : Springer International Publishing
- [6] **Boiler Operation Manual**. Shaanxi Northwest Power generation CO. LTD
- [7] Dermawan, Aditya Alif. 2011. **Analisa Kegagalan Outer Pipe Burner Boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap Ditinjau dari Aspek Metalurgi**, Teknik Mesin ITS. Surabaya.
- [8] **Difference between Fire Tube Boiler and Water Tube Boiler**  
<http://www.mech4study.com/2016/03/difference-fire-tube-boiler-and-water-tube-boiler.html>  
Diakses 30 Maret 2018

- [9] Fong-Yuan Ma. **Corrosive Effects of Chlorides on Metals**. 2012
- [10] Fontana, Mars : **Corrosion Engineering, 2nd ed**, Mcgraw-Hill Book Company, New York, 1967
- [11] Heng Chen, Peiyuan Pan, Huaishuang Shao, Yungang Wang ↑ , Qinxin Zhao. **Corrosion and viscous ash deposition of a rotary air preheater in a coal-fired power plant** 2016.
- [12] J. Paul Guyer, **An Introduction to Steam Boilers and Turbines for Power Plants 2nd edition**. New Yorl : Continuing Education and Development, Inc. 2014
- [13] Jones, Denny A. 1992. **Principle and Prevention of Corrosion 2nd Edition**. USA : Pearson Education
- [14] Jones, Loyd W. : **Corrosion and Water Technology for petroleum Producers**. OGCI Publication Tulsa, 1988
- [15] Lawrence P. Belo, Reinhold Spornl, Kalpit V.Shah . **Sulfur Capture by fly ash in air and oxy fuel pulverized fuel combustion**.2014
- [16] M.Nageswara rao **Improving the Overall heat transfer coefficient of an Air Preheater by Design, Fabrication and CFD Analysis..** 2016
- [17] Mehta, Kushal. 2015. **Sugarcane-Peanut Bagasse : As A Conventional Boiler Fuel**. Mechanical Engineering Department, Indus Institute of Technology and Engineering. Ahmedabad.

- [18] National Association of Corrosion Engineer (NACE) : **Basic Corrosion course** 2400 W,.Loop South Houston Texas 77027
- [19] Pronobis, Marek. 2013. **The impact of Coal Characteristics on the fouling of stroker-fired boiler Convection Surface.** Silesian University of Technology. Poland.
- [20] **Rasio Elektrifikasi, Papua dan NTT Terendah di Indonesia**  
<https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2017/06/21/rasio-elektrifikasi-papua-dan-ntt-terendah-di-indonesia>  
Diakses pada 20 Februari 2018
- [21] Roberge, Pierre R. 2000.**Handbook of Corrosion Engineering.** New York : Mc Graw Hill
- [22] Shayan, M. R., Ranjbar, K., Hajidavallo, E., heidari Kydan, A. (2015). **On the Failure Analysis of an Air Preheater in a Steam Power Plant.** Materials Science and engineering Departemen, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahva. Iran.
- [23] **Taijune Boiler.** Taijune Enterprise co.ltd. China, China SCL. 2009.
- [24] Vainio Emil, Tor Lauren, Nikolai demartini. **Understanding low temperature Corrosion in Recovery Boiler : Risk od Sulphuric acid dew point**

## LAMPIRAN

**Main Graphics, Analyze View:** (Bookmark 2)

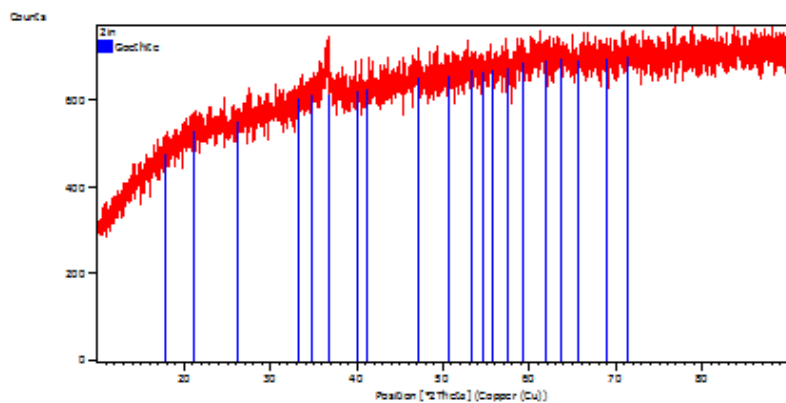


**Peak List:** (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21.2342	71.66	0.2007	4.18431	100.00
33.1990	39.52	0.5353	2.69861	55.15
36.6410	58.67	0.2007	2.45262	81.87

**Pattern List:** (Bookmark 4)

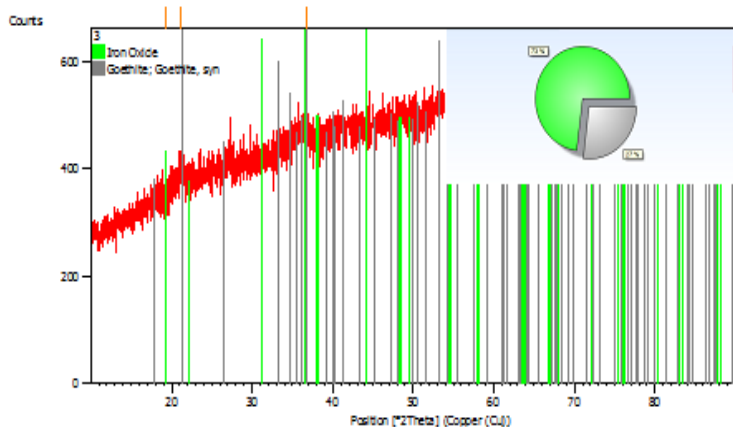
Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-001-0401	10	Iron Oxide Hydrate	-0.018	0.688	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O

