



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 1585

**ANALISIS KEGAGALAN *BEND TUBE PREHEATER*
PADA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR***

R. SONY ENDARDO PUTRO
NRP 2112 100 020

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

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 1585

**ANALISIS KEGAGALAN *BEND TUBE PREHEATER*
PADA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR***

R. SONY ENDARDO PUTRO
NRP 2112 100 020

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

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TM 1585

FAILURE ANALYSIS OF BEND TUBE PREHEATER ON HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR

R. SONY ENDARDO PUTRO
NRP 2112 100 020

Supervisor
Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Industrial Technology Faculty
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS KEGAGALAN *BEND TUBE PREHEATER* PADA
*HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR***

TUGAS AKHIR

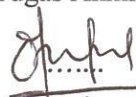



Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

R. SONY ENDARDO PUTRO

NRP. 2112 100 020

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Suwarno, ST., MSc., PhD.
(NIP. 198005202005011003)  (Pembimbing)
2. Dr. Eng Sutikno, ST., MT.
(NIP. 197407032000031001)  (Penguji I)
3. Indra Sidharta, ST., Msc.
(NIP. 198006192006041004)  (Penguji II)
4. Wahyu Wijanarko, ST., MSc.
(NIP. 198202092012121001)  (Penguji III)

SURABAYA

NOVEMBER, 2016



ABSTRAK

ANALISIS KEGAGALAN *BEND TUBE PREHEATER* PADA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR*

Nama Mahasiswa : R. Sony Endardo Putro
NRP : 2112 100 020
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D

Abstrak

Berdasarkan data Kementerian Energi Sumber Daya dan Mineral (KESDM) pada tahun 2016, konsumsi listrik di Indonesia meningkat setiap tahunnya. Kenaikan konsumsi listrik tersebut harus didukung dengan kenaikan produksi listrik. Persentase pembangkitan daya listrik terbesar kedua dimiliki oleh Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) sebesar 26%. PLTGU menggunakan siklus gabungan antara siklus rankine pada siklus turbin uap dengan siklus brayton pada siklus turbin gas. Salah satu komponen pada PLTGU adalah *heat recovery steam generator* (HRSG), HRSG berfungsi untuk memanfaatkan panas dari gas buang sisa pembakaran turbin gas untuk memanaskan air yang ada pada siklus rankine. HRSG memiliki empat tahapan besar yaitu *preheater*, *economizer*, *evaporator*, dan *superheater*. Pada penelitian ini, terjadi kegagalan berupa penipisan pada *bend tube preheater* yang melebihi batas toleransi. Sehingga, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui penyebab terjadinya kegagalan pada *bend tube preheater* HRSG dan untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan pada *bend tube preheater* HRSG.

Tahapan pengujian pada penelitian analisis kegagalan ini dilakukan dengan melakukan pengamatan makroskopis pada spesimen dengan cara *visual inspection*, dilakukan 3D *scanning* pada setiap spesimen, kemudian spesimen dipotong menjadi beberapa sampel untuk dilakukan pengukuran dimensi, lalu spesimen dilakukan pengujian komposisi kimia dari produk korosi

dengan *X-Ray Powder Diffraction* (XRD) untuk mengetahui senyawa dari produk korosi, dan terakhir spesimen dilakukan pengujian *metallography*. Dari pengujian – pengujian tersebut, didapatkan data berupa laju korosi lokal pada setiap titik pengukuran, senyawa yang terkandung pada produk korosi, dan ketebalan dari produk korosi.

Dari penelitian *failure analysis* ini diketahui penurunan ketebalan pada *bend tube preheater* terjadi akibat korosi permukaan dalam dan permukaan luar pipa. Korosi permukaan dalam pipa terjadi akibat reaksi antara air dengan logam Fe pada pipa. Korosi permukaan luar pipa terjadi akibat reaksi antara gas panas dengan logam Fe pada pipa. Penurunan ketebalan pipa terbesar terjadi pada daerah belokan *bend tube preheater* karena adanya deformasi berupa belokan pada pipa, sehingga menyebabkan penurunan *breakdown potential* secara lokal.

Kata kunci: analisa kegagalan, bend tube preheater, HRSG, korosi.

ABSTRACT

FAILURE ANALYSIS OF BEND TUBE PREHEATER ON HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR

Name : R. Sony Endardo Putro
NRP : 2112 100 020
Department : Mechanical Engineering
Supervisor : Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D

Abstract

From Energy and Minerals Resources Ministry (KESDM) on 2016, there are increment in electrical consumption every year. Increment in electrical consumption has also to be supported by increment in electrical production. The combined cycle power plant (PLTGU) is second largest percentage of electrical production held 26% of all electrical production in Indonesia. Combined cycle power plant has both Rankine cycle by using steam turbine and Brayton cycle by using gas turbine. One of the components in combined cycle power plant is heat recovery steam generator (HRSG), which serves as heat exchanger between hot gasses from gas turbine cycle and water from steam turbine cycle. There are four stages on HRSG, preheater, economizer, evaporator, and superheater. On this research, there is a case of thinning on bend tube preheater which exceed the tolerance limits, and so the purposes of this research are determine the cause of failure and determine the failure mechanism on bend tube preheater.

Research begins with visual inspection on specimens, 3D scanning on specimens, cutting specimen into several samples with same length, measuring on each sample, doing X-Ray Powder Diffraction (XRD) test on several sample to find the chemical composition of corrosion product, and metallographic test. From those various tests, we will be obtained several data which are local corrosion rate on every measurement points, chemical compound on corrosion product, and thickness on each sample.

Thinning of bend tube preheater occurred due to corrosion both from the inside surface and outside surface. Corrosion that occurred on the inside surface of bend tube preheater caused by reaction between water and metal surface of tube. Corrosion on the outside surface could be happen caused by reaction between hot gas and metal surface of tube. Largest thinning rate occurred on bend area of bend tube preheater caused by deformation itself, it induce local reduction of breakdown potential.

***Keywords:* failure analysis, bend tube preheater, HRSG, corrosion.**

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan segala berkah dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan tugas akhir ini.

Tugas akhir merupakan salah satu prasyarat yang harus dipenuhi sebelum menyelesaikan pendidikan di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Keberhasilan penulis dalam menyusun laporan tugas akhir ini tidak lepas dari berbagai pihak yang telah memberikan bantuan baik moral maupun material. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

- Ayah dan ibu tercinta, **Raden Danar Dono** dan **Rr. Catur Yastuti K.E.W**, sebagai motivator, mentor segala hal, dan sponsor utama. Terima kasih telah mengajari dan membimbing dalam sisi duniawi dan rohani. Mohon maaf atas keterlambatan penyelesaian kuliah.
- Kakak kandung dan keluarga, **Raden Chandra Ditya Pradana** dan **Nurul Sardwiyanti**, serta keponakan terlucu **Raden Satrio Akbar Rasyid**, terima kasih telah memberikan banyak semangat, bimbingan baik dalam hal akademis maupun non akademis, dan sponsor besar.
- Bapak **Suwarno S.T, M.Sc, Ph.D**, selaku dosen pembimbing tugas akhir. Terima kasih atas segala saran dan bimbingan untuk laporan tugas akhir saya dan arahan untuk melanjutkan kehidupan pasca perkuliahan.
- Bapak **Dr. Eng Sutikno S.T, M.T**, Bapak **Indra Sidharta S.T, M.Sc**, dan Bapak **Wahyu Wijanarko S.T, M.Sc** selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran untuk menyempurnakan penulisan tugas akhir ini.
- Bapak **Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab M.Sc** selaku dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingannya selama masa perkuliahan.

- Kepada yang tercinta, **Tsuraya Mona Kesuma Putri**, yang menjadi semangat dan membantu menyelesaikan penulisan tugas akhir ini dan perihal lainnya.
- Keluarga **Mesin ITS Autosport** khususnya **MAUT 12 (Jagang, Faiz, Bagus, Zikhrul, Bobo, Susu, Moses, Ricky)**, terima kasih atas segala bantuan, lelucon, dan hiburan. Semoga kita semua sukses.
- Taman hiburan yang bersembunyi sebagai **Laboratorium Metalurgi** dengan segala tawa dan fasilitas untuk mengerjakan pengujian pada tugas akhir ini.
- Rombongan Jemaah Haji Metalurgi wisuda-115 (**Amri, Afifah, Safaat, Gani, Tasa, Arale, Khisni, Esys, Chandra**), semoga amal dan kebaikan kita melancarkan segala urusan kita kedepannya. Semoga Rombongan Jemaah Umroh Metalurgi (**Arya, Wira, Oxi, Greg, Ridho, Zikhrul, dan lain - lain**) dapat segera menyusul.
- **Kelompok 16 POROS 2012** dan Kakang **Widyansyah Ritonga** selaku SC, terima kasih atas segala pembelajaran dan bimbingannya.
- **Kelompok 4 POROS 2015**, terima kasih sudah memberikan banyak pelajaran, semoga sukses perkuliahannya.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

Judul	
Halaman Pengesahan	
ABSTRAK.....	iv
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 DASAR TEORI	
2.1 <i>Heat Recovery Steam Generator</i>	5
2.2 <i>Preheater</i>	10
2.3 Korosi.....	13
2.3.1 <i>Uniform Corrosion</i>	16
2.3.2 <i>Erosion Corrosion</i>	17
2.3.3 <i>Pitting Corrosion</i>	17
2.3.4 <i>Crevice Corrosion</i>	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Spesimen <i>Bend Tube Preheater</i>	21
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	21
3.3 Alat dan Bahan.....	23
3.4 Langkah – Langkah Penelitian.....	24
3.4.1 Perumusan Masalah dan Tujuan.....	24
3.4.2 Studi Literatur.....	24
3.4.3 Pengamatan Makroskopis.....	24
3.4.4 <i>Scanning 3D</i>	25
3.4.5 Pengukuran Dimensi.....	25
3.4.6 Pengujian <i>Metallography</i>	27
3.4.7 Pengujian Komposisi Kimia dan Korosi.....	28

BAB 4 ANALISA DATA

4.1	<i>Bend Tube Preheater</i>	29
4.2	Analisa Visual <i>Bend Tube Preheater</i>	31
4.2.1	Permukaan Dalam <i>Bend Tube Preheater</i>	33
4.2.2	Permukaan Luar <i>Bend Tube Preheater</i>	33
4.3	Analisa Korosi.....	38
4.3.1	Permukaan Dalam <i>Bend Tube Preheater</i>	39
4.3.2	Permukaan Luar <i>Bend Tube Preheater</i>	41
4.3.3	Analisa Belokan Pada <i>Bend Tube Preheater</i>	42
4.3.4	Perhitungan Laju Korosi.....	44
4.4	Analisa <i>Microstructure</i>	47
BAB 5 Kesimpulan		
5.1	Kesimpulan.....	50
5.2	Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA		52

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	HRSG tipe vertical.....	2
Gambar 2.1	Mekanisme kerja <i>combined cycle</i> pada PLTGU.....	5
Gambar 2.2	Skema temperatur kerja pada HRSG PT PJB Gresik	7
Gambar 2.3	Siklus campuran turbin gas dan uap pada sistem pembangkit	9
Gambar 2.4	Desain dan tahapan proses HRSG	10
Gambar 2.5	Sketsa desain <i>feedwater drum</i> dan <i>bend tube preheater</i>	11
Gambar 2.6	Desain <i>feedwater drum</i> dan <i>bend tube preheater</i>	11
Gambar 2.7	Spesifikasi material yang digunakan pada HRSG	12
Gambar 2.8	Proses terjadinya korosi melalui elektrokimia.....	13
Gambar 2.9	Skema penyerangan <i>uniform corrosion</i>	16
Gambar 2.10	Skema penyerangan <i>erosion corrosion</i>	17
Gambar 2.11	Skema mekanisme <i>pitting corrosion</i>	18
Gambar 2.12	Skema penyerangan <i>crevice corrosion</i>	19
Gambar 2.13	Perbedaan anoda katoda dalam satu logam akibat <i>crevice corrosion</i>	19
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	23
Gambar 3.2	Bagian – bagian pemotongan pada spesimen 1A	26
Gambar 3.3	Pengukuran dimensi spesimen.....	26
Gambar 3.4	Hasil pengukuran dalam satuan millimeter	27
Gambar 4.1	Letak dan Arah Aliran Air dan Gas Panas dari <i>Bend Tube Preheater</i>	32

Gambar 4.2	Pembagian Sampel <i>Bend Tube Preheater</i>	33
Gambar 4.3	Pengukuran Ketebalan Sampel <i>Bend Tube Preheater</i>	34
Gambar 4.4	Hasil Pengukuran Ketebalan Spesimen 1A <i>Bend Tube Preheater</i> dalam millimeter	35
Gambar 4.5	Hasil Pengukuran Ketebalan Spesimen 1B <i>Bend Tube Preheater</i> dalam millimeter	35
Gambar 4.6	Hasil Pengukuran Ketebalan Spesimen 2A <i>Bend Tube Preheater</i> dalam millimeter	35
Gambar 4.7	Hasil Pengukuran Ketebalan Spesimen 2B <i>Bend Tube Preheater</i> dalam millimeter	35
Gambar 4.8	Sketsa 3D Ketebalan Spesimen 1A	36
Gambar 4.9	Sketsa 3D Ketebalan Spesimen 1B.....	37
Gambar 4.10	Sketsa 3D Ketebalan Spesimen 2A	37
Gambar 4.11	Sketsa 3D Ketebalan Spesimen 2B	37
Gambar 4.12	Diagram Pourbaix Pada Besi	38
Gambar 4.13	Hasil Pengujian XRD Pada Permukaan Dalam <i>Bend Tube Preheater</i>	39
Gambar 4.14	Hasil Pengujian XRD Pada Permukaan Luar <i>Bend Tube Preheater</i>	41
Gambar 4.15	Mekanisme Pembentukan Lapisan Oksida Pada Temperatur Tinggi.....	42
Gambar 4.16	Diagram Aktif – Pasif.....	43
Gambar 4.17	Analisa <i>microstructure</i> dengan perbesaran 50x	47
Gambar 4.18	Analisa <i>microstructure</i> dengan perbesaran 500x, (a) permukaan dalam pipa, (b) permukaan luar pipa	48
Gambar 4.19	Analisa <i>Microstructure</i> Dengan Perbesaran 1000x	48

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi HRSG PLTGU PJB Gresik.....	6
Tabel 3.1 Spesifikasi Spesimen.....	21
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Material Berdasarkan DIN 171777-79.....	29
Tabel 4.2 Data <i>Bend Tube Preheater</i>	29
Tabel 4.3 Komposisi Kimia Gas Alam.....	31
Tabel 4.4 Perbandingan Ketebalan dan Laju Korosi Setiap Spesimen.....	45
Tabel 4.5 Perbandingan Penurunan Ketebalan Pipa Rata – Rata Pada Permukaan Luar dan Dalam.....	46
Tabel 4.6 Perbandingan Nilai Laju Korosi Pada Logam Paduan Baja dan Nickel.....	29

BAB I
PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) (2016), menjelaskan jika konsumsi listrik di Indonesia terus meningkat sebesar 2% setiap tahunnya. Kenaikan konsumsi listrik tersebut harus didukung dengan kenaikan produksi listrik. Untuk meningkatkan produksi listrik, dapat dilakukan dengan dua cara yaitu penambahan jumlah pembangkit listrik atau meningkatkan efisiensi dari pembangkit listrik yang sudah ada. Pembangunan sistem pembangkit listrik yang baru membutuhkan proses yang lebih lama dan sulit dibandingkan dengan meningkatkan efisiensi dari pembangkit listrik yang sudah ada. Nilai efisiensi dari pembangkit listrik dapat dibuat stabil dengan perawatan rutin atau dikenal dengan proses *maintenance*.

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) merupakan siklus gabungan antara Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Gabungan siklus pada PLTGU memberikan dampak yang cukup besar, yaitu kenaikan efisiensi thermal serta *output* daya yang lebih besar dibandingkan hanya PLTU atau PLTG. Hal tersebut dapat mengatasi permasalahan kebutuhan listrik yang semakin meningkat.

PLTGU menggunakan siklus gabungan antara siklus rankine pada siklus turbin uap dengan siklus brayton pada siklus turbin gas. Salah satu komponen pada PLTGU adalah *heat recovery steam generator* (HRSG), HRSG berfungsi untuk memanfaatkan panas dari gas buang sisa pembakaran turbin gas untuk memanaskan air yang ada pada siklus rankine. Berdasarkan aliran gas panas sisa pembuangan turbin gas, terdapat dua tipe HRSG yaitu horizontal dan vertikal. HRSG horizontal memiliki susunan jalur gas buang horizontal dengan tabung penukar panas yang disusun secara vertikal, sedangkan HRSG vertikal memiliki susunan jalur gas

buang vertikal dengan tabung penukar panas yang disusun secara horizontal.



Gambar 1.1 HRSG tipe vertikal[1]

HRSG terdiri dari beberapa tahapan yang akan dilalui oleh air dari siklus turbin uap. Air dari *feedback water* akan mengalir menuju tahapan pertama yaitu *preheater*, dimana pada tahapan *preheater* panas dari gas buang sisa pembakaran gas turbin akan menaikkan temperatur air. Kemudian air akan menuju *economizer*, dimana air akan diberi panas lebih agar temperatur air akan mendekati temperatur titik didihnya. Setelah itu air akan memasuki tahap *evaporator*, pada tahap ini air akan berubah bentuk menjadi uap. Lalu uap tersebut akan diberikan panas untuk menjadi *superheated vapor* dengan fase uap jenuh.

Salah satu komponen HRSG yang mengalami kegagalan terdapat pada bagian *preheater*. *Preheater* sendiri berfungsi sebagai tahap awal untuk memanaskan hingga temperatur 50°C. Dalam kasus ini, ditemukan kegagalan pada *bend tube preheater* berupa penipisan atau pengurangan ketebalan pipa hingga melebihi

batas toleransi sebesar 1,74 milimeter. Jika hal tersebut diabaikan, dapat menimbulkan masalah yang lebih besar berupa kebocoran pada *bend tube preheater* yang dapat menyebabkan seluruh sistem HRSG *shut down*. Oleh karena itu perlu diadakan penelitian analisa kegagalan (*failure analysis*) untuk menghindari kasus kegagalan yang sama.

1.2. Perumusan Masalah

Ketika proses *maintenance*, ditemukan kegagalan pada *bend tube preheater* berupa penipisan atau pengurangan diameter pipa hingga melebihi batas toleransi yang sudah ditetapkan yaitu 1,74 milimeter. Dengan penggunaan *bend tube preheater* semenjak tahun 1992, kegagalan berupa penipisan ketebalan pipa *preheater* memang selalu terjadi pada setiap kegiatan *maintenance*, namun selalu dalam batas toleransi. Pada kegagalan yang terjadi sekarang, ketebalan sisa pipa mencapai 0,7 milimeter, sehingga dibutuhkan penggantian dengan pipa baru.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian analisa kegagalan ini adalah:

1. Untuk mengetahui penyebab terjadinya kegagalan berupa penipisan pada *bend tube preheater* HRSG.
2. Untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan pada *bend tube preheater* HRSG.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dan asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Komponen *bend tube preheater* memiliki komposisi kimia yang homogen dan tidak memiliki cacat awal.
2. Desain awal *bend tube preheater* pada HRSG telah sesuai standar spesifikasi.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian analisa kegagalan ini adalah:

1. Bagi perusahaan listrik 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 diaplikasikan untuk menangani kasus kegagalan serupa.
3. Terjalin hubungan yang baik antara institusi pendidikan dengan instansi perusahaan.

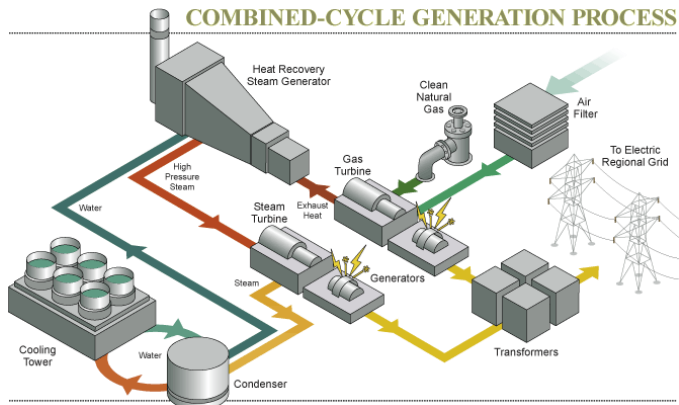
BAB II

DASAR TEORI

BAB II DASAR TEORI

2.1. *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*

Heat Recovery Steam Generator (HRSG) adalah komponen utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU), yaitu pembangkitan listrik dengan menggunakan *combined cycle* dari turbin gas dan turbin uap. Mekanisme kerja dari HRSG yaitu memanfaatkan energi panas sisa gas buang dari turbin gas untuk memanaskan air dan mengubahnya menjadi uap yang selanjutnya digunakan untuk memutar turbin uap.



Gambar 2.1 Mekanisme kerja *combined cycle* pada PLTGU[2]

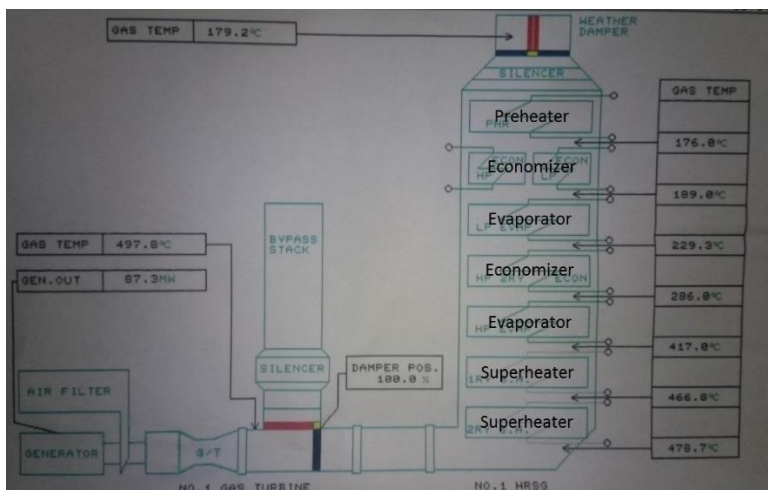
Berdasarkan aliran gas panas sisa pembakaran turbin gas, HRSG dapat dibagi menjadi dua, yaitu vertikal dan horizontal. Perbedaan mendasar dari tipe vertikal dan horizontal dapat dilihat dari aliran gas panas dan susunan tabung penukar panas seperti pada gambar 1.1. Pada HRSG tipe vertikal (gambar 1.1) memiliki jalur untuk aliran gas panas secara vertikal, namun dengan tabung – tabung penukar kalor yang disusun secara horizontal. Pada

HRSG tipe horizontal memiliki jalur aliran gas panas secara horizontal dengan susunan tabung – tabung penukar kalor yang disusun secara vertical.

Berikut ini merupakan spesifikasi HRSG yang digunakan oleh PT PJB Gresik.

Tabel 2.1 Spesifikasi HRSG PLTGU PJB Gresik

Merk Pabrik	CMI, Belgium
Type	Vertical Gas Flow Up Word Circulation Dual Press
Kemampuan Penguapan	HP = 18,1 ton/h LP = 48,5 ton/h
Limit Tekanan Uap	HP = 75,5 kg/cm ² LP = 5,4 kg/cm ²
Limit Temperatur Uap	HP = 5070 °C ; LP = saturation
Jumlah Gas	1500 ton/h
Temperatur Gas	Input = 532 °C Output = 99°C



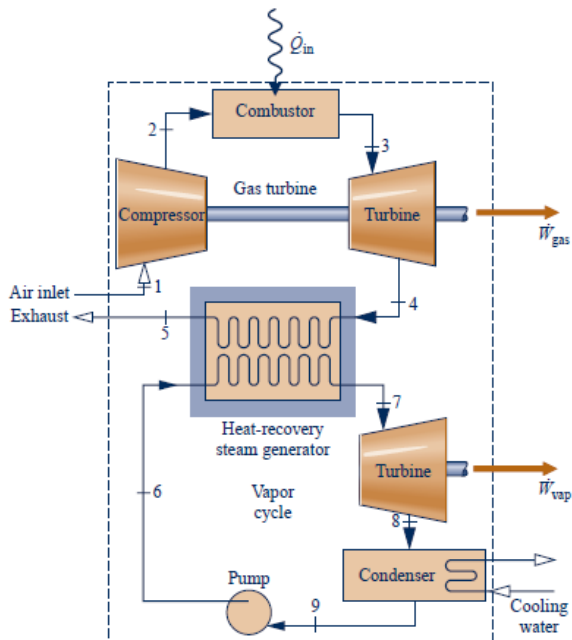
Gambar 2.2 Skema temperatur kerja pada HRSG PT PJB Gresik

Bagian – bagian yang ada pada gambar 2.2 dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *Preheater*
Preheater berada pada bagian akhir (tipe horizontal) atau paling atas (tipe vertikal) dari HRSG untuk menyerap energi sisa terendah dari gas buang. *Preheater* berfungsi sebagai pemanas air yang berasal dari *feedback water* sebelum diuapkan pada *economizer* dengan memanfaatkan gas sisa buang yang nantinya dialirkan melalui *main exhaust stack*.
2. *Economizer*
Economizer berfungsi sebagai pemanasan lanjutan setelah air melalui *preheater* sehingga air mencapai titik didihnya yang kemudian masuk ke *evaporator*.
3. *Evaporator*
Evaporator berfungsi sebagai alat penukar kalor yang menghasilkan uap jenuh (*saturated*) dari air yang sudah dipanaskan melalui proses pada tahap *preheater* dan *economizer*.

4. *Superheater*
Superheater merupakan alat penukar kalor pada HRSG untuk menghasilkan uap panas lanjut (*superheated steam*) dari uap jenuh yang setelah di proses pada *evaporator*.
5. *Exhaust Damper*
Exhaust damper berfungsi untuk mengalirkan gas panas dari *exhaust* turbin gas menuju HRSG.
6. *Bypass Damper*
Bypass damper berfungsi untuk mengalirkan gas panas dari *exhaust* turbin gas ke udara bebas.

Dalam pembahasan pembangkitan daya listrik, jenis *combined cycle power plant* menggabungkan dua sistem pembangkitan. Dimana dalam *combined cycle* penggunaan ulang energi panas sisa gas pembakaran dari salah satu siklus digunakan untuk membantu proses pemanasan siklus yang lainnya. Dua siklus berbeda yang umumnya digunakan sebagai *combined cycle power plant* adalah siklus brayton (menggunakan turbin gas) dan siklus rankine (menggunakan turbin uap). Turbin gas memiliki sisa energi panas yang tinggi dan turbin uap membutuhkan energi panas yang tidak terlalu besar[3], sehingga sisa energi panas dari turbin gas digunakan untuk membantu pemanasan dalam siklus turbin uap.



Gambar 2.3 Siklus campuran turbin gas dan uap pada sistem pembangkit[4]

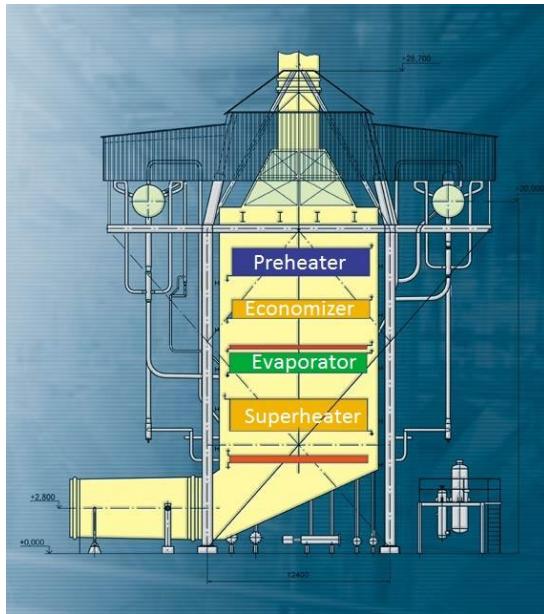
Keuntungan menggunakan *combined cycle* adalah meningkatnya nilai efisiensi berdasarkan persamaan 2.1

$$\eta = \frac{W_{gas} + W_{vap}}{Q_{in}} \dots \dots \dots (2.1)$$

Pada persamaan 2.1 diketahui jika W_{gas} adalah daya bersih yang dihasilkan oleh siklus gas, W_{vap} adalah daya bersih yang dihasilkan oleh siklus uap, sedangkan Q_{in} adalah laju energi panas yang dibutuhkan untuk *combined cycle*.

2.2. Preheater

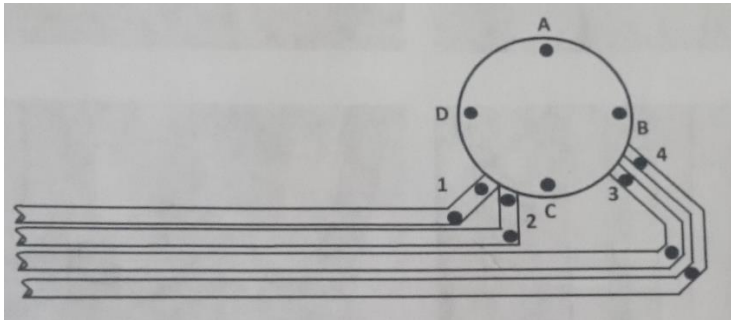
Aliran sisa gas panas dari pembakaran gas turbin melewati HRSG dan dibuang melalui *stag*. Temperature sisa gas panas terbesar berada pada daerah *exhaust* dari turbin gas, sedangkan temperature terendah berada pada daerah *stag* seperti pada gambar 2.4. Aliran air dari *feedback water* memiliki arah yang terbalik dari arah sisa gas buang turbin gas, sehingga air akan melalui daerah *stag* terlebih dahulu dan mengalir menuju ke daerah *exhaust* dari turbin gas untuk proses pemanasan yang terus menerus hingga air berubah menjadi uap panas lanjut (*superheated vapor*).



Gambar 2.4 Desain dan tahapan proses HRSG[5]

Proses *preheater* memegang peranan penting dalam HRSG, yaitu sebagai pemanasan awal air. Jika proses *preheating* dapat memiliki nilai efisiensi yang tinggi, maka tahap *economizer* dapat diminimalisasikan. Selain itu peranan *preheater* adalah sebagai

arah aliran utama air dari *feedwater drum*, sehingga bila ada kegagalan seperti penipisan pada pipa dan menyebabkan kebocoran, seluruh sistem turbin uap dapat mengalami *shutdown*.



Gambar 2.5 Sketsa desain *feedwater drum* dan *bend tube preheater*



Gambar 2.6 Desain *feedwater drum* dan *bend tube preheater*[6]

Desain *feedwater drum* dengan *bend tube preheater* bisa beragam, namun arah alirannya tetap yaitu dari *feedwater drum* menuju *bend tube preheater*. Fluida yang dialirkan adalah air

dengan kondisi fase cair jenuh dengan kecepatan aliran massa fluida sebesar 1500 ton per jam. Kecepatan aliran dari fluida di dalam pipa juga masuk dalam sistem kontrol, karena dengan kecepatan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan turbulen pada aliran. Kecepatan aliran yang terlalu rendah juga dapat menurunkan nilai perpindahan panas yang terjadi pada tahapan *preheater*.

NO	TUBE	UKURAN	MATERIAL	KETERANGAN
1	PREHEATER	Ø 38 X 2.9	ST.37.8 I	
2	LP ECO	Ø 31.8 X 2.9	ST.37.8 I	ADA BENTUK U
3	LP EVA	Ø 38 X 2.9	ST.37.8 I	
4	HP ECO -1	Ø 31.8 X 3.2	ST.37.8 III	s/c 237214 (rood)
5	HP ECO -2	Ø 31.8 X 3.2	ST.37.8 III	
6	HP EVA	Ø 31.8 X 3.2	ST.37.8 III	
7	SH -1	Ø 31.8 X 3	13 CrMo44	
8	SH -2	Ø 31.8 X 3	10 CrMo9.10	

Gambar 2.7 Spesifikasi material yang digunakan pada HRSG

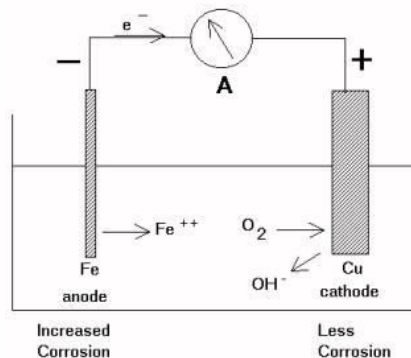
Material yang digunakan pada tahapan – tahapan HRSG seperti *preheater*, *economizer*, dan *evaporator* menggunakan standar DIN atau *Deutsches Institut für Normung*. Sedangkan material yang digunakan pada *superheater* merupakan jenis material yang khusus karena digunakan pada suhu dan tekanan yang tinggi.

Dalam standar DIN 17177 menjelaskan jika material yang tergolong jenis ST 37.8 merupakan material logam paduan besi dengan komposisi kimia karbon (C) sebesar 0.17%, silicon (Si) sebesar 0.10 hingga 0.35%, mangan (Mn) sebesar 0.4 hingga 0.8%, fosfor (P) sebesar 0.04%, dan sulfur (S) sebesar 0.04%. Selain itu dalam standar DIN 17177 juga menjelaskan jika material ST 37.8 memiliki *yield point* sebesar 235 MPa dan *tensile strength* sebesar 360 hingga 480 MPa. Material DIN ST 37.8 setara dengan material JIS STPT370 dan ASTM A178 Grade A.

2.3. Korosi

Korosi merupakan proses perusakan atau penurunan kualitas suatu logam karena adanya interaksi dengan lingkungannya. Oleh karena itu korosi tidak dapat dihentikan, namun dapat dikendalikan. Proses korosi terjadi secara kimiawi, bukan karena proses mekanik murni. Pengertian lain dari korosi adalah kebalikan dari proses ekstraksi metalurgi.

Untuk terjadinya proses korosi basah (*wet corrosion*) pada suatu logam dibutuhkan adanya beda potensial antara dua logam yang terhubung secara elektronik dan elektrolit. Oleh karena itu, proses korosi melibatkan perubahan dan pertukaran energi. Di alam, logam memiliki tingkat energi yang paling rendah, kemudian logam mengalami berbagai macam proses yang dapat menaikkan tingkat energi yang dimilikinya. Proses *machining* untuk membentuk logam yang siap digunakan pada kehidupan sehari-hari dapat menurunkan tingkat energi logam tersebut, sehingga logam tersebut mencoba untuk menaikkan kembali tingkat energi yang memacu terjadinya proses korosi.



Gambar 2.8 Proses terjadinya korosi melalui elektrokimia[7]

Proses korosi berkaitan dengan energi bebas Gibbs, nilai energi bebas Gibbs dapat ditentukan dengan persamaan 2.2[8]

$$G = H - TS \dots\dots\dots(2.2)$$

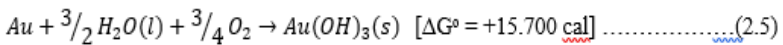
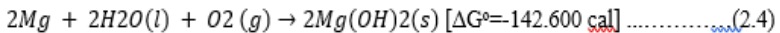
Dimana : G = Energi bebas Gibbs
 H = Entalpi
 T = Temperatur
 S = Entropi

Energi bebas Gibbs sulit diukur, namun perubahannya setara dengan potensial oksida material seperti pada persamaan 2.3

$$\Delta G = - n F E \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana : ΔG = Perubahan energi bebas Gibbs (Joule)
 N = Jumlah elektron per mol produk
 F = Bilangan Faraday (96500 Coloumb/equivalent)
 E = Potensial oksidasi (volt)

Perubahan energi bebas Gibbs dari reaktan (zat sebelum bereaksi) menjadi produk (zat yang terbentuk dari reaksi) yang memiliki nilai kurang dari nol ($\Delta G < 0$) menunjukkan reaksi spontan. Proses korosi merupakan proses spontan, sehingga proses korosi memiliki nilai perubahan energi bebas Gibbs kurang dari nol. Hal ini dapat dipahami bahwa produk hasil reaksi memiliki energi bebas Gibbs lebih rendah dari reaktan. Apabila $\Delta G > 0$ menunjukkan reaksi tersebut membutuhkan energi untuk berlangsung. Sedangkan reaksi yang memiliki $\Delta G = 0$ menunjukkan reaksi terjadi secara setimbang dua arah. Reaksi yang berlangsung dua arah memiliki pengertian produk juga 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[9].

Untuk korosi basah, terjadi apabila terdapat dua elektroda yang memiliki beda potensial dan terhubung secara elektronik dan elektrolit. Gambar 2.8 dapat digambarkan sebagai *wet corrosion* antara baja (*steel*) dengan tembaga (*copper*), dimana baja sebagai anoda dan tembaga sebagai katoda serta dihubungkan secara fisik dengan konduktor sebagai penghubung elektronik dan keduanya kontak langsung dengan air sebagai penghubung elektrolit. Secara umum ada 4 syarat yang harus dipenuhi untuk terjadinya sebuah korosi basah, yaitu:

- Anoda
 1. Elektroda tempat terjadinya reaksi oksidasi (pelepasan elektron).
 2. Elektroda yang menyerap anion dari elektrolit.
- Katoda
 1. Elektroda tempat terjadinya reaksi reduksi (penangkapan elektron).
 2. Elektroda yang menyerap kation dari elektrolit.
- Larutan elektrolit
Elektrolit adalah larutan yang memiliki ion – ion yang dapat bereaksi dengan elektroda.
- Konduktor
Konduktor adalah suatu material atau logam yang dapat menghantarkan aliran elektron.

Dengan mengambil kasus masalah korosi pada *bend tube preheater* HRSG dengan air yang mengalir di dalam pipa sebagai media korosifnya, jenis penyerangan korosi dapat dibagi menjadi:

1. *Uniform corrosion*
2. *Erosion corrosion*
3. *Pitting corrosion*
4. *Crevice corrosion*

2.3.1. *Uniform Corrosion*

Uniform corrosion atau *uniform attack* adalah jenis penyerangan korosi suatu logam yang seluruh permukaannya mengalami kontak langsung dengan media korosifnya. Dalam *uniform corrosion* ini, seluruh permukaan logam harus kontak langsung dengan media korosifnya dan dari aspek metalurgi dan komposisi dari logam tersebut harus *uniform*. Penipisan pada *uniform corrosion* memiliki laju yang sama pada seluruh permukaan logam yang mengalami kontak langsung dengan media korosif seperti pada gambar 2.9.

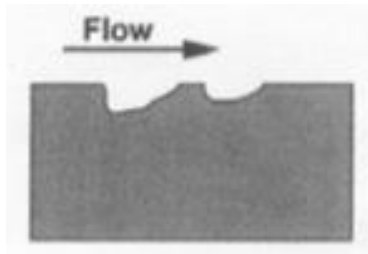


Gambar 2.9 Skema penyerangan *uniform corrosion*[10]

Uniform corrosion memiliki penyerangan yang paling ideal dibandingkan yang lainnya, karena kondisi peralatan dan lingkungan kerja yang *uniform* jarang terjadi pada kehidupan nyata. Namun, penyerangan jenis ini dapat terlihat hanya dengan *visual inspection* dan mudah diprediksikan dibandingkan penyerangan lokal. Sebagai contoh adalah korosi yang terjadi pada baja dalam larutan asam dengan tekanan atmosfer.

2.3.2. *Erosion Corrosion*

Erosion corrosion adalah salah satu jenis dari penyerangan lokal atau *local corrosion*. *Erosion corrosion* merupakan penyerangan yang terjadi karena kombinasi antara larutan korosif dengan kecepatan aliran yang tinggi. Kecepatan aliran yang rendah atau stagnan tetap dapat menyebabkan korosi, namun dengan kecepatan aliran yang tinggi dapat mengikis logam secara langsung dan menyebabkan larutan korosif membawa partikel – partikel logam yang bersifat abrasif.



Gambar 2.10 Skema penyerangan *erosion corrosion*[10]

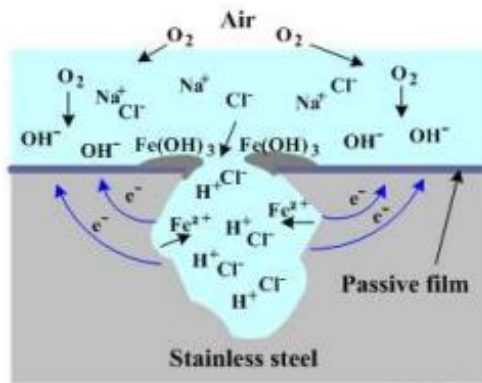
Erosion corrosion bermula dari kecepatan aliran yang tinggi sehingga mengikis *oxide layer* dari logam. Karena logam tidak dapat membentuk *oxide layer* pengganti dengan cepat dan proses pengikisan yang disebabkan dari kecepatan aliran yang tinggi terus terjadi, sehingga logam kontak secara langsung dengan larutan tersebut dan mempercepat proses korosi dari logam tersebut. Adanya suspensi pada larutan yang mengalir seperti pasir dapat meningkatkan dampak erosi dari aliran larutan.

2.3.3. *Pitting Corrosion*

Pitting corrosion atau korosi lubang merupakan korosi lokal yang terjadi pada suatu logam akibat penyerangan pada *oxide layer*. *Oxide layer* atau lapisan oksida merupakan produk korosi dari suatu logam yang bersifat melindungi logam tersebut. Lapisan *oxide layer* memiliki *properties* yang berbeda dengan logamnya,

jika dilihat dari sisi kerapatan, *oxide layer* memiliki kerapatan yang lebih kecil dibandingkan logam. Selain itu beberapa *oxide layer* memiliki ciri – ciri *porous* atau berpori.

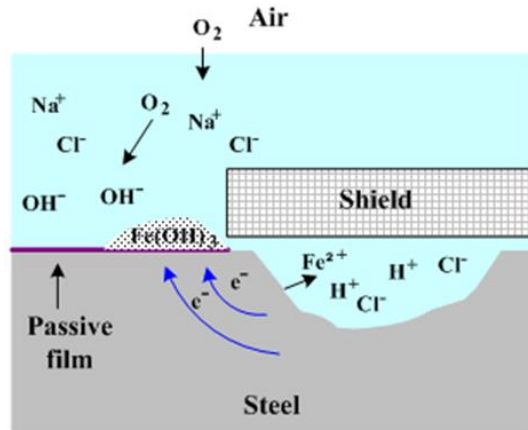
Dengan lapisan oksida yang berpori, logam tersebut memiliki kerentanan terhadap *pitting corrosion*. Jika suatu media korosif dalam jenis larutan mengalir dan terjebak dalam pori – pori *oxide layer* tersebut, dapat memulai proses *pitting corrosion*, dimana logam akan menjadi anoda dan *oxide layer* menjadi katoda.



Gambar 2.11 Skema mekanisme *pitting corrosion*[11]

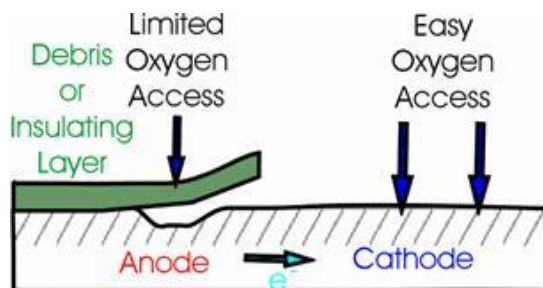
2.3.4. Crevice Corrosion

Crevice corrosion atau korosi celah merupakan korosi lokal yang terjadi pada suatu logam yang diakibatkan oleh adanya celah. Celah yang dimaksud pada *crevice corrosion* adalah celah yang terbentuk akibat penyambungan dua material yang tidak sempurna. Celah pada *crevice corrosion* mengakibatkan media korosif (dalam kasus ini larutan) masuk ke celah, sehingga permukaan logam yang terdapat pada celah mengalami korosi seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Skema penyerangan *crevice corrosion*[12]

Proses korosi dari permukaan logam yang terdapat pada celah menghasilkan elektron dan ion logam. Ion logam tersebut akan berikatan dengan anion yang terdapat pada larutan yang stagnan di celah, sedangkan elektron berpindah ke permukaan logam yang kaya akan kation. Sehingga terjadi perbedaan antara luasan anoda dan katoda dalam satu logam seperti pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Perbedaan anoda katoda dalam satu logam akibat *crevice corrosion*[13]

Dengan luasan anoda yang jauh lebih kecil dibandingkan luasan katoda, proses korosi berjalan sangat cepat. Karena elektron dari luasan anoda yang kecil selalu bergerak untuk memenuhi kebutuhan transfer elektron dari luasan katoda yang besar. Dari gambar 2.8 diketahui dalam proses korosi jika suatu logam anoda, akan memberikan elektron ke katoda dan disertai dengan pelepasan ion logam, sehingga logam akan terus terkikis akibat proses korosi tersebut.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Spesimen *Bend Tube Preheater*

Material yang menjadi spesimen pada penelitian *failure analysis* ini adalah *bend tube* pada tahap *preheater* di HRSG. Spesimen merupakan *bend tube preheater* yang digunakan oleh PT. PJB Gresik dengan *maintenance* setiap 8000 jam kerja. Spesimen menggunakan material dengan standar DIN 17177 dengan Grade St 37.8 atau setara dengan standar ASTM A178 Grade A.

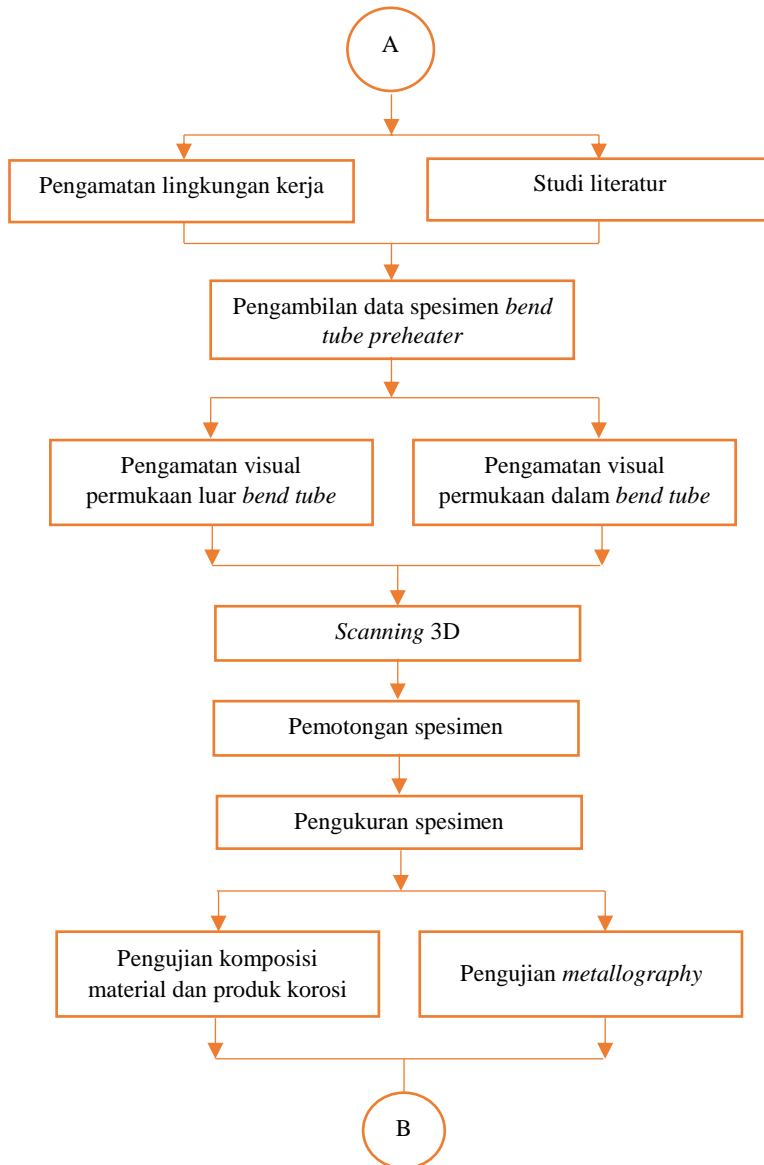
Tabel 3.1 Spesifikasi Spesimen[14]

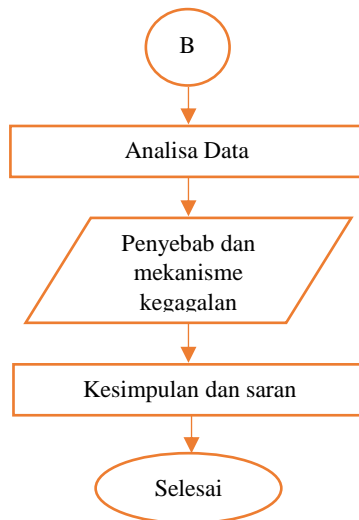
Grade	Chemical Composition (%)					Tensile Test (MPa)	
	C	Si	Mn	P	S	Min Yield Point	Tensile Strength
St 37.8	0,17 max	0,1 – 0,35	0,4 – 0,8	0,04 max	0,04 max	235	360 - 480

3.2. Diagram Alir Penelitian

Langkah - langkah penelitian yang dilakukan dapat digambarkan dengan diagram alir seperti dibawah ini.







Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.3. Alat dan Bahan

Peralatan yang dibutuhkan untuk melakukan pengujian *failure analysis*, adalah:

1. Gergaji tangan
2. Kertas amplas (*grid* 80, 120, 240, 360, 400, 600, 800, 1000, 1500, dan 2000)
3. Kain beludru
4. Serbuk alumina
5. Penggaris / mistar ketelitian 0.1 mm
6. Jangka sorong ketelitian 0.02 mm

Peralatan yang digunakan untuk melakukan pengujian pada *failure analysis*, adalah

1. Mesin *scanning* 3D Craform HandySCAN 700
2. Mesin uji komposisi kimia XRD
3. Mikroskop elektronik

3.4. Langkah – Langkah Penelitian

Langkah – langkah penelitian *failure analysis* untuk tugas akhir adalah sebagai berikut:

3.4.1. Perumusan Masalah dan Tujuan

Perumusan masalah didapatkan setelah melakukan kunjungan ke perusahaan untuk melihat kondisi lingkungan dan keadaan kerja spesimen. Selain itu dapat diketahui batasan batasan dan ruang lingkup penelitian. Tujuan merupakan jawaban untuk menjawab perumusan masalah yang didapatkan.

3.4.2. Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses yang dilakukan untuk mencari informasi yang dapat membantu menjawab pertanyaan yang didapatkan dari perumusan masalah. Informasi yang dicari dapat berupa dasar teori atau penelitian sebelumnya yang memiliki permasalahan yang sama namun dalam kasus yang berbeda. Studi literatur dapat dilakukan terus menerus hingga penelitian selesai.

3.4.3. Pengamatan Makroskopis

Pengamatan makroskopis adalah pengamatan *visual* yang dilakukan pada spesimen dengan tujuan untuk menemukan kecacatan yang terlihat tanpa alat bantu. Selain itu dalam pengamatan makroskopis juga mencari informasi terkait korosi dan produk korosi yang terjadi pada

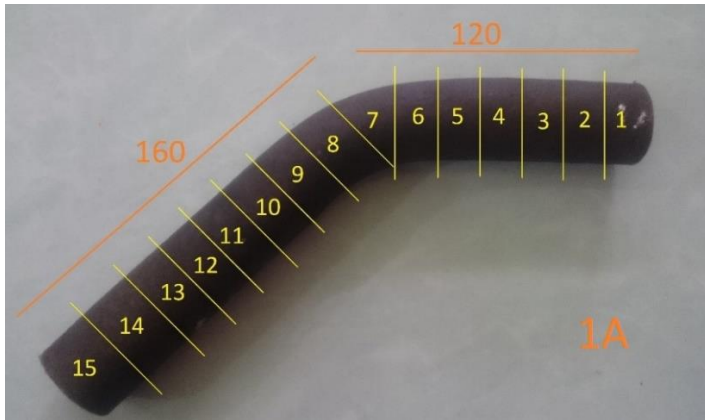
spesimen. Pengamatan makroskopis dilakukan dengan cara *visual inspection*.

3.4.4. Scanning 3D

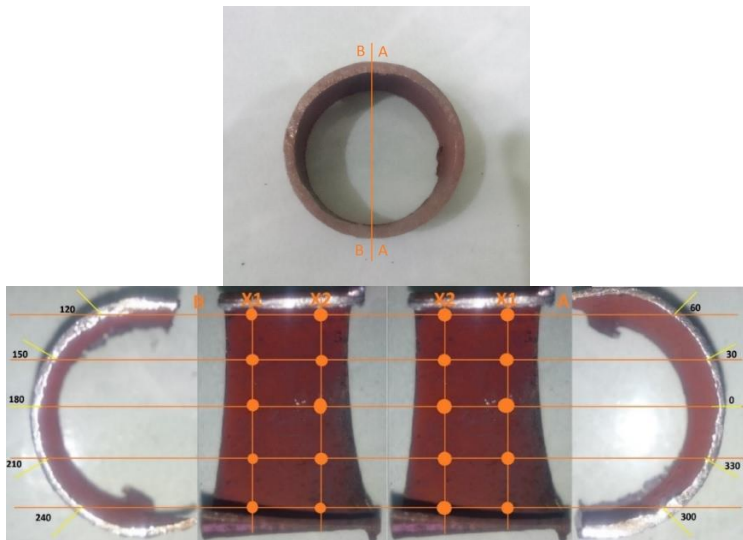
Proses pengambilan gambar spesimen dengan teknologi rekayasa 3 dimensi dilakukan untuk mengetahui kegagalan yang terjadi pada spesimen dan hasil analisa dimensi spesimen dapat diinterpretasikan dengan mudah oleh pembaca. Pengukuran dimensi dengan 3D *scanner* juga dapat membantu dalam mengetahui dimensi yang berubah pada spesimen walaupun bentuk spesimen kompleks. Hasil dari pengukuran dimensi dengan 3D *scanner* adalah *file* yang berisikan rekayasa spesimen dalam tiga dimensi.

3.4.5. Pengukuran Dimensi

Pengukuran dimensi dalam penelitian untuk tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui penipisan yang terjadi pada spesimen secara akurat dan menyeluruh permukaan pipa. Pemotongan dilakukan dengan cara memotong spesimen menjadi beberapa bagian dengan gergaji tangan sepanjang 20 mm pada setiap bagiannya seperti pada gambar 3.1. Kemudian, potongan – potongan spesimen tersebut akan dilakukan pengukuran ketebalan dengan menggunakan jangka sorong dari sudut 0° hingga 330° dan jarak X_1 dan X_2 seperti pada gambar 3.2. Hasil pengukuran dicatat dan dijadikan dalam satu file *excel* untuk diolah menjadi analisa penipisan yang terjadi sepanjang permukaan pipa seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.2 Bagian – bagian pemotongan pada spesimen 1A



Gambar 3.3 Pengukuran dimensi spesimen

		1A																													
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15	
Sudut	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	
0	1	1.1	1.2	1.38	1	0.9	1.14	1.18	1.6	1.3	1.3	1.9	1.2	1.68	1.46	1.4	1.3	1.84	1.58	1.56	1.6	1.4	1.4	1.5	1.44	1.5	1.5	1.46	1.4	1.68	
30	1.2	1.1	1.6	1.3	1.4	1.3	1.2	1.28	1.68	1.6	1.3	1.5	1.2	1.3	1.9	1.7	1.6	1.5	1.5	1.6	1.6	1.4	1.5	1.5	1.8	1.7	1.7	1.4	2	1.6	
60	1.5	1.06	1.58	1.1	1.2	1.4	1.3	1.3	1.6	1.4	1.58	1.18	1.4	1.36	2.3	1.96	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.7	1.6	1.8	1.8	1.9	1.6	2	2
90	1.8	1.2	1.48	1.16	1.3	1.58	1.4	1.3	1.4	1.3	1.38	1.16	1.3	1.4	2.3	2.2	1.4	1.5	1.48	1.8	1.6	1.6	1.7	2	1.58	1.96	2	1.8	1.6	1.82	
120	1.4	1.3	1.3	1.2	1.3	1.5	1.4	1.5	1.5	1.38	1.3	1.38	1.4	1.6	2.48	2.1	1.58	1.4	1.4	1.6	1.5	1.56	1.74	2	1.6	1.7	2.16	1.6	2	2	
150	1.3	1.3	1.36	1.28	1.28	1.42	1.4	1.32	1.44	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.9	2.28	1.54	1.5	1.46	1.4	1.5	1.4	1.46	1.5	1.4	1.64	1.68	1.6	2	1.7	
180	1.42	1.3	1.2	1.2	1.2	1.26	1.3	1.3	1.3	1.6	1.46	1.36	1.46	1.44	1.76	1.48	1.5	1.5	1.4	1.4	1.34	1.7	1.5	1.4	1.44	1.38	1.5	1.92	1.62	1.6	
210	1.6	1.2	1.4	1.12	1.24	1.32	1.4	1.4	1.3	1.5	1.3	1.52	1.7	1.7	1.6	1.5	1.9	1.7	2	1.58	1.54	1.7	1.9	1.8	1.4	1.6	1.6	1.7	1.8	1.6	
240	1.5	1.5	1.4	1.38	1.2	1.2	1.2	1.7	1.3	1.7	1.5	1.7	2.1	2.2	1.5	1.5	2.5	1.8	1.8	1.5	1.58	1.54	1.68	1.5	1.4	1.46	1.58	1.9	1.7	1.82	
270	1.8	1.6	1.48	1.3	1.14	1.28	1.18	1.4	1.34	1.8	1.58	1.74	1.9	2.28	1.3	1.3	2.6	1.8	1.76	1.6	1.7	1.4	1.5	1.6	1.7	1.44	1.44	1.88	1.46	2.2	
300	1.7	1.9	1.38	1.2	1.16	1.3	1.2	1.6	1.44	1.38	1.6	1.56	1.8	2	1.48	1.2	2.48	2	1.6	1.8	1.7	1.66	1.46	1.6	1.78	1.4	1.4	1.7	1.9	2	
330	1.1	0.8	1.4	1.2	1.4	1.24	1.38	1.1	1.1	1.46	1.4	1.8	1.58	2	1.46	1.5	2.4	1.8	1.8	1.7	1.8	1.44	1.7	1.56	1.56	1.3	1.5	1.4	1.6	1.6	

Gambar 3.4 Hasil pengukuran dalam satuan millimeter

3.4.6. Pengujian *Metallography*

Pengujian *metallography* dilakukan untuk mengetahui bentuk mikrostruktur dari spesimen. Dengan mengetahui mikrostruktur, dapat dilakukan analisa lebih terkait pengerjaan dan keadaan lingkungan kerja spesimen. Pengujian *metallography* memiliki empat tahap yaitu *sampling*, *grinding*, *polishing*, dan *etching*.

Sampling adalah pemotongan spesimen menjadi sampel yang lebih kecil. Pemotongan dilakukan dengan menggunakan gergaji tangan. *Grinding* adalah pemolesan sampel spesimen dengan kertas amplas *grid* 80, 120, 240, 360, 400, 600, 800, 1000, 1500, dan 2000 secara bertahap. *Polishing* adalah pemolesan sampel spesimen dengan kain beludru dan serbuk alumina yang dicampurkan dengan air. Setelah sampel spesimen dilakukan *grinding* dan *polishing*, sampel spesimen akan dicuci dengan alkohol dan air. *Etching* adalah proses etsa atau proses korosi yang dikendalikan pada spesimen. Dengan melakukan korosi pada sampel spesimen, perbedaan fase dan batas butir dari mikrostruktur akan terlihat dengan jelas. Proses *etching* menggunakan *etchant* atau *etching reagent* yaitu nital dengan konsentrasi 3% [15]. Setelah itu, sampel spesimen akan dilihat

dengan mikroskop elektronik dengan perbesaran 100 hingga 1500 untuk melakukan analisa mikrostruktur.

3.4.7. Pengujian Komposisi Kimia Material dan Produk Korosi

Pengujian komposisi kimia material dan produk korosi dilakukan untuk mengetahui produk korosi yang ada pada spesimen secara akurat. Setelah mengetahui produk korosi berupa bentuk lapisan oksida dan warna dari *visual inspection*, selanjutnya produk korosi akan diekstrak dari spesimen dengan cara digosok menggunakan kertas amplas *grid* 240. Serbuk produk korosi yang berhasil diekstrak tersebut akan diuji XRD atau *X-Ray Powder Diffraction*.

Pada pengujian XRD, serbuk produk korosi akan ditembak dengan elektron yang sudah dikondisikan pada alat. Kemudian pada layar monitor akan terlihat panjang gelombang dari beberapa molekul penyusun produk korosi. Karena panjang gelombang setiap molekul penyusun berbeda, sehingga dapat diketahui komposisi kimia dari produk korosi ^[16].

BAB IV
ANALISA DATA

BAB IV ANALISA DATA

4.1. *Bend Tube Preheater*

Perusahaan menetapkan penggunaan material sebagai *bend tube preheater* sesuai dengan standar DIN 17177-79 dengan kode material ST 37.8. Berdasarkan standar DIN (*Deutsches Institut für Normung*), didapatkan komposisi kimia seperti pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Material Berdasarkan DIN 17177-79

<i>Grade</i>		St 37.8
<i>Chemical Composition (%)</i>	C	0,17 max
	Si	0,1 – 0,35
	Mn	0,4 – 0,8
	P	0,04 max
	S	0,04 max
<i>Tensile Test (MPa)</i>	<i>Min Yield Point</i>	235
	<i>Tensile Strength</i>	360 – 480
<i>Elongation in 50 mm (%)</i>		35

Berdasarkan standar DIN, diketahui material ST 37.8 adalah material tahan panas yang umumnya digunakan pada temperature kerja 530°C dengan tekanan yang tinggi, sehingga sesuai apabila digunakan sebagai material *bend tube preheater*. Selain itu material ST 37.8 dapat disetarakan dengan material ASTM A178 Grade A[17].

Tabel 4.2 Data *Bend Tube Preheater*

Keterangan		Data
Material	Jenis Material	<i>Welded Boiler Tube (DIN 17177-79 ST 37.8)</i>
	<i>Tensile Strength (MPa)</i>	325
	Periode Penggunaan	23 Tahun (1992 – 2015)

	Diameter Luar (mm)	38
	Ketebalan (mm)	2.9
	Batas Maksimal Temperatur Kerja (°C)	180
	Batas Maksimal Tekanan (bar)	5.4
Kondisi Kerja	<i>Mass Flow Rate</i> (ton/h)	1500
	<i>Pressure Limit High</i> (bar)	75.5
	<i>Pressure Limit Low</i> (bar)	5.4
Perawatan		Setiap 8000 <i>Operating Hours</i> , dilakukan pengukuran ketebalan pipa menggunakan <i>ultrasonic inspection</i> .

Dengan mengetahui kondisi kerja seperti pada tabel 4.2, perusahaan menggunakan standar ASME B31.3 untuk menghitung ketebalan minimal yang dibutuhkan *bend tube preheater*. Dari ASME B31.3 didapatkan rumusan:

$$t = \frac{P D}{2 (S E + P Y)}$$

$$tm = t + CA$$

Dimana:

- P = Tekanan Kerja (psi)
- D = Diameter Luar Pipa (in)
- S = *Allowable Stress in Tension* (psi)
- E = *Quality Factor*
- Y = *Material Factor*
- CA = *Corrosion Allowance*
- t = Ketebalan pipa (in)

t_m = Ketebalan pipa minimum (in)

Dengan menggunakan nilai *quality factor* (E) yaitu 1, material factor (Y) yaitu 0.4, dan *corrosion allowance* 0.0625 inch seperti pada standar ASME, didapatkan ketebalan minimum *bend tube preheater* adalah 0.07 inch atau 1.778 mm. Sehingga perusahaan menetapkan kondisi kritis dari *bend tube preheater* adalah ketika ketebalan dari pipa mencapai 60% dari ketebalan awal.

Kandungan komposisi kimia dari gas alam yang digunakan pada siklus turbin gas terdapat pada tabel 4.3.

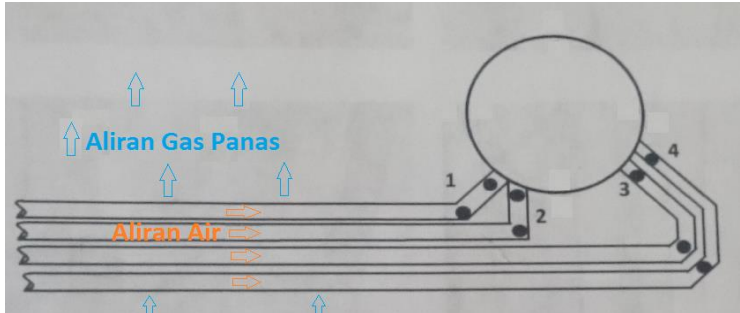
Tabel 4.3 Komposisi Kimia Gas Alam[18]

Komposisi Kimia	Rumus Kimia	Persentase Volume
Methana	CH ₄	86.78
Ethane	C ₂ H ₆	7.01
Propana	C ₃ H ₈	3.12
Butana	C ₄ H ₁₀	1.49
Pentana	C ₅ H ₁₂	0.6
Hexana	C ₆ H ₁₄	0.73
Carbon Dioksida	CO ₂	0.24
Nitrogen	N ₂	Terindikasi
Hydrogen Sulphide	H ₂ S	10 ppm
Mercaptane	CH ₄ S	4.2 ppm
Carbonyl Sulphide	COS ₂	28.2 ppm

4.2. Analisa Visual *Bend Tube Preheater*

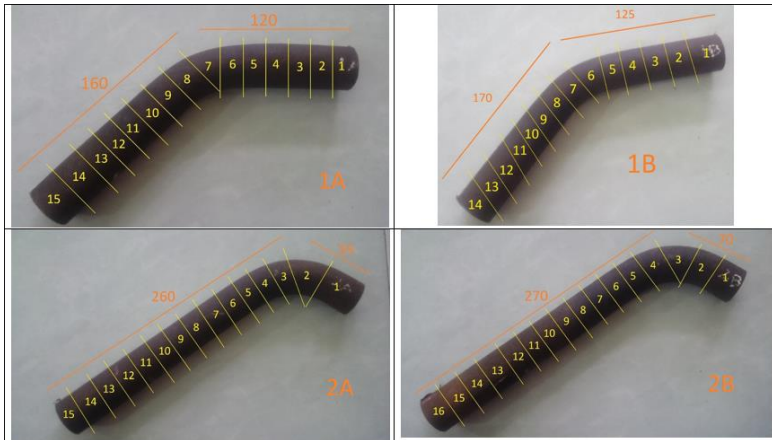
Analisa visual dilakukan pada permukaan dalam dan luar *bend tube preheater* untuk melihat kerusakan berupa lubang, pembentukan produk korosi, dan perubahan warna yang terjadi pada spesimen. Terdapat empat *bend tube preheater* sebagai spesimen pada penelitian ini, dimana letak keempat *bend tube preheater* sebagai outlet dari *drum* seperti pada gambar 4.1, dengan

arah panah berwarna jingga menunjukkan arah aliran air dan arah panah berwarna biru menunjukkan aliran gas panas.



Gambar 4.1 Letak dan Arah Aliran Air dan Gas Panas dari *Bend Tube Preheater*

Berdasarkan gambar 4.1, spesimen yang didapatkan berupa dua buah pipa yang ditandai dengan nomor 1 yang kemudian dibedakan menjadi 1A dan 1B dengan jarak antara 1A dan 1B sebesar 20,65 cm pada sumbu horizontal. Kemudian dua buah pipa yang ditandai dengan nomor 2 yang kemudian dibedakan menjadi 2A dan 2B dengan jarak antara 2A dan 2B sebesar 20,65 cm pada sumbu horizontal. Langkah selanjutnya untuk melakukan analisa visual dan perhitungan ketebalan spesimen, setiap spesimen dipotong menjadi beberapa sampel seperti pada gambar 4.2. Spesimen 1A terdapat 15 sampel, spesimen 1B terdapat 14 sampel, spesimen 2A terdapat 15 sampel, dan spesimen 2B terdapat 16 sampel. Lalu setiap sampel akan diamati pola kerusakannya, lapisan produk korosi yang terbentuk, dan perubahan warna yang terjadi baik pada permukaan dalam maupun luar *bend tube preheater*.



Gambar 4.2 Pembagian Sampel *Bend Tube Preheater*

4.2.1. Permukaan Dalam *Bend Tube Preheater*

Spesimen yang telah dipotong menjadi beberapa sampel tersebut kemudian diamati secara visual seperti pada gambar 4.3. Analisa visual yang dilakukan berupa pengamatan kerusakan dan pembentukan produk korosi yang terjadi pada permukaan dalam setiap sampel.

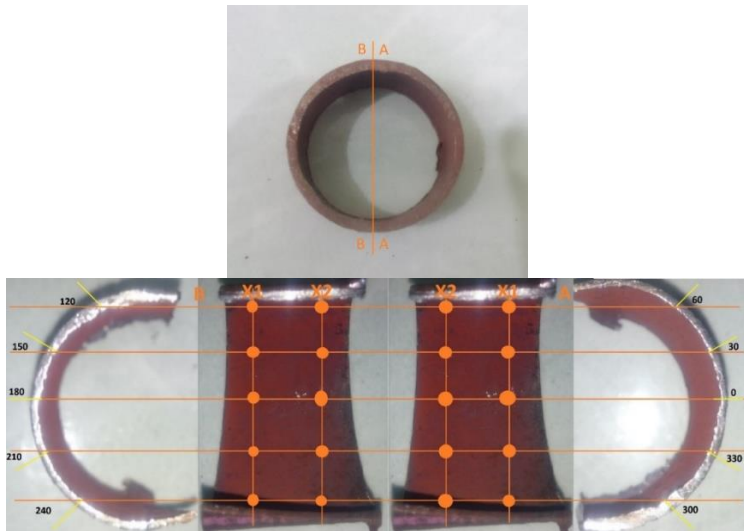
Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh permukaan dalam *bend tube preheater* memiliki lapisan berwarna merah bata yang merata sepanjang permukaan pipa. Hal tersebut menunjukkan indikasi terjadi proses korosi yang berhubungan dengan air sebagai media korosif atau elektrolit. Tidak terlihat adanya kerusakan seperti garis retakan atau lubang pada permukaan dalam *bend tube preheater*, sehingga penyerangan korosi pada permukaan dalam pipa tergolong jenis *uniform corrosion*.

4.2.2. Permukaan Luar *Bend Tube Preheater*

Pada permukaan luar *bend tube preheater*, terdapat kerak yang berwarna hitam kecoklatan pada sepanjang permukaan spesimen seperti pada gambar 4.2. Hal tersebut menunjukkan

indikasi terjadinya proses korosi pada permukaan luar pipa. Tidak ada kerusakan berupa retakan atau lubang pada permukaan luar *bend tube preheater*.

Dari hasil pengamatan permukaan dalam dan luar *bend tube preheater* terdapat pengurangan ketebalan yang merujuk ke peristiwa korosi. Oleh karena itu, diperlukan pengukuran ketebalan pada setiap sampel untuk semua spesimen. Pertama, setiap sampel dipotong menjadi 2 bagian, sehingga terbentuk penampang A dan B pada setiap sampel. Kemudian dilakukan pengukuran pada setiap sampel, dengan pengambilan nilai pengukuran sebanyak 24 titik dari 0° hingga 330° , dengan setiap perbedaan 30° dari setiap titik pengukurannya. Setelah itu, setiap sampel dilakukan pengukuran dua kali dengan perbedaan jarak pengukuran 1 cm yang ditandai dengan X1 dan X2 pada gambar 4.3. Hasil pengukuran dari semua sampel ditampilkan pada gambar 4.4 hingga 4.7.



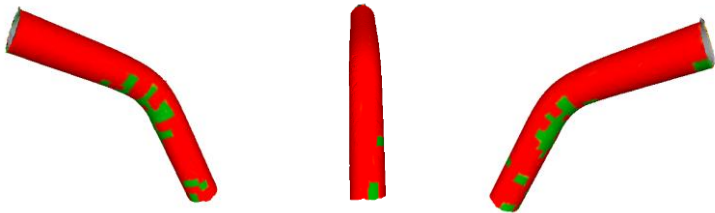
Gambar 4.3 Pengukuran Ketebalan Sampel *Bend Tube Preheater*

Ketebalan awal dari manufaktur untuk *bend tube preheater* adalah 2.9 mm, sedangkan ketebalan minimal *bend tube preheater* yang diizinkan adalah 60% ketebalan awal, sehingga batas toleransi ketebalannya adalah 1.74 mm. Jika ketebalan lokasi *bend tube preheater* bernilai lebih besar dari 1.74 mm maka ketebalan lokasi tersebut masih memiliki kemampuan untuk menahan tekanan kerja atau aman. Namun, jika ketebalan lokasi *bend tube preheater* bernilai lebih kecil dari 1.74 mm maka ketebalan lokasi tersebut sudah tidak mampu menahan tekanan kerja atau tidak aman, sehingga harus dilakukan pergantian pipa.

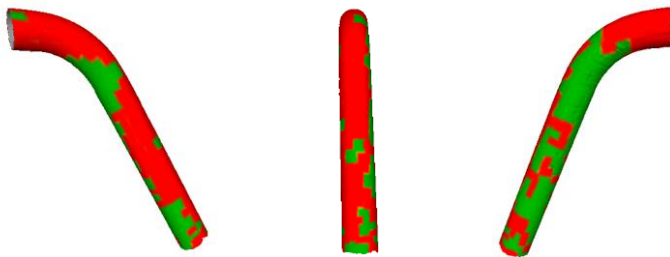
Setelah didapatkan ketebalan pipa dari setiap potongan sampel, hasil tersebut digabungkan dengan gambar 3 dimensi pipa. Lalu diberi kodifikasi warna pada gambar 3 dimensi tersebut untuk menunjukkan ketebalan pipa. Warna merah pada gambar 3 dimensi tersebut menunjukkan ketebalan *bend tube preheater* yang sudah tidak aman atau di bawah 1.74 mm, sedangkan warna hijau menunjukkan ketebalan *bend tube preheater* yang masih aman atau di atas 1.74 mm. Hasil Analisa ketebalan dengan gambar 3 dimensi ditunjukkan pada gambar 4.8 hingga 4.11.



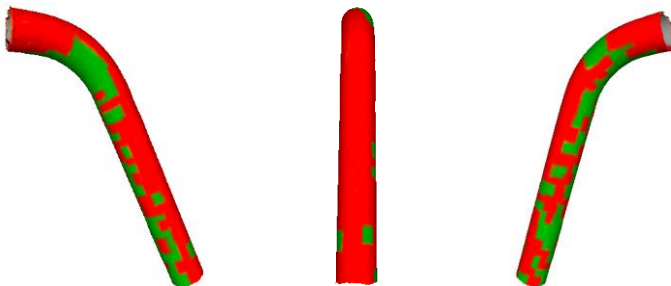
Gambar 4.8 Sketsa 3D Ketebalan Spesimen 1A



Gambar 4.9 Sketsa 3D Ketebalan Spesimen 1B



Gambar 4.10 Sketsa 3D Ketebalan Spesimen 2A



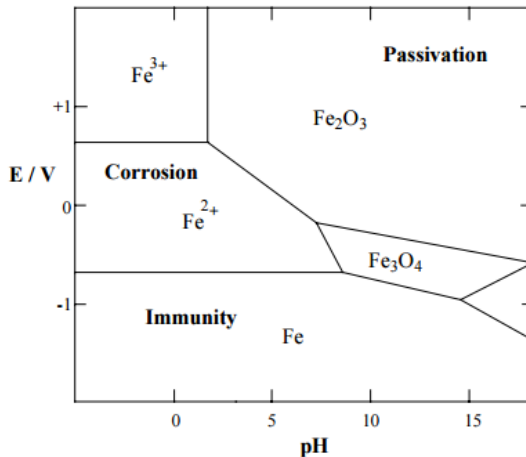
Gambar 4.11 Sketsa 3D Ketebalan Spesimen 2B

Dari hasil analisa permukaan dalam dan luar serta pengukuran didapatkan bahwa *bend tube preheater* sudah tidak aman lagi untuk digunakan, walaupun tidak terjadi kebocoran dan tidak ada lubang atau retakan pada keempat spesimen tersebut. Permukaan luar *bend tube preheater* terdapat lapisan tipis berwarna hitam kecoklatan pada seluruh permukaannya, hal

tersebut menunjukkan jika permukaan luar *bend tube preheater* mengalami korosi. Permukaan dalam *bend tube preheater* juga terdapat produk korosi yang berwarna merah bata yang menunjukkan adanya reaksi antara logam dengan air yang terjadi secara terus menerus.

4.3. Analisa Korosi

Dengan mengetahui diagram pourbaix dari logam Fe, maka dapat diketahui pembentukan oksida atau senyawa yang terjadi pada spesimen. Selain itu juga dapat diketahui pengaruh dari pembentukan lapisan oksida pada logam.



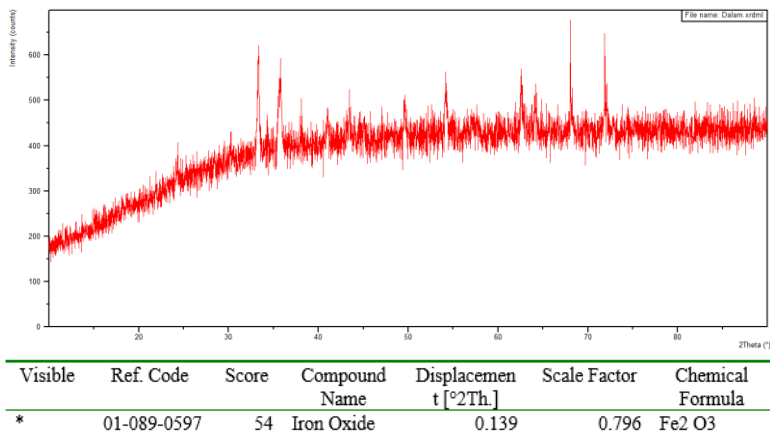
Gambar 4.12 Diagram Pourbaix Pada Besi[20]

Dari gambar 4.12 dapat diketahui jika pembentukan lapisan oksida Fe₂O₃ menyebabkan permukaan logam tersebut menjadi pasif. Permukaan logam dengan lapisan Fe₂O₃ tersebut masih mengalami proses korosi, namun dengan laju yang rendah. Jika logam Fe membentuk lapisan Fe₃O₄, permukaan logam tersebut dapat menjadi pasif atau kebal terhadap korosi. Sehingga,

permukaan logam dengan lapisan Fe_3O_4 tersebut masih mengalami proses korosi, namun dengan laju yang sangat rendah.

Pengujian XRD atau *X-Ray Diffraction*, dilakukan untuk mendapatkan senyawa yang terkandung pada permukaan dalam dan luar *bend tube preheater*. Hasil pengujian XRD akan digunakan untuk melakukan analisa lanjutan terkait proses korosi yang terjadi pada *bend tube preheater*.

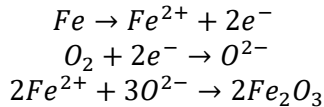
4.3.1. Permukaan Dalam *Bend Tube Preheater*



Gambar 4.13 Hasil Pengujian XRD Pada Permukaan Dalam *Bend Tube Preheater*

Gambar 4.13 menunjukkan hasil pengujian XRD pada permukaan dalam *bend tube preheater*. Lapisan kerak yang berwarna merah bata pada permukaan dalam *bend tube preheater* terbaca sebagai produk korosi pada pengujian XRD yaitu Fe_2O_3 atau *hematite*. *Hematite* yang terbentuk akibat dari logam Fe yang berada pada lingkungan kerja dengan air dan berkontak langsung dengan air secara terus menerus. Umumnya jenis penyerangan korosi pada *hematite* adalah *uniform corrosion* tanpa terlihat adanya garis retakan korosi (*rust streak*)[19].

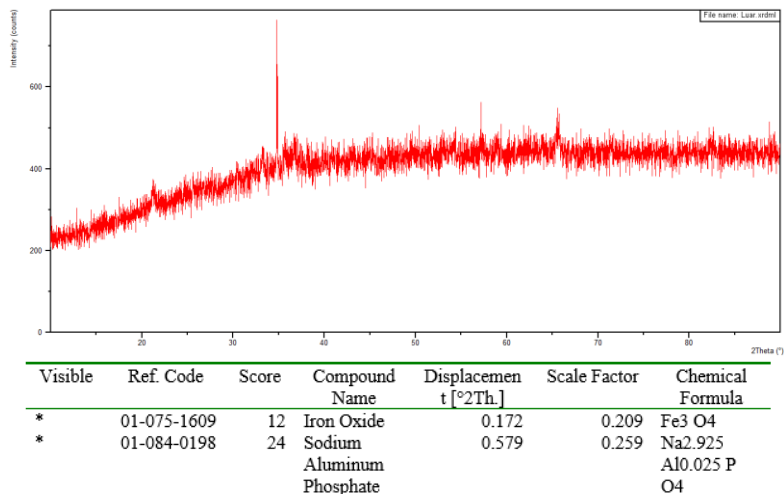
Reaksi kimia yang terjadi pada pembentukan *hematite* adalah logam Fe yang berkontak langsung dengan air melepas elektron yang bergerak menuju air untuk bereaksi dengan oksigen. Ketika logam Fe kehilangan elektron dan menjadi ion Fe^{2+} dan oksigen menjadi ion O^{2-} , kedua ion tersebut bergabung menjadi oksida Fe_2O_3 dan membentuk lapisan pada permukaan logam Fe.



Hematite pada permukaan dalam *bend tube preheater* terbentuk secara menyeluruh dengan ketebalan dibawah 1 mm. Proses korosi yang terjadi secara kontinu karena adanya kontak langsung antara logam Fe dengan air menyebabkan penipisan pada permukaan dalam *bend tube preheater* juga terjadi secara kontinu. Selain itu, aliran air yang membawa partikel Fe juga sedikit mempengaruhi penipisan yang terjadi pada *bend tube preheater* karena partikel Fe tersebut menjadi *abrasive particles* pada aliran air.

Perusahaan sudah menggunakan proses filtrasi pada air yang digunakan pada siklus turbin uap untuk mencegah partikel *abrasive* yang dapat memperburuk keadaan pipa. Selain itu proses filtrasi berguna untuk mencegah masuknya partikel logam lainnya (kontaminan) yang dapat mempercepat proses korosi pada *bend tube preheater*. Perusahaan menjamin jika kandungan air yang mengalir pada *bend tube preheater* tersebut murni, atau tidak mengandung partikel *abrasive* atau elemen logam lain yang dapat memicu terjadinya korosi. Dari gambar 4.13 didapatkan bahwa permukaan dalam *bend tube preheater* tidak tercemar dari unsur logam lain atau partikel *abrasive*, sehingga korosi yang terjadi pada permukaan dalam pipa murni akibat reaksi korosi antara logam Fe dengan air.

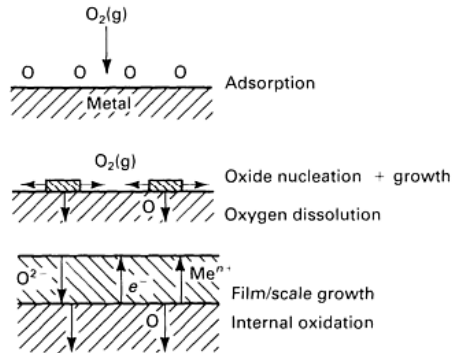
4.3.2. Permukaan Luar *Bend Tube Preheater*



Gambar 4.14 Hasil Pengujian XRD Pada Permukaan Luar *Bend Tube Preheater*

Gambar 4.14 menunjukkan hasil pengujian XRD pada permukaan luar *bend tube preheater*. Lapisan kerak tipis yang berwarna hitam kecoklatan pada permukaan dalam *bend tube preheater* terbaca sebagai produk korosi pada pengujian XRD yaitu Fe₃O₄ atau *magnetite* dan sodium aluminum fosfat.

Pada permukaan luar *bend tube preheater*, terjadi proses korosi yang berbeda dibandingkan pada permukaan dalam. Karena media korosif berupa gas panas dengan temperatur 150° C, sehingga gas tersebut tidak memiliki kandungan uap air. Senyawa oksigen dalam keadaan gas (O₂) mengalami adsorpsi pada permukaan luar pipa, sehingga terjadi pertukaran ion antara logam dan ion O²⁻ pada permukaan logam. Pertukaran ion tersebut menyebabkan pembentukan lapisan oksida pada permukaan logam. Mekanisme pembentukan lapisan oksida digambarkan pada gambar 4.15.



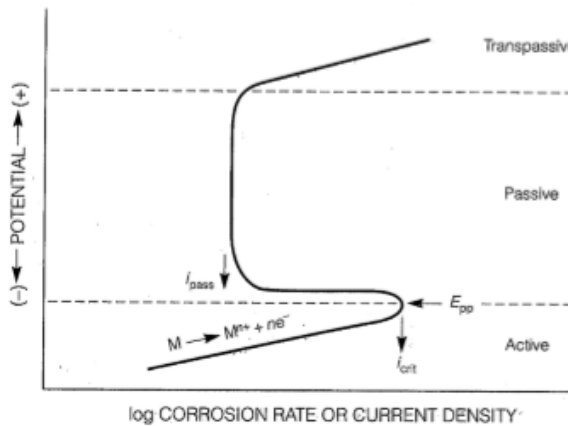
Gambar 4.15 Mekanisme Pembentukan Lapisan Oksida Pada Temperatur Tinggi[8]

Magnetite pada permukaan luar *bend tube preheater* terbentuk secara menyeluruh dengan ketebalan yang sangat tipis hingga lebih kecil dari 1 mm. Produk korosi *magnetite* sesuai dengan keadaan lingkungan kerja *bend tube preheater*, dimana suhu diluar pipa mencapai 176° celcius. Sehingga terbentuk lapisan tipis berwarna hitam dengan komposisi senyawa Fe_3O_4 . Selain itu, karena permukaan luar *bend tube preheater* merupakan *stag* pada *heat recovery steam generator* untuk pembuangan gas pembakaran pada gas turbin, sehingga terdapat banyak unsur lain pada gas panas tersebut. Kandungan unsur – unsur kontaminan dari gas tersebut antara lain adalah Aluminium, Natrium, dan Sulfur. Unsur – unsur kontaminan tersebut menyebabkan pembentukan senyawa sodium aluminum fosfat pada permukaan luar *bend tube preheater*.

4.3.3. Analisa Belokan Pada *Bend Tube Preheater*

Sisi belokan yang ada pada *bend tube preheater* didesain untuk mengarahkan aliran air dari drum *preheater* menuju drum *economizer*. Deformasi pada *bend tube preheater* berupa belokan menyebabkan pipa lebih rentan terhadap korosi secara lokal. Karena pada daerah belokan memiliki nilai *breakdown potential* yang lebih rendah dibandingkan daerah lurus pada pipa[21].

Breakdown potential adalah nilai potensial listrik pada permukaan suatu logam yang dibutuhkan untuk membuat laju korosi pada logam tersebut meningkat atau dalam keadaan *transpassive*.



Gambar 4.16 Diagram Aktif – Pasif[8]

Dengan memiliki *breakdown potential* yang lebih kecil secara lokal pada belokan *bend tube preheater*, sehingga pada daerah belokan tersebut lebih mudah untuk memasuki keadaan *transpassive* dan memiliki laju korosi yang lebih besar. Ketika *oxide layer* tersebut mengalami *breakdown*, maka permukaan logam spesimen pada daerah tersebut berkontak langsung dengan air sebagai elektrolit. Perbedaan potensial yang terjadi pada permukaan logam spesimen pada daerah belokan dengan *oxide layer* yang masih terbentuk, menyebabkan *pitting corrosion* terjadi. Permukaan logam spesimen sebagai anoda dan *oxide layer* sebagai katoda, sehingga pada daerah belokan penipisan akibat korosi terjadi lebih besar dibandingkan daerah lokal lainnya.

Breakdown potential pada Fe_2O_3 memiliki nilai sebesar 0.42 V dengan perhitungan *Silver Chloride Electrode* (SCE) atau 0.625 V dengan perhitungan *Standard Hydrogen Electrode* (SHE)[22]. Sedangkan *reduction potential* dari besi adalah 0.44 V dengan perhitungan SHE. Sehingga jika terjadi *breakdown* pada lapisan

oksida secara lokal, maka terdapat beda potensial antara permukaan logam dengan lapisan oksida (Fe_2O_3), hal tersebut menambah laju korosi pada daerah tersebut.

4.3.4. Perhitungan Laju Korosi Pada *Bend Tube Preheater*

Laju korosi dari suatu pipa dapat ditentukan dengan menghitung perbedaan ketebalan pipa pada interval waktu pengukuran tertentu[23]. Pengukuran laju korosi dapat dibagi menjadi dua yaitu pengukuran laju korosi jangka pendek (*short-term*) dan jangka panjang (*long-term*). Pengukuran jangka pendek umumnya dilakukan untuk mengetahui laju korosi dengan kurun waktu satu tahun, sedangkan pengukuran jangka panjang untuk mengetahui laju korosi dengan kurun waktu lebih dari satu tahun.

Pengukuran laju korosi jangka panjang dapat dirumuskan sebagai:

$$\text{Laju Korosi} = \frac{\text{Ketebalan awal} - \text{Ketebalan akhir}}{\text{Perbedaan waktu pengukuran ketebalan awal dan akhir}}$$

Dimana ketebalan awal *bend tube preheater* dari pabrik adalah 2.9 mm, dengan ketebalan akhir digunakan ketebalan terkecil dari hasil pengukuran, yaitu 0.7 mm yang terjadi pada pipa 1B pada sampel nomor 7. Pengukuran ketebalan *bend tube preheater* awal dilakukan pada tahun 1992 dan pengukuran ketebalan akhir dilakukan pada tahun 2015. Dengan begitu bisa didapatkan nilai laju korosi dari *bend tube preheater* sebesar :

$$\text{Laju Korosi} = \frac{2.9 \text{ mm} - 0.7 \text{ mm}}{2015 - 1992} = \frac{2.2 \text{ mm}}{23 \text{ tahun}} = 0.0956 \text{ mm/tahun}$$

Dengan menggunakan perhitungan seperti diatas, didapatkan tabel laju korosi lokal pada setiap spesimen pada tabel 4.3.

Tabel 4.4 Perbandingan Ketebalan dan Laju Korosi Setiap Spesimen

Spesimen	Ketebalan (mm)		Laju Korosi (mm/tahun)	Keterangan
1A	Rata – Rata	1.537	0.0593	-
	Terkecil	0.8	0.0913	Sampel 1 pada sudut 330°
1B	Rata – Rata	1.385	0.0659	-
	Terkecil	0.7	0.0956	Sampel 7 pada sudut 120°
2A	Rata – Rata	1.727	0.051	-
	Terkecil	1.2	0.0739	Sampel 6 pada sudut 90°
2B	Rata – Rata	1.638	0.0548	-
	Terkecil	1.1	0.0783	Sampel 12 pada sudut 0°

Dari tabel 4.3 dapat diketahui laju korosi rata – rata dan maksimal dari setiap spesimen, dimana dengan laju korosi terbesar terjadi pada spesimen 1B yaitu 0.0956 mm/tahun dan laju korosi terendah terjadi pada spesimen 2A yaitu 0.051 mm/tahun. Nilai laju korosi terbesar terjadi pada daerah lokal belokan pada *bend tube preheater* seperti yang sudah dibahas pada subbab 4.3.3.

Dengan melakukan pengukuran diameter luar dan diameter dalam dari sampel, dapat diketahui perbandingan penurunan ketebalan terbesar akibat korosi terjadi pada permukaan dalam atau

luar *bend tube preheater*. Hasil pengukuran diameter dari beberapa sampel untuk setiap spesimen terdapat pada tabel 4.4.

Tabel 4.5 Perbandingan Penurunan Ketebalan Pipa Rata - Rata Pada Permukaan Luar dan Dalam

Spesimen	Permukaan Luar		Permukaan Dalam	
	Penipisan (mm)	Laju Korosi (mm/tahun)	Penipisan (mm)	Laju Korosi (mm/tahun)
1A	1.29	0.056	0.08	0.0035
1B	1.39	0.06	0.09	0.0039
2A	1.33	0.058	0.09	0.0039
2B	1.39	0.06	0.1	0.0043

Dari Tabel 4.4 diketahui penipisan atau penurunan ketebalan terbesar akibat korosi terjadi pada permukaan luar *bend tube preheater* dengan laju korosi rata – rata seluruh spesimen sebesar 0.0585 mm/tahun. Pada permukaan dalam *bend tube preheater* terjadi penipisan akibat korosi dengan laju rata – rata seluruh spesimen sebesar 0.0039 mm/tahun.

Tabel 4.6 Perbandingan Nilai Laju Korosi Pada Logam Paduan Baja dan Nickel[8]

Relative Corrosion Resistance*	mpy	mm/yr	μm/yr	mm/h	pm/s
Outstanding	< 1	< 0.02	< 25	< 2	< 1
Excellent	1–5	0.02–0.1	25–100	2–10	1–5
Good	5–20	0.1–0.5	100–500	10–50	20–50
Fair	20–50	0.5–1	500–1000	50–150	20–50
Poor	50–200	1–5	1000–5000	150–500	50–200
Unacceptable	200+	5+	5000+	500+	200+

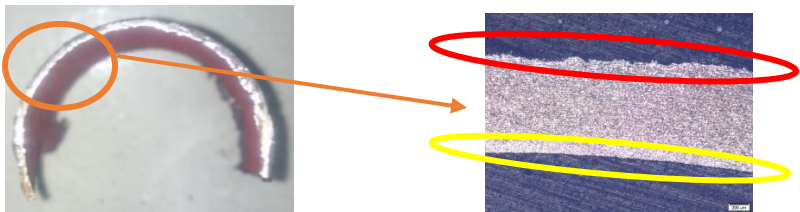
Pada tabel 4.5 dapat diketahui nilai laju korosi relatif pada logam paduan baja. Dengan laju korosi lokal terbesar berdasarkan perhitungan ketebalan pada spesimen yaitu 0.0956 mm/tahun,

dapat diambil kesimpulan jika kemampuan daya tahan terhadap korosi dari spesimen tergolong sangat baik.

4.4. Analisa *Microstructure*

Analisa *microstructure* dilakukan untuk mengetahui perubahan atau fenomena yang terjadi pada spesimen *bend tube preheater* akibat lingkungan kerjanya. Spesimen *bend tube preheater* dengan kode St 37.8 merupakan golongan *low carbon steel* dengan komposisi unsur karbon maksimal 0.17%. Permukaan luar *bend tube preheater* berkontak langsung dengan gas panas sisa pembakaran turbin gas dengan temperatur 150° C dan permukaan dalam *bend tube preheater* berkontak langsung dengan aliran air dengan temperatur 50° C.

Sampel yang digunakan pada pengujian *microstructure* adalah spesimen 2A dengan sampel nomor 1. Daerah yang dilakukan pengujian *microstructure* ditunjukkan seperti pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Analisa *microstructure* dengan perbesaran 50x

Hasil analisa *microstructure* pada gambar 4.17 menunjukkan adanya lapisan pada permukaan dalam dan luar *bend tube preheater*. Pada permukaan dalam *bend tube preheater* yang ditunjukkan dengan garis kuning pada gambar 4.17, menunjukkan terbentuknya lapisan yang berwarna merah bata atau *hematite* dengan ketebalan sekitar 7 micrometer atau 0.007 milimeter. Pada permukaan luar *bend tube preheater* yang ditunjukkan dengan garis merah pada gambar 4.17, menunjukkan terbentuknya lapisan berwarna hitam atau *magnetite* dengan ketebalan sekitar 25

micrometer atau 0.025 milimeter. Dengan perbesaran 50x dapat terlihat lapisan korosi Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 yang terbentuk pada logam akibat adanya reaksi spesimen dengan lingkungan kerjanya.



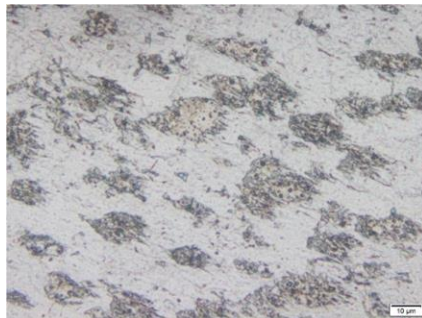
(a)



(b)

Gambar 4.18 Analisa *microstructure* dengan perbesaran 500x, (a) permukaan dalam pipa, (b) permukaan luar pipa

Gambar 4.18a merupakan analisa *microstructure* dengan perbesaran 500x, dapat diketahui jika pembentukan lapisan Fe_2O_3 atau *hematite* pada permukaan dalam *bend tube preheater* terjadi pada logam Fe dan tidak terjadi pembentukan lapisan selain Fe_2O_3 . Gambar 4.18b menunjukkan pada permukaan luar *bend tube preheater* hanya terbentuk lapisan Fe_3O_4 atau *magnetite* yang terjadi pada logam Fe dan tidak ada lapisan korosi lainnya yang terbentuk.



Gambar 4.19 Analisa *Microstructure* Dengan Perbesaran 1000x

Pada gambar 4.19 dapat diketahui kondisi *microstructure* dari spesimen *bend tube preheater*. *Ferrite* yang terbentuk ditunjukkan dengan warna putih. *Pearlite* yang terbentuk pada spesimen ditunjukkan dengan warna hitam kecoklatan. Dengan komposisi kimia dari spesimen yang berstandar DIN dengan kode St 37.8, spesimen *bend tube preheater* tergolong *low carbon steel*. Gambar 4.19 menunjukkan kesesuaian spesimen *bend tube preheater* dengan *microstructure* dari *low carbon steel*, namun ada sedikit perbedaan dari bentuk *pearlite*.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Penelitian *failure analysis bend tube preheater* pada *heat recovery steam generator* memiliki beberapa kesimpulan yaitu:

1. Kerusakan yang terjadi pada *bend tube preheater* tidak disebabkan oleh desain *heat recovery steam generator* maupun pengoperasian kerja, tetapi disebabkan oleh penurunan ketebalan pipa akibat proses korosi yang berkelanjutan dari permukaan dalam pipa.
2. Terjadi pembentukan lapisan Fe_2O_3 pada permukaan dalam dan lapisan Fe_3O_4 pada permukaan luar *bend tube preheater*, baik secara pengujian XRD maupun pengujian *microstructure*.
3. Pembentukan lapisan Fe_2O_3 yang terjadi karena adanya reaksi antara logam Fe dengan air yang mengalir dalam *bend tube preheater*. Lapisan Fe_3O_4 yang terjadi karena adanya reaksi antara logam Fe dengan gas sisa pembuangan pembakaran turbin gas.
4. Penurunan ketebalan pipa terbesar terjadi pada daerah belokan *bend tube preheater* karena adanya deformasi pada pipa, hal tersebut menyebabkan penurunan *breakdown potential* secara lokal. Penurunan *breakdown potential* menyebabkan proses korosi secara lokal pada daerah belokan terjadi lebih cepat.

5.2. Saran

Tindakan yang dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya kegagalan yaitu:

1. Sistem kontrol dan pemeriksaan ketebalan pipa dilakukan lebih sering untuk mengetahui kondisi permukaan dalam *bend tube preheater*.

2. Menggunakan sistem kontrol pH air yang mengalir pada *bend tube preheater*, sehingga permukaan pipa yang berkontak langsung dengan media korosif membentuk lapisan oksida dalam keadaan pasif untuk menurunkan laju korosi.
3. Material *bend tube preheater* digunakan sesuai dengan perkiraan umur pipa akibat faktor korosi.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- [1] **HRSG in modular design**, <http://www.bertsch.at/en/113-hrsg-in-modular-design>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [2] **How It Works : Electricity Production**, <http://www.tenaskawestmoreland.com/how-it-works/>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [3] Ir. Astu Pudjanarsa, MT dan Prof. Ir. Djati Nursuhud, MSME. 2008. **Mesin Konversi Energi**. Yogyakarta : ANDI.
- [4] Moran, Michael J., Shapiro, Howard N., Boettner, Daisie D., dan Bailey, Margaret B. 2010. *Fundamentals Engineering Thermodynamics 7th Edition*. USA : John Wiley & Sons, Inc.
- [5] **Heat Recovery Steam Generator**. <http://www.rusenergomash.ru/production/ob-teplo/2/3/>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [6] **Make Your Plant Ready for Cycling Operations**. <http://www.powermag.com/make-your-plant-ready-for-cycling-operations/?pagenum=3>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [7] **Corrosion**. <http://www.lifechem.co.id/CorrInfo.htm>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [8] Fontana, Mars G. 1986. **Corrosion Engineering**. Singapore : McGraw-Hill Book Co.
- [9] Jones, Denny A. 1992. **Principles and Prevention of Corrosion 2nd Edition**. USA : Pearson Education.
- [10] **Corrosion**. http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/paper_12_1893_228.pdf, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [11] Fong-Yuan Ma. **Corrosive Effect of Chloride on Metals**. <http://cdn.intechopen.com/pdfs/33625.pdf>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [12] **Stainless Steel and Corrosion**. <http://sassda.co.za/stainless-steel-and-corrosion/>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.

- [13] **Pitting and Crevice Corrosion.**
<https://chem409.wikispaces.com/pitting+and+crevice+corrosion>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [14] **DIN 17177-79.**
- [15] **ASTM E-407.**
- [16] **X-Ray Powder Diffraction.**
http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [17] **Material Comparison.**
<http://www.rolfinc.com/Material%20Comparison.pdf>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [18] Al-Shalchi, Wisam. **Determination of Traces in Natural Gas.**
- [19] **Types of Rust.** <http://www.armorvci.com/corrosion/types-of-rust/>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [20] **Corrosion Protection of Metals.**
<http://nzic.org.nz/ChemProcesses/metals/8J.pdf>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.
- [21] Guan, Wang. **Microstructural Effect in Corrosion of Aluminum Tube Alloy.**
- [22] Katsuhisa Sugimoto. **Corrosion Protection Function and Breakdown Mechanism of Passive Film on Stainless Steels.**
- [23] Alexander Nana Kwesi Agyenim-Boateng. **Determination of Corrosion Rate and Remaining Life of Pressure Vessel Using Ultrasonic Thickness Testing Technique.**
<http://gifre.org/library/upload/volume/43-50-vol-3-2-14-gjedt.pdf>, diakses pada tanggal 17 Januari 2017.

BIODATA PENULIS

BIOGRAFI PENULIS



Raden Sony Endardo Putro, lahir pada tanggal 29 Mei 1994 di kota Purworejo merupakan anak kedua dari pasangan Raden Damar Dono dan Rr. Catur Yastuti K.E.W. Penulis memulai pendidikan di TK Nur Huda (1998 – 2000), SD Negeri Cipinang Melayu 05 (2000 - 2006), SMP Negeri 109 Jakarta (2006 – 2009), SMA Negeri 81 Jakarta (2009 - 2012), dan melanjutkan bangku kuliah dengan mengambil Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama menyelesaikan masa perkuliahan, penulis aktif dalam organisasi Mesin ITS Autosport sebagai staff divisi public relation periode 2013/2014 dan kepala divisi racing pada periode 2014/2015. Selain itu, penulis pernah dipercaya untuk menjadi asisten praktikum dan koordinator praktikum laboratorium metalurgi.