



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR – TM184835**

**ANALISIS KEGAGALAN REHEATER TUBE PADA  
BOILER SUB-CRITICAL 600 MW**

**SAMUEL EDRIC  
NRP. 02111640000208**

**DOSEN PEMBIMBING  
Suwarno., ST., M.Sc., PhD**

**PROGRAM STUDI SARJANA  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA**



**TUGAS AKHIR – TM184835**

**ANALISIS KEGAGALAN REHEATER TUBE PADA  
BOILER SUB-CRITICAL 600 MW**

**Samuel Edric  
0211164000208**

**DOSEN PEMBIMBING  
Suwarno., ST., M.Sc., PhD**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA – 2020**



**Final Project – TM184835**

**FAILURE ANALYSIS REHEATER TUBE OF BOILER  
SUB-CRITICAL 600 MW**

**Samuel Edric  
0211164000208**

**Supervisor  
Suwarno., ST., M.Sc., PhD**

**DEPARTEMEN OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty Of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute Of Technology  
SURABAYA – 20**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## HALAMAN PENGESAHAN

### *ANALISIS KEGAGALAN REHEATER TUBE PADA BOILER SUB-CRITICAL 600 MW*

### TUGAS AKHIR

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

Oleh :

**Samuel Edric**

NRP.02111640000208

Disetujui oleh:

1. SUWARNO, ST., MSC., PHD.  (Pembimbing)  
NIP. 198005202005011003
2. PUTU SUWARTA, ST., M.Sc., P.hD  (Penguji I)  
NIP. 198203032009121007
3. INDRA SIDHARTA, ST., MSC  (Penguji II)  
NIP. 198006192006041004
4. FAHMI MUBAROK, ST., MSc, Ph D  (Penguji III)  
NIP. 197801152003121003



SURABAYA  
Agustus, 2020

## **ANALISIS KEGAGALAN REHEATER TUBE PADA BOILER SUB-CRITICAL 600 MW**

**Nama Mahasiswa** : Samuel Edric  
**NRP** : 02111640000208  
**Jurusan** : Teknik Mesin, FTI  
**Dosen Pembimbing** : Suwarno, ST., MSc., PhD

### **ABSTRAK**

*Pembangkit listrik sangat dibutuhkan pada era modern, dimana boiler merupakan salah satu komponen penting dalam pembangkit listrik tenaga uap. Tube boiler rentan terhadap kecacatan/kegagalan terutama pada tube reheater. Reheater berfungsi sebagai pemanasan kembali uap superheater yang keluar dari turbin agar meningkatkan efisiensi, reheater bekerja pada temperatur yang cukup tinggi sehingga rentan terhadap kecacatan/kegagalan. Kegagalan yang terjadi pada boiler akan menurunkan tingkat efisiensi pada pembangkit. Penurunan efisiensi dari boiler akan berdampak besar terutama dalam segi biaya. Maka dari itu diperlukan analisis kegagalan agar kegagalan yang sama tidak terjadi di kemudian hari.*

*Analisis yang dilakukan memiliki beberapa tahapan/langkah – langkah agar penelitian yang dilakukan dapat berlangsung dengan baik dan benar. Tahapan yang dilakukan adalah identifikasi masalah, observasi lapangan, didapatkan kondisi aktual bagian yang akan dilakukan penelitian; studi literatur dijadikan referensi dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya; pengambilan data berupa data operasional dan data material; perumusan masalah dan tujuan dari penelitian ; pengamatan visual berupa foto makroskopis dari benda uji dan lokasi dari kecacatan; pemotongan dan pengukuran dimensi agar benda uji lebih mudah untuk di analisis; pengujian metallography untuk*

*mengetahui struktur mikro dari benda uji; pengujian scanning electron microscope untuk mengetahui lapisan yang terdapat pada benda uji; pengujian mikro hardness untuk mengetahui kekerasan benda uji dalam skala mikro*

*Material yang mengalami kegagalan dilakukan pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa material yang mengalami kegagalan merupakan tube standar ASTM A 213 grade T22. Pengukuran ketebalan dinding tube menunjukkan adanya penipisan dinding tube pada material tersebut. Pada pengujian scanning electron microscope diketahui adanya lapisan oksida yang terbentuk, lapisan oksida yang terbentuk memiliki rata-rata sebesar 750  $\mu\text{m}$ . Adanya interaksi antara penipisan dinding tube dan terbentuknya lapisan oksida menyebabkan adanya kenaikan temperature tube yang menyebabkan terjadinya overheating. Pada pengujian kekerasan didapatkan bahwa pada daerah water side memiliki nilai kekerasan yang hampir sama yaitu 146 HV dimana menurut standar ASTM A 213 T22 ketebalan dinding yang di izinkan sebesar kurang lebih 15% dari 6 mm yaitu sekitar 0,9 mm, sedangkan untuk T6 mengalami penipisan sekitar 1,88 mm, sedangkan pada daerah fire side mengalami kenaikan nilai kekerasan sedangkan pada daerah fire side mengalami kenaikan nilai kekerasan sekitar 100 HV dibandingkan dengan material barunya. Terbentuknya void dapat mengindikasikan terjadinya creep yang menjadi crack initiation disertai overheating pada material yang menyebabkan material mengalami kegagalan.*

***Kata kunci: Analisis kegagalan, Kecacatan, Boiler, Reheater Tube, Creep, Lapisan Oksida, Penipisan Dinding Tube***

## **FAILURE ANALYSIS REHEATER TUBE OF BOILER SUB-CRITICAL 600 MW**

**Name** : Samuel Edric  
**NRP** : 0211164000208  
**Department** : Mechanical Engineering, FTI  
**Supervisor** : Suwarno, ST., MSc., PhD

### **ABSTRACT**

*Power plants are needed in the modern era, where a boiler is one of the important components in a steam power plant. Boiler tubes are prone to defects / failures, especially in tube reheaters. The reheater functions as a re-canceling of the steam superheater that comes out of the turbine in order to increase efficiency, the reheater works at a high enough temperature so that it is susceptible to defects / failure. The failure that occurs in the boiler will reduce the level of efficiency at the generator. The reduction in the efficiency of the boiler will have a big impact, especially in terms of costs. Therefore, a failure analysis is needed so that the same failure does not occur in the future.*

*The analysis carried out has several stages / steps so that the research carried out can take place properly and correctly. The stages taken are identification of the problem, field observation, obtaining the actual conditions of the part that will be researched; literature study is used as a reference from previous research; data retrieval in the form of operational data and material data; problem formulation and research objectives; visual observation in the form of macroscopic photos of the test object and the location of the defect; cutting and measuring dimensions so that the test object is easier to analyze; metallography testing to determine the*

*microstructure of the specimen; testing the scanning electron microscope to determine the layer contained in the test object; micro hardness testing to determine the hardness of the test object on a micro scale*

*The material that failed was tested for chemical composition and showed that the material that had failed was ASTM A 213 grade T22 standard tube. Measurement of the thickness of the tube wall shows a decrease in the wall tube in the material. In the electron microscope scanning tester, it was found that an oxide layer was formed, the oxide layer formed had an average of 750  $\mu\text{m}$ . The interaction between the thinning of the wall tube and the formation of an oxide layer causes an increase in tube temperature which causes overheating. In the hardness tester, it was found that the water side area had a hardness value that was almost the same as the new tube, namely 146 HV, while in the fire area the hardness value increased whereas in the fire side, the hardness value increased by about 100 HV compared to the new material.. The formation of voids can indicate the occurrence of creep which becomes a crack initiation accompanied by overheating in the material which causes the material to fail.*

***Keywords: Failure Analysis, Failure, Boiler, Reheater Tube, Creep, Oxide Scale, Thinning of the Tube Wall***

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur atas kehadiran Tuhan Yesus yang Maha Esa, yang telah melimpahkan hikmat dan kasih-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan tugas akhir ini.

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat yang harus di penuhi untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

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

- Orang tua terkasih, **Yohannes Bangun dan Rina Novida Ginting**, sebagai pendukung baik dari segi jasmani dan rohani, serta kasih dan waktunya sehingga dapat menemani hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan. Terima kasih banyak papa dan mama.
- Bapak **Suwarno S.T, M. Sc, Ph. D**, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang senantiasa memberikan banyak bantuan seperti saran-saran dan ilmu-ilmu dalam pengerjaan dan penulisan tugas akhir
- Bapak **Putu Suwarta, S. T, M. Sc, Ph. D**; Bapak **Indra Sidharta, S.T., M. Sc.**; dan Bapak **Fahmi Mubarok, S.T., M. Sc, Ph. D** , selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak saran untuk menyempurnakan penulisan tugas akhir ini.

- Kepada adik saya terkasih, **Yori Timotius Bangun**, dan **Andrey Jeremy** terima kasih atas segala dukungan baik dalam segi finansial maupun motivasi.
- Kepada yang terkasih, **Ribka Tabitha** terima kasih atas dukungan dan motivasinya selama pengerjaan tugas akhir ini.
- **Laboratorium Metalurgi** dengan segala fasilitasnya dan canda tawanya sehingga penulisan tugas akhir ini dapat terselesaikan.
- Kepada teman-teman SMA, **Jason Vincent, Elvina Maxentia, Angelreika, Kavel, Farent, Yut, Tarin, Yanuarche, Chelsea Kezia, Gracia, Glory, Clement, Anthony, Celine**, terimakasih atas dukungan dalam bentuk motivasi dan lelucon.
- Kepada teman-teman **M59**, terimakasih atas dukungannya dan telah menyambut saya sebagai keluarga di Teknik Mesin ITS.
- Kepada teman-teman Surabaya, **Pieter, Anzelmus**, dan **Gemilang**, terima kasih atas keluarga baru yang sudah kalian hadirkan di kota Surabaya tercinta.
- Kepada seluruh staff dan karyawan **Mesin Music Club**, terima kasih atas pembelajaran untuk berorganisasi di kampus tercinta. Semoga sukses dan berkembang selalu.

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah dan Asumsi.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Boiler.....	7
2.1.1 Batubara Subbituminous.....	8
2.2 Reheater.....	8
2.3 SA 213 T22.....	10
2.4 Hydrogen Damage.....	11
2.5 Creep.....	12
2.6 Oxidation.....	15
2.7 Penelitian Terdahulu.....	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Cause and Effect Diagram atau Fishbone Diagram.....	21
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	22
3.3 Peralatan Penelitian.....	23

3.4 Langkah-Langkah Penelitian.....	25
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Cause and Effect Diagram atau Fishbone Diagram.....	29
4.2 Kondisi Operasi Kerja Tube Reheater.....	29
4.3 Pengamatan Visual dan Pengukuran Tube .....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
4.4 Pengamatan Komposisi Kimia .....	34
4.5 Pengujian Metallographi .....	35
4.6 Pengujian Scanning Electron Microscope.....	39
4.7 Pengujian Microhardness .....	42
4.8 Pembahasan.....	45
BAB V KESIMPULAN .....	49
DAFTAR PUSTAKA.....	52

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Skema Boiler Sub Critical 600 MW .....	2
Gambar 1. 2 Kegagalan pada Reheater Tube .....	3
Gambar 2. 1 Contoh kegagalan yang terjadi pada tube reheater .....	9
Gambar 2. 2 Siklus Rankine.....	9
Gambar 2. 3 Kegagalan karena Hydrogen Damage .....	12
Gambar 2. 4 Laju Creep .....	13
Gambar 2. 5 (a) Daerah 30 cm dari kegagalan (b) Kegagalan ledakan lebar karena overheating .....	17
Gambar 2. 6 (a) Mikrostruktur dekat kecacatan (b) Mikrostruktur daerah kecacatan .....	18
Gambar 2. 7 Kegagalan karena overheating.....	19
Gambar 3. 1 Fishbone Diagram .....	21
Gambar 3. 2 Flowchart.....	22
Gambar 3. 3 Mikroskop Optis digital olimpus BX60M.....	24
Gambar 4. 1 Fishbone Diagram Kegagalan Tube Reheater ...	29
Gambar 4. 2 Skema Operasional Tube Reheater.....	30
Gambar 4. 3 Potongan Spesimen Tube Pada Daerah Jauh Dari Kegagalan.....	32
Gambar 4. 4 Potongan Spesimen Tube Pada Daerah Kegagalan.....	32
Gambar 4. 5 Pengukuran Dimensi Spesimen Daerah Kegagalan.....	33
Gambar 4. 6 Spesimen Pengujian Metallography Pada Daerah Jauh Dari Kecacatan.....	36
Gambar 4. 7 Mikrostruktur Titik 1 Pada Daerah Jauh Dari Kecacatan .....	36
Gambar 4. 8 Mikrostruktur Titik 2 Pada Daerah Jauh Dari Kecacatan .....	37
Gambar 4. 9 Mikrostruktur Titik 3 Pada Daerah Jauh Dari Kecacatan .....	37
Gambar 4. 10 Spesimen Pengujian SEM Pada Daerah Kecacatan .....	40

Gambar 4. 11 Hasil Titik 1 Pengujian SEM pada Daerah Kecacatan .....	41
Gambar 4. 12 Hasil Titik 2 Pengujian SEM pada Daerah Kecacatan .....	42
Gambar 4. 13 Sample Tube Microhardness pada Daerah Kecacatan .....	43
Gambar 4. 14 Sample Tube Mikrohardness pada Tube Baru.	44

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi boiler sub critical 600 MW .....	8
Tabel 2. 2 Standard komposisi kimia SA213 grade T22.....	10
Tabel 4. 1 Data Operasional Reheater Tube.....	30
Tabel 4. 2 Ketebalan Design Tube Daerah Kegagalan.....	33
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Spektrometer pada Tube .....	34
Tabel 4. 4 Hasil Microhardness pada Sample Tube Daerah Kecacatan .....	43
Tabel 4. 5 Hasil Microhardness pada Sample Tube Baru .....	44

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

# BAB I

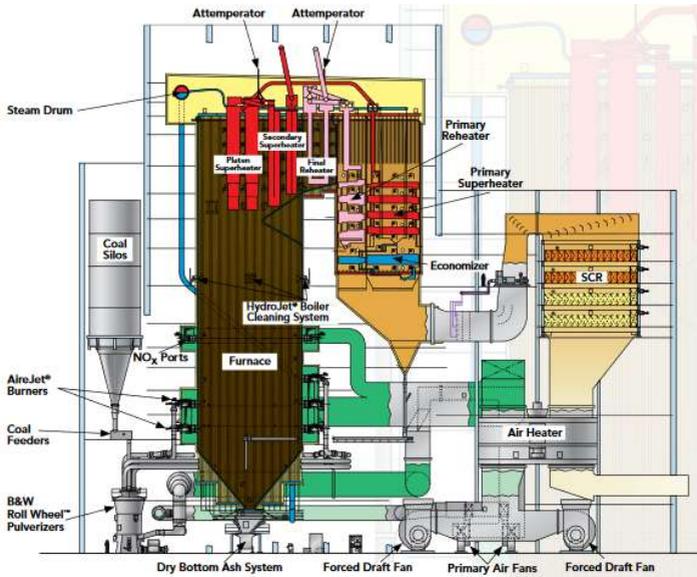
## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan zaman terus menunjukkan peningkatan kebutuhan akses listrik untuk menunjang kehidupan masyarakat. Menurut kementerian Energi dan Sumber Daya dari tahun 2019-2038, rata-rata pertumbuhan kebutuhan energi listrik nasional sebesar 6,9 % setiap tahunnya. Kebutuhan listrik tersebut didominasi oleh sektor industri. Kebutuhan listrik haruslah diimbangi dengan adanya produksi listrik, dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu menambah jumlah penghasil listrik (pembangkit listrik) atau meningkatkan efisiensi pembangkit listrik yang telah tersedia. Namun menambah jumlah pembangkit listrik membutuhkan waktu yang lama dan sulit dibandingkan dengan menaikkan efisiensi dari pembangkit listrik yang telah tersedia. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit yang menjadi pendorong penghasil listrik di Indonesia. PLTU Suralaya merupakan salah satu pembangkit listrik yang ada di Indonesia yang berada di daerah kecamatan Pulo Merak, kota Cilegon, Banten yang memiliki kapasitas 3400 MW. PLTU Suralaya memiliki 3 komponen penting yaitu boiler, turbin, dan generator.

Seiring dengan berkembangnya pertumbuhan kebutuhan industri, maka kebutuhan akan kapasitas listrik pun akan semakin tinggi sehingga efisiensi harus ditingkatkan. Efisiensi dapat dilakukan dengan mencegah kerusakan/kebocoran yang akan mengurangi tingkat efisiensi pembangkit tersebut. Salah satu komponen yang *critical* dalam kerusakan/kebocoran adalah boiler. Boiler adalah suatu bejana tertutup yang

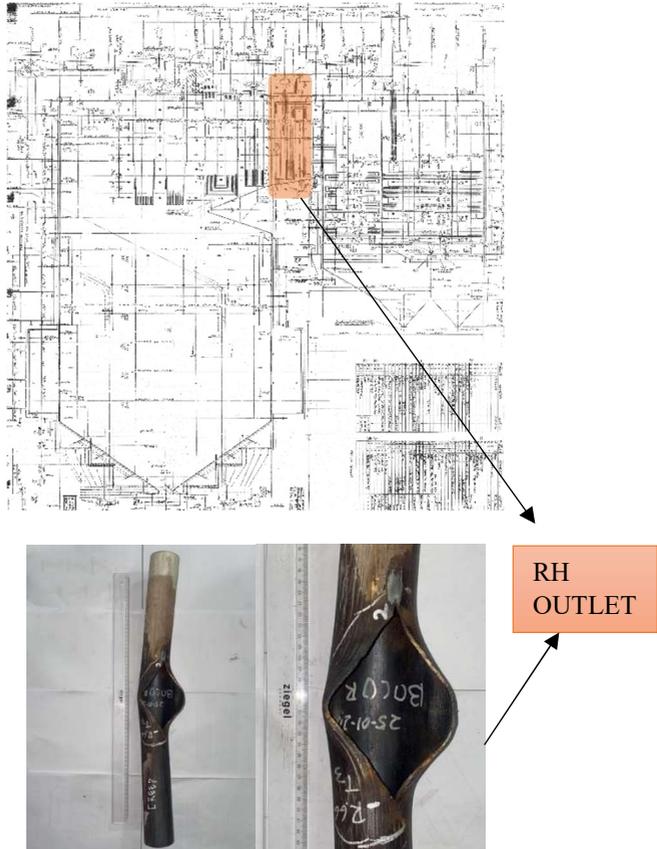
berfungsi untuk memanaskan air menjadi aliran uap panas bertekanan tinggi yang digunakan untuk memutar turbin, putaran turbin tersebut disambungkan dengan generator yang akan mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. *Boiler* yang digunakan pada PLTU Suralaya merupakan boiler sub critical yang memanfaatkan kalor dari batu bara sub bituminous.



Gambar1. 1 Skema Boiler Sub Critical 600 MW (Babcok dan Wilcox,2016)

Boiler beroperasi dengan kinerja yang sangat rentan terhadap kegagalan karena beroperasi pada temperatur yang tinggi. Kegagalan yang terjadi pada boiler akan menurunkan tingkat efisiensi pada pembangkit listrik. Komponen yang sering mengalami kegagalan pada boiler adalah tube reheater. Komponen ini berfungsi untuk menaikkan (memanaskan)

kembali temperatur uap superheater setelah memutar turbin. Operasi kerja pada *reheater tube* dapat mencapai 500°C, oleh karena itu komponen ini sangat rawan akan terjadinya kegagalan. Pada boiler ini reheater tube mengalami kegagalan dengan bentuk ledakan lebar pada bagian reheater outlet nya.



Gambar1. 2 Kegagalan pada *Reheater Tube*

Kegagalan boiler yang terjadi dapat menimbulkan dampak yang besar terutama dalam segi cost, maka dari itu perlu dilakukan analisis kegagalan tersebut dibantu dengan beberapa tools. Maka dari itu diperlukan analisis kegagalan, agar diketahui mekanisme kegagalan pada boiler tersebut agar kegagalan yang serupa tidak terulang di kemudian hari.

## 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan Masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apa penyebab terjadinya kegagalan tube reheater pada *Boiler Sub Critical 600 MW*?
2. Bagaimana proses mekanisme terjadinya kegagalan *tube reheater* pada *Boiler Sub Critical 600 MW*?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian analisis kegagalan ini adalah :

1. Mengetahui penyebab terjadinya kegagalan *tube reheater* pada *Boiler Sub Critical 600 MW*
2. Mengetahui proses mekanisme terjadinya kegagalan *tube reheater* pada *Boiler Sub Critical 600 MW*

## 1.4 Batasan Masalah dan Asumsi

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

1. Aliran dalam *tube* mempunyai temperatur yang konstan.
2. Tekanan dalam *tube* konstan
3. Desain awal yang digunakan sudah sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat penelitian bagi penulis maupun bagi institusi perusahaan adalah sebagai berikut:

1. Menjadi pertimbangan untuk perusahaan pembangkit dalam segi operasi dan perawatan agar kegagalan yang serupa tidak terjadi di kemudian hari
2. Menjalinkan hubungan yang baik antara institusi perusahaan dengan institusi pendidikan
3. Menjadi tambahan ilmu dengan adanya keadaan kegagalan nyata pada analisis kegagalan bagi kalangan akademisi

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Boiler**

Boiler merupakan bagian dari steam generator yang mengubah fase cair menjadi fase uap. Panas yang dihasilkan boiler berasal dari *furnace*, bahan bakar diperlukan dalam proses pembakaran seperti batubara (contoh: subbituminous), fuel gas, dan lainnya. Boiler harus memiliki desain yang dapat menyerap panas maksimum yang dilepaskan saat pembakaran. Prinsip kerja dari boiler adalah sebuah wadah yang berisi air, pembakaran bahan bakar menghasilkan panas yang ditransfer ke wadah. Air yang berada di dalam wadah akan menguap, uap yang dihasilkan akan ditransfer menuju tempat lain melalui pipa yang terhubung ke wadah. Pipa lainnya membawa air (*feedwater*) ke wadah untuk menggantikan air yang telah menguap. Salah satu jenis boiler yang umum digunakan adalah boiler subcritical. Boiler subcritical adalah boiler yang menggunakan fluida bekerja dengan suhu dibawah 540 °C dan tekanan diantara 2500 psi – 3200 psi. Fluida yang dihasilkan pada boiler ini tidaklah homogen (fluida cair dan uap) sehingga dibutuhkan steam drum untuk memisahkan fluida cair dan uap yang kemudian dipanaskan kembali menjadi superheated steam, superheated steam inilah yang digunakan untuk memutar turbin. Salah satu boiler yang digunakan adalah boiler tipe Wilcox dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Spesifikasi *Boiler Sub Critical 600 MW*

<b>Spesifikasi Boiler Sub Critical 600 MW</b>	
<b>Manufacture</b>	Babcock Wilcox
<b>Type</b>	Carolina Radian Boiler, Balance Draft, Natural Circulation, Single Reheat, Top Supported with Single Drum
<b>Design Pressure Superheater outlet</b>	174 kg / cm <sup>2</sup>
<b>Flow Steam</b>	1.953 Ton / jam
<b>Temperature Superheater dan Reheater outlet</b>	540°C
<b>Pressure Reheater outlet</b>	59 kg / cm <sup>2</sup>
<b>Coal / oil burner</b>	36 pcs

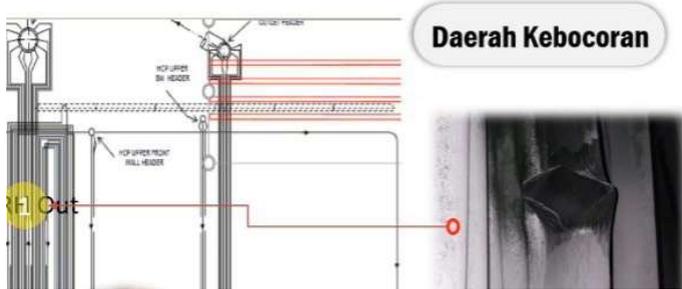
### 2.1.1 Batubara Subbituminous

Merupakan salah satu jenis batubara yang banyak digunakan dalam pembangkit listrik tenaga uap. Batubara ini memiliki properties batubara antara lignite dan bituminous, batubara ini mengandung banyak volatile yang membuatnya mudah terbakar dan pembakaran yang stabil. Batubara ini memiliki kelembaman 15-30 % yang melekat tergantung dari beratnya sendiri.

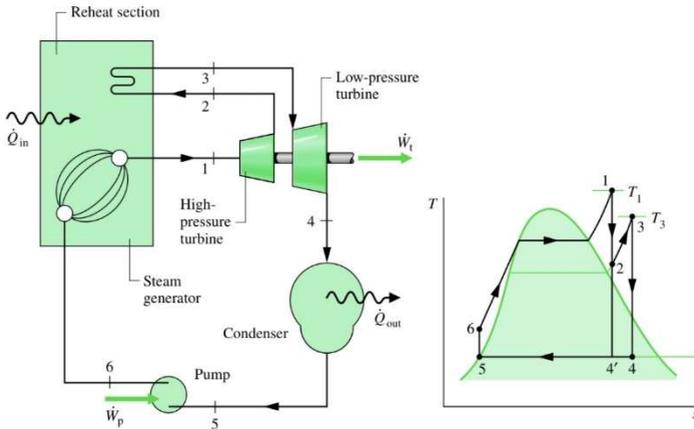
### 2.2 Reheater

Reheater adalah suatu komponen pada boiler yang berfungsi untuk memanaskan kembali uap pertama dari turbin. Reheater merupakan suatu modifikasi boiler, dimana dapat meningkatkan efisiensi dari boiler yang menghasilkan tekanan boiler serta menghindari kualitas uap yang buruk dari turbine

exhaust. Reheater pada boiler subcritical umumnya bekerja pada temperatur 540 ° C dan pada tekanan 840 psi.



Gambar 2. 1 Contoh kegagalan yang terjadi pada *reheater tube*



Gambar 2. 2 Siklus Rankine (Moran dan Saphiro,2010)

Pada proses 1-2, uap mengembang melalui turbin tahap pertama menuju beberapa tekanan antara generator dan tekanan kondensor. Uap kemudian dipanaskan kembali pada reheater seperti proses 2-3. Pada proses ideal yang terjadi pada reheater tidak akan ada penurunan tekanan saat uap dipanaskan kembali. Lalu uap mengembang menuju kondensor seperti proses 3-4. Fungsi utama reheater adalah meningkatkan kualitas uap hasil

dari pengeluaran turbin, dapat dilihat pada diagram temperatur terhadap entropi (T-s) dimana entropi yang dihasilkan memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan pembangkit yang tidak menggunakan reheater.

### 2.3 SA 213 T22

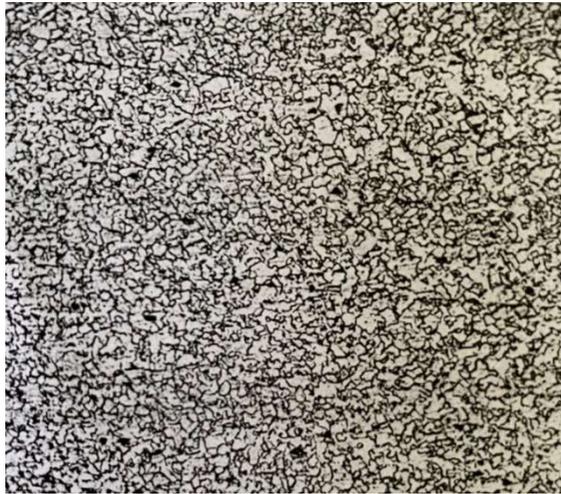
Material SA 213 T22 atau dapat disebut dengan material standard ASTM A213 dengan *grade 22*. Material ini merupakan material yang banyak digunakan dalam penggunaan tube boiler. ASTM A 213 telah menerapkan standard komposisi kimia yang terdapat pada material jenis ini.

Tabel 2. 2 Standard komposisi kimia SA213 grade T22

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0,05- 0,15	0,30- 0,60	0,025	0,025	0,50	1,90 - 2,60	0,87 - 1,13

#### 2.3.1 Standar Mikro struktur ASTM A213

Sebuah material memiliki standard mikrostruktur yang didapatkan dari beberapa percobaan yang sudah dilakukan. Material ASTM A213 merupakan material standar yang sering digunakan pada sebuah tube boiler. *Material* ASTM A 213 ini merupakan low carbon steel dengan matriks ferrite.



Gambar 2. Mikro struktur standar ASTM A 213  
(Sumber: American Society for Metals.,1973)

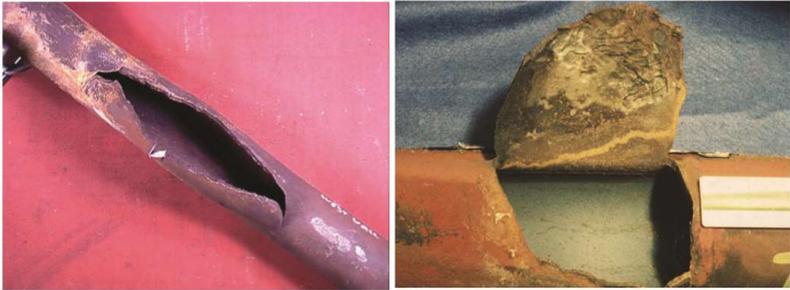
Pada mikro struktur standar ASTM A 213 yang sudah dipanaskan pada 723 dan pendinginan udara, didapatkan bahwa material tersebut merupakan matriks ferrite dan banyak karbida yang terdispersi

#### 2.4 Hydrogen Damage

Degradasi mekanis dengan adanya interaksi material dengan hidrogen merupakan suatu fenomena yang kompleks pada degradasi material logam. Hidrogen melebur dalam besi, baja, maupun alloy Hidrogen ini sering kali dihubungkan dengan kegagalan yang terjadi karena Hidrogen dapat menurunkan sifat mekanik dari suatu material. Hydrogen damage juga merupakan suatu kegagalan yang disebabkan oleh keadaan lingkungan, mikro struktur yang berubah akibat adanya interaksi antara material dengan hidrogen. *Hydrogen* damage merupakan suatu kerusakan yang melemahkan suatu material karena terbentuknya retakan yang berbentuk mikro, retakan umum terjadi pada batas butir. Pada material baja, atom-atom

hydrogen akan bergabung menjadi  $H_2$  yang memberikan tekanan pada material sehingga regangan lokal dapat terjadi.

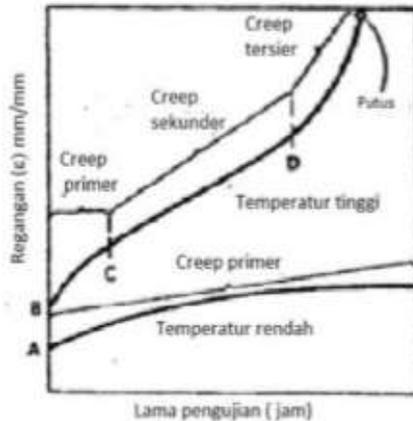
Hydrogen embrittlement merupakan mekanisme dari hydrogen damage yang dimana akan menurunkan sifat mekanik suatu material seperti menurunnya keuletan dan kekuatan tarik, dimana berdampak pada berkurangnya ketahanan fracture suatu material.



Gambar 2. 3 Kegagalan karena Hydrogen Damage

### 2.5 Creep

*Creep* adalah deformasi lambat suatu material terhadap temperatur tinggi dan tegangan yang konstan sehingga memberikan deformasi permanen. Pada temperatur rendah ( $>40$  % titik lebur) fenomena *creep* sulit untuk diamati secara jelas, sebaliknya pada temperatur tinggi, fenomena *creep* mudah untuk diamati secara jelas. Pada kegagalan creep, kegagalan yang sering terjadi akibat adanya pertumbuhan dan penggabungan void yang terletak pada batas butir (Cocks dan Ashby,1982).



Gambar 2. 4 Laju *Creep* (Nitiswati, Sudarno, Santosa, Rahman,2018)

Fenomena creep pada umumnya terbagi menjadi tiga tahapan. Tahap 1 adalah *creep* primer (*transient creep*), tahap 2 adalah creep sekunder (*steady-state creep*), dan tahap 3 adalah creep tersier yang diakhiri dengan *fracture*. Ketiga tahapan ini digambarkan pada suatu kurva *creep*. Beberapa masalah terkait kerusakan creep adalah komponen yang beroperasi pada temperatur tinggi dalam jangka waktu pendek (short term overheating) maupun jangka panjang (long term overheating). Pada pengujian yang telah dilakukan ditemukan bahwa perkembangan rongga (voids) ditemukan pada kegagalan tube boiler bahwa rongga kasar (coalescence) diisi oleh komposisi oksidasi yang dihasilkan dari permukaan intergranular crack pada permukaan luar tube boiler (Psyllaki, Pantazopoulos, dan Lefakis,2009).

Pada gambar 2.4 terlihat kurva temperatur rendah, sulit untuk mengamati terjadinya proses creep sekunder hingga creep tersier. Pada temperatur tinggi, regangan bergantung pada creep primer sehingga pada suatu kondisi deformasi bergantung pada waktu dan regangan, jika hal ini terjadi maka material

memasuki tahap creep sekunder meskipun berlangsung lama, hingga material memasuki kondisi tersier yang kemudian mengalami fracture.

### 2.5.1 Long term Overheating

Long term overheating merupakan kegagalan yang kerap kali terjadi pada sebuah pembangkit yang dimana tube terpapar temperatur yang tinggi dalam jangka waktu tertentu. Kegagalan ini merupakan kegagalan dimana material terpapar panas diatas batas panas operasional suatu material dalam jangka waktu tertentu. Kegagalan tube yang dikarenakan long term overheating sering membengkak (bulging) dan memiliki sobekan tipis yang memanjang. Lapisan oksida sering didapatkan setelah kegagalan long term overheating ini terjadi, lapisan oksida pada permukaan dalam tube akan mencegah pendinginan yang akan terjadi pada tube oleh steam flow. Oleh sebab itu, tube boiler akan mengalami panas yang meningkat dari temperatur operasionalnya, dengan kondisi seperti ini secepatnya tube akan mengalami kegagalan yang disebabkan oleh creep rupture. Kegagalan long term overheating biasanya memiliki bentuk makroskopis seperti berikut:



Gambar 2. Kegagalan Akibat Long term Overheating (EPRI,2009)

### 2.5.2 Short Term Overheating

Kegagalan ini merupakan kegagalan yang sering terjadi saat boiler baru saja dioperasikan (start-up). Kegagalan ini terjadi akibat peningkatan temperatur dalam jangka waktu yang

sedikit, hoop stress dari internal steam pressure mencapai tensile strength material tube Kegagalan rupture stress karena short term overheating saat tube mengalami suhu sangat tinggi akibat kurangnya pendinginan uap atau aliran air. Pada kegagalan ini kerap kali didapatkan mikro struktur dengan terbentuknya perubahan mikro struktur dari pearlite menjadi martensite atau pun bainite yang dimana memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dari mikro struktur sebelumnya, perubahan ini diakibatkan adanya pendinginan cepat yang terjadi akibat kegagalan short term overheating yang terjadi. Short term overheating memiliki bentuk kegagalan dengan bentuk makroskopis dengan bentuk ledakan terbuka lebar sebagai berikut:

Gambar 2. Kegagalan Akibat Long term Overheating  
(EPRI,2009)

### *2.6 Oxidation*

Oksidasi adalah suatu kecenderungan suatu material untuk bereaksi dengan oksigen. Oksidasi pada material seperti superheater ataupun reheater sering kali disebut high temperature oxidation. Material yang terpapar panas yang tinggi membutuhkan sebuah proteksi dari chromium oksida, namun oksida non protektif menghambat terbentuknya chromium oksida tersebut.

Pada material yang terpapar langsung, terbentuk 2 lapisan pada oxide scales yaitu outer scales and inner scales. Outer scales mengandung  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sedangkan inner scale mengandung  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$ . Pada dunia industri, pembentukan

non protective oxidation menjadi masalah yang cukup serius. Terdapat tiga kegagalan yang terjadi yaitu:

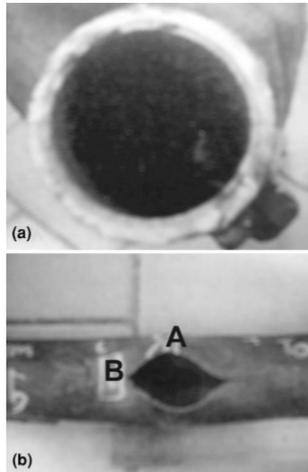
1. Hilangnya ketebalan karena oksidasi yang meningkatkan tegangan pada dinding tube, sehingga kecacatan creep premature dapat terjadi
2. Konduktivitas thermal yang lebih rendah dibandingkan skala oksida akan mengurangi energi perpindahan panas yang melintas pada dinding tube.
3. Skala oksida yang terlepas dari tube akan menyebabkan penyumbatan pada tube melengkung, jika partikel ini masuk turbin uap dan nozzle dapat mengakibatkan kecacatan akibat erosi.

## 2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait kegagalan reheater tube sudah banyak dilakukan oleh beberapa pihak yang bertujuan agar menjadi referensi maupun dasar teori mengenai kegagalan yang serupa agar penyebab dan mekanisme dari kegagalan yang terjadi dapat segera disimpulkan.

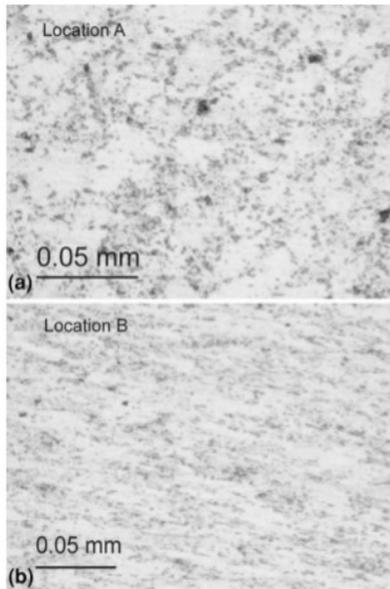
- J Purbolaksono dkk “Failure Investigation on Reheater Tube Due to Deposit and Wall Thinning” pada tahun 2009. Penelitian yang telah dilakukan oleh J. Purbolaksono dan kawan-kawan ini bertujuan untuk menganalisis kegagalan dari suatu tube reheater material SA-213-T22 dengan dilakukannya pengamatan visual, analisis finite element, dan pengamatan mikroskopik. Pada pengamatan visual ditemukan bahwa tube reheater mengalami kegagalan berupa ledakan terbuka lebar dan terjadinya penipisan dinding *tube*. Penipisan yang terjadi yaitu 1,8 mm (30 cm dari daerah pecah) dan 1,1 mm (2 m dari daerah pecah), serta ledakan terbuka lebar yang terjadi memiliki dimensi pecah 2,8 cm dan 5,5 mm. Analisis finite element dilakukan berdasarkan data-data yang

tersedia dan dipadatkan bahwa tube reheater mengalami kegagalan setelah 99.083 jam. Pengamatan mikroskopik dilakukan pada daerah yang mengalami ledakan terbuka lebar dan 30 cm dari kegagalan.



Gambar 2. 5 (a) Daerah 30 cm dari kegagalan (b) Kegagalan ledakan lebar karena overheating

Hasil yang didapatkan bahwa terjadinya overheating, terlihat dari perbedaan struktur mikro yang terjadi antara lokasi A dan B, dimana lokasi A terlihat masih memiliki banyak partikel karbon sedangkan lokasi B tidak.



Gambar 2. 6 (a) Mikro struktur dekat kecacatan (b) Mikro struktur daerah kecacatan (Purbolaksono J,2009)

Penyebab utama dari kegagalan tube ini adalah adanya interaksi antara pembentukan oxide scale yang berlebihan pada bagian dalam dan penipisan dinding luar tube karena adanya korosi abu batubara. Akibatnya reheater tube bekerja di temperatur yang lebih tinggi dan bekerja pada nilai tegangan maksimum yang di izinkan dalam jangka waktu yang lama.

- Jiao Zhong, dkk. “*Failure Analysis on High Temperature Reheater Tube of T23 Steel in a 600 MW Thermal Power Plant Boiler*” pada tahun 2019. Penelitian ini dilakukan oleh

Jiao Zhong dan kawan-kawan ini bertujuan untuk menganalisis kegagalan pada tube reheater material SA-213-T23. Penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu pengamatan visual, analisis komposisi kimia, pengamatan mikro struktur, dan pengujian tarik. Pengamatan visual menunjukkan terjadinya dua kegagalan berupa bentuk sobekan dan bentuk ledakan. Analisis komposisi kimia dilakukan dengan membandingkan hasil spectrometer dari



Gambar 2. 7 Kegagalan karena overheating (Zhong J,2019)

material T23 yang mengalami kegagalan dengan standar A213 M (standar untuk material T23). Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mengamati tebal lapisan oksida yang terjadi, serta mengamati matriks dari bainite dan ferrite. Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan data tensile strength dan yield strength material tersebut.

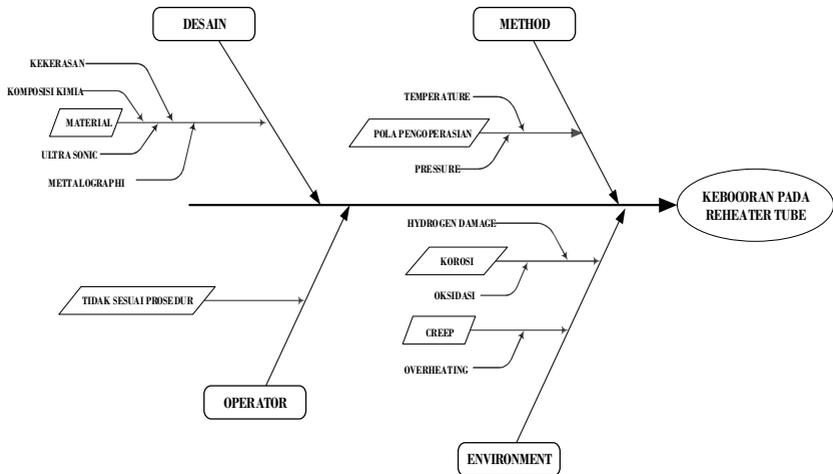
Hasil yang didapatkan dari analisis kegagalan yang telah dilakukan adalah *long-term overheating*, dimana mengarah kepada penurunan *yield strength* dan *tensile strength* pada temperatur kamar yang menyebabkan *longitudinal crack*

*rupture*, serta terdapat lapisan oksida baik di kecacatan pertama maupun kecacatan kedua.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Cause and Effect Diagram atau Fishbone Diagram

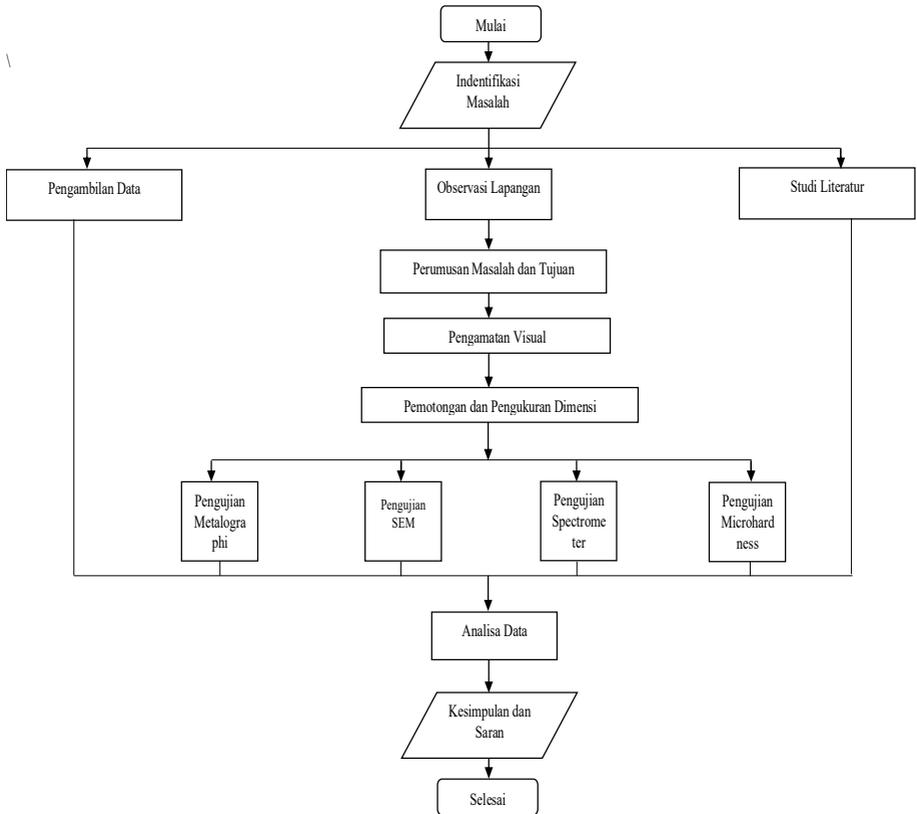
Diagram ini dinamakan sebagai diagram tulang ikan karena bentuk dari diagram nya yang seperti tulang ikan. Diagram fishbone merupakan sebuah metode /cara untuk mengidentifikasi akar masalah dari suatu masalah yang ada. Diagram ini juga disebut sebagai diagram sebab – akibat atau cause effect diagram



Gambar 3. 1 Fishbone Diagram

### 3.2 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir atau sering disebut flowchart merupakan suatu metode yang digunakan untuk mempermudah untuk melihat proses yang harus dilakukan dalam suatu penelitian. Langkah – langkah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 2 Flowchart

### 3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan untuk melakukan analisis kegagalan ini adalah sebagai berikut:

1. Kamera Digital

Alat yang digunakan untuk mendapatkan pengamatan visual yang dilakukan pada benda kerja serta mendokumentasikan benda kerja.

2. Penggaris dan Jangka Sorong

Alat yang digunakan untuk mengukur dimensi benda kerja, dimensi yang diukur adalah panjang dan diameter dari spesimen tersebut serta mengukur dimensi lain jika diperlukan. Penggaris yang digunakan memiliki ketelitian 0,1 mm, sedangkan jangka sorong yang digunakan memiliki ketelitian 0,01 mm.

3. Alat Preparasi Spesimen

Dalam mempersiapkan spesimen untuk dilakukan beberapa pengujian, namun dikhususkan pengujian *metallography*. Sebelum dilakukannya pengujian *metallography*, spesimen harus terlebih dahulu dipotong, grinding, dan etsa. Alat yang digunakan untuk memotong spesimen uji sesuai dengan dimensi dan posisi yang diinginkan dan telah diukur sebelumnya. Alat yang digunakan untuk menghaluskan permukaan suatu benda spesimen yang telah dipotong agar dapat dilakukan proses *metallography* (sebelum dilakukan proses etching). Proses grinding menggunakan mesin grinder Metkon GRIPO 300-IV dengan kertas amplas grid 80, 100, 220, 400, 600, 800, 1000, 2000, dan 5000. Proses Polishing menggunakan dengan mesin yang sama dengan kertas beludru dan autosol. Proses etching ini menggunakan larutan dengan 100 ml alkohol dan 5 ml  $\text{HNO}_3$ . Proses etching ini dibutuhkan gelas ukur, wadah kaca, pipet, dan pengering untuk melakukan proses etching tersebut.

4. Mikroskop Optis *digital olimpus BX60M*  
Alat yang digunakan untuk mengamati struktur mikro dari spesimen uji serta bentuk struktur mikro kecacatan yang terjadi serta penipisan yang terjadi pada spesimen uji.



Gambar 3. 3 Mikroskop Optis digital Olympus BX60M

5. *Spectrometer*  
Alat yang digunakan adalah tipe Foundry Master Pro untuk pengujian komposisi kimia agar mengetahui komposisi kimia serta unsur-unsurnya secara *kuantitatif* yang terdapat pada benda kerja yang akan diamati.
6. Mesin *Scanning Electron Microscope*  
Alat yang digunakan untuk melihat lapisan – lapisan yang dapat menyebabkan kecacatan yang berukuran nanometer.
7. Mesin Uji Kekerasan mikro  
Merupakan salah satu metode destructive test dengan skala mikro yang menggunakan indenter untuk mengetahui nilai kekerasan dari suatu spesimen, terutama pada daerah kecacatan.

### 3.4 Langkah-Langkah Penelitian

Dalam melakukan analisis kegagalan pengujian ini dilakukan beberapa tahapan agar kegiatan penelitian dapat berlangsung dengan baik dan sistematis. Tahapan penelitian analisis kegagalan adalah sebagai berikut:

#### 1. Identifikasi Masalah

Dilakukannya pemeriksaan terhadap boiler di PLTU Suralaya, didapatkan terdapat kebocoran pada boiler. Salah satu komponen boiler yang mengalami kebocoran / kecacatan adalah Reheater Tube. Kecacatan dapat dilihat adanya pembengkakan pada tube reheater dan kecacatan berbentuk fish mouth.

#### 2. Observasi Lapangan

Setelah diketahui permasalahan yang terjadi, dilakukan observasi lapangan yang bertujuan untuk mengumpulkan data - data berupa kondisi aktual spesimen uji serta pengambilan foto-foto spesimen benda uji agar dengan merumuskan masalah yang terjadi pada reheater tube di boiler PLTU Suralaya.

#### 3. Studi Literatur

Studi literatur merupakan suatu proses pencarian informasi yang didapatkan pada buku ataupun jurnal agar dapat dijadikan referensi dengan kegagalan yang serupa. Studi literatur ini dilakukan hingga penelitian selesai.

#### 4. Pengambilan Data Operasional dan Material

Setelah dilakukannya beberapa tahapan diatas, maka reheater tube dapat dijadikan objek penelitian analisis kegagalan. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengetahui penyebab dan mekanisme kecacatan yang terjadi pada reheater tube disertai dengan beberapa batasan masalah.

- a. Kondisi Operasional, didapatkan data yang berkaitan dengan operasional tube pada boiler, yaitu: temperature, letak, dan waktu pengoperasian.
  - b. Fluida yang mengalami kontak langsung dengan bagian tube yang mengalami failure baik bagian dalam maupun bagian luar tube serta pengaruhnya terhadap sistem.
  - c. Spesifikasi tube meliputi dimensi material, ukuran, dan bahan material
5. Perumusan Masalah dan Tujuan
- Setelah dilakukannya beberapa tahapan diatas, maka *reheater tube* dapat dijadikan objek penelitian analisis kegagalan. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengetahui penyebab dan mekanisme kecacatan yang terjadi pada *reheater tube* disertai dengan beberapa batasan masalah
6. Pengamatan Visual
- Pengamatan visual ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui letak kecacatan dan mengetahui bentuk kecacatan spesimen uji, lalu digunakan kamera digital untuk mendokumentasikan lokasi dan bentuk kecacatan yang terdapat pada bagian luar maupun bagian dalam spesimen uji.
7. Pemotongan dan Pengukuran Dimensi
- Setelah dilakukannya pengamatan visual, spesimen uji diukur beberapa dimensi antara lain dimensi kecacatan yang terjadi dan dimensi dari spesimen uji secara akurat dan menyeluruh. Setelah dilakukannya pengukuran dimensi, spesimen dipotong sesuai dengan lokasi dan dimensi yang diinginkan agar mempermudah menganalisis kecacatan baik secara makroskopis maupun mikroskopis.
8. Pengujian Metalografi

Pengujian Metalografi dilakukan agar mengetahui struktur mikro dari suatu spesimen uji, pengujian ini juga dapat membandingkan mikro struktur pada lokasi spesimen yang mengalami kecacatan dan yang tidak mengalami kecacatan. Pengujian ini dilakukan dengan beberapa persiapan, menghaluskan dengan kertas amplas dengan grid tertentu agar tidak terlihat stracth yang akan menghasilkan hasil yang kurang maksimal pada pengujian *metallography* tersebut, kemudian dilakukan proses polishing menggunakan autosol. Proses etching diperlukan agar terlihat batas butir dari spesimen uji yang ingin dilakukan uji *metallography* , larutan etsa yang digunakan adalah nital ( 100 ml ethanol dan 5 ml  $\text{HNO}_3$  ).Setelah proses etsa dilakukan , spesimen uji diamati struktur mikro nya menggunakan mikroskop digital dari perbesaran 100 x hingga 1000 x. Hasil yang didapatkan berupa struktur mikro yang dimana dapat dijadikan perbandingan antara beberapa titik, nantinya perbandingan struktur mikro ini dapat dijadikan referensi mekanisme kecacatan yang terjadi pada spesimen uji.

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

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui mikro struktur dari suatu spesimen uji dengan perbesaran hingga 3000000 x dengan kedalaman 4 – 0,4 mm dan resolusi sebesar 1-10 nm. Pengujian ini dapat menganalisa permukaan dan tekstur serta bentuk dan ukuran yang terdapat pada mikro struktur sampel. Adanya lapisan oksida yang terjadi pada suatu sampel dapat di identifikasi dari pengujian SEM, didapatkan pula ketebalan dari lapisan oksida yang terjadi dan ketebalan setiap lapisan di setiap titik uji. Hasil dari pengujian SEM ini dapat dijadikan pembanding dan hubungan terhadap temperatur operasi.

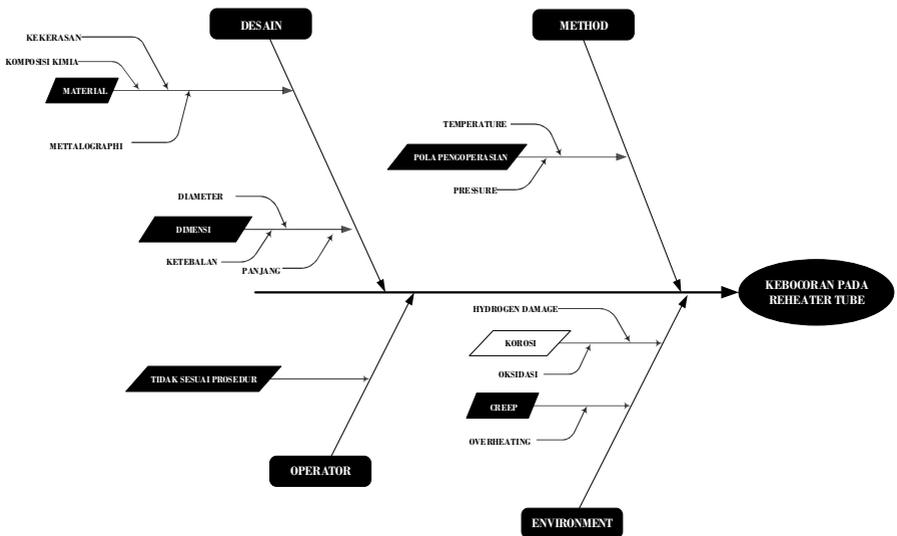
#### **10. Pengujian Uji Kekerasan Mikro**

Pengujian destructive test dengan skala mikro yang bertujuan untuk membandingkan kekerasan pada daerah kecacatan dan daerah yang tidak mengalami kecacatan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan indenter yang digunakan untuk memberikan indentasi pada suatu titik material. Spesimen disesuaikan posisinya dan untuk pembebanan dapat diatur pada alat uji. Setelah proses indentansi berlangsung, maka hasil yang didapatkan berupa kekerasan pada titik yang berbeda. Hasil yang didapatkan berupa tabel ataupun diagram yang dapat menentukan daerah mana yang mengalami pengurangan ketebalan pada material uji.

## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Cause and Effect Diagram atau *Fishbone Diagram*

Diagram ini dinamakan sebagai diagram tulang ikan karena bentuk dari diagram nya yang seperti tulang ikan. *Fishbone diagram* merupakan sebuah metode/cara untuk mengidentifikasi akar masalah dari suatu masalah yang terjadi.



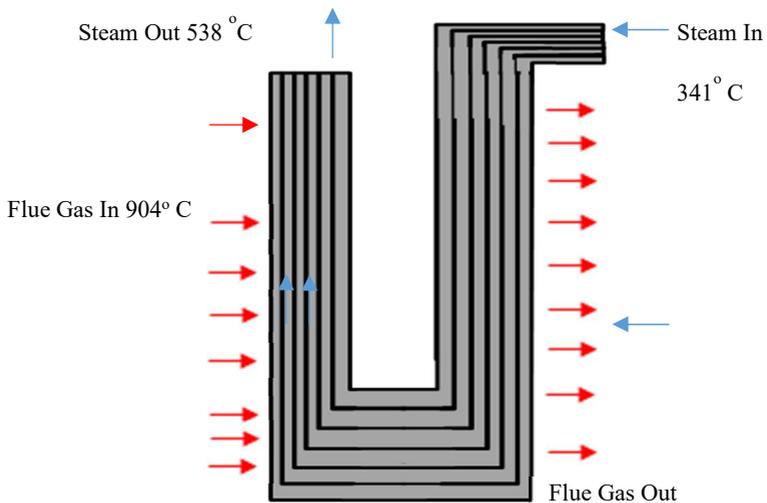
Gambar 4. 1 *Fishbone Diagram* Kegagalan Tube Reheater

### 4.2 Kondisi Operasi Kerja Tube Reheater

Pada kondisi operasi dari tube terdapat beberapa data operasional yang beroperasi pada tube reheater, meliputi: tekanan, temperatur, dan letak. *Steam* masuk *reheater* pada suhu 341°C dan keluar pada suhu 538°C. Data operasional tube adalah sebagai berikut:

<i>Steam at reheater outlet</i>	538 °C
<i>Steam at reheater inlet</i>	341 °C
<i>Steam at reheater outlet</i>	45,9 kg/cm <sup>2</sup> /g
<i>Steam at reheater inlet</i>	47,6 kg/cm <sup>2</sup> /g
<i>Flue gas at Reheater inlet</i>	904 °C
<i>Flue gas at Reheater exit</i>	419 °C
<i>Allowed Tube Temperature (standard)</i>	648,89 °C

Tabel 4. 1 Data Operasional Reheater Tube



### 4.3 Pengamatan Visual

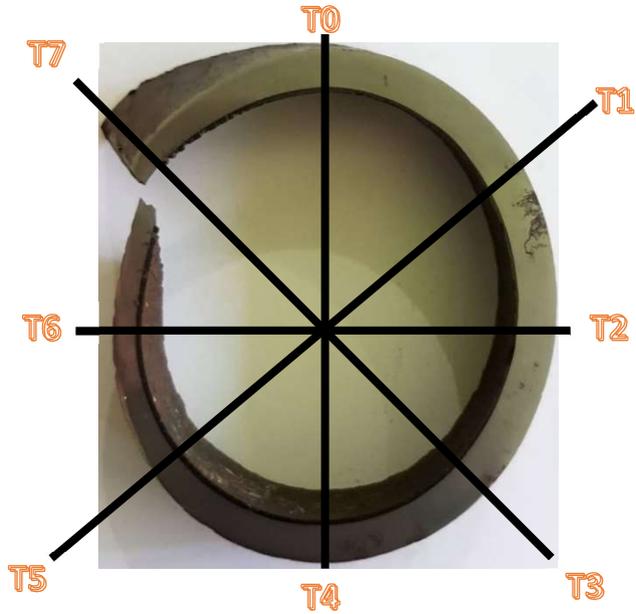
Pengamatan dari kegagalan yang terjadi pada *tube reheater* diawali dengan dilakukannya pengamatan visual serta beberapa pengukuran tertentu. Pengukuran dimensi