**Main Graphics, Analyze View:** (Bookmark 2)**Peak List:** (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
36.4824	95.11	0.4896	2.46088	100.00

**Pattern List:** (Bookmark 4)

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-001-0401	No Matching Lines	Iron Oxide Hydrate	0.000	0.000	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O



**Peak List:** (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
19.2638	16.17	0.1004	4.60763	31.08
21.2715	36.05	0.5353	4.17706	69.29
36.6926	52.04	0.3346	2.44929	100.00

**Pattern List:** (Bookmark 4)

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-075-1609	7	Iron Oxide	1.073	0.954	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
*	01-076-7167	4	Iron Oxide Hydroxide	0.102	0.568	Fe O (OH)



Parameter : Sulphur  
 Test Number : 097/DPPS/03/2018  
 Sample Matrix : Solid

No.	Sample Name	Sample Code	Result	Unit	Method
1	Sampel 1	070318-0155	0,58	%w/w	AAS
2	Sampel 2	070318-0156	0,50		

Parameter : Chloride  
 Test Number : 098/DPPS/03/2018  
 Sample Matrix : Solid

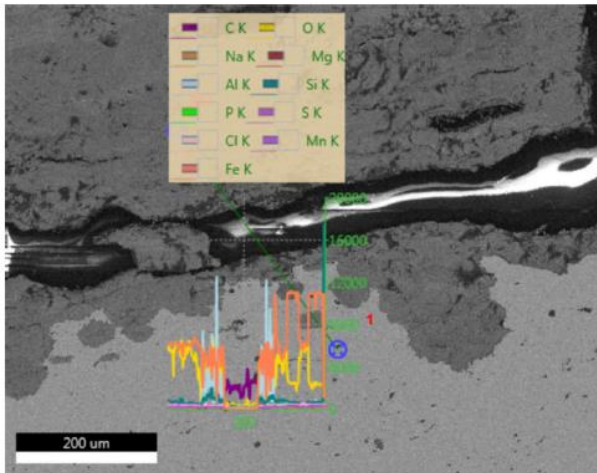
No.	Sample Name	Sample Code	Result	Unit	Method
1	Sampel 1	070318-0155	0,11	%w/w	AAS
2	Sampel 2	070318-0156	0,12		

Depok, March 16<sup>th</sup>, 2018

**Dr. Hedi Surahman, M.Si**  
**Lab UI-CHEM Departemen Kimia**  
**FMIPA Universitas Indonesia**

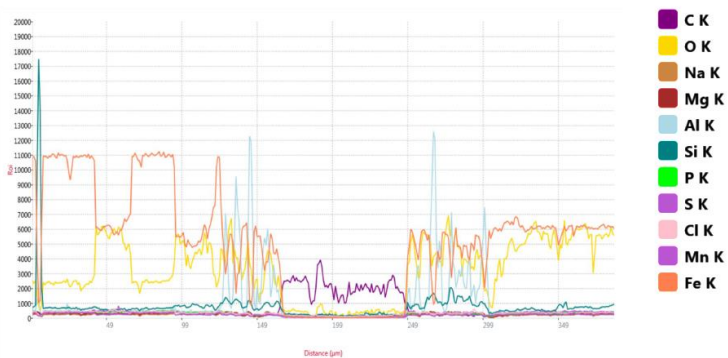
Author: Teknik Mesin FTI - ITS  
Creation: 06/22/2018 3:48:54 PM  
Sample Name: Amurang

## Area 1



### LineScan 1

Element profile plot



## BIODATA PENULIS



Yolanda Vivina Mithaya Sumartono, lahir di Ngawi pada tanggal 29 September 1996 merupakan anak pertama dari pasangan Agus Sumartono dan Susi Rahayu. Penulis memulai jenjang pendidikan di SD Negeri 018 (2002-2008), SMP Negeri 2 (2008-2011), SMA Negeri 1 (2011-2014), dan memutuskan melanjutkan pendidikan di bangku kuliah dengan mengambil Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik dan kemahasiswaan. Penulis aktif mengikuti kegiatan Laboratorium Metalurgi sebagai Asisten Praktikum. Serta penulis pernah menjadi Asisten Mata Kuliah Elemen Mesin I dan Kinematika Mekanisme.

Dalam bidang kemahasiswaan penulis pernah menjadi pengurus himpunan sebagai Staff Departemen Organisasi dan di tahun berikutnya menjadi Kepala Biro Keluarga Mahasiswa Mesin serta mengikuti kepanitian di berbagai event yang ada di Teknik Mesin. Penulis bertekad akan mengabdikan ilmu yang telah didapat serta senantiasa berbuat yang terbaik untuk Allah SWT serta orang-orang disekitar penulis. Untuk informasi dan masukan dapat menghubungi penulis melalui email [yolandavivina@gmail.com](mailto:yolandavivina@gmail.com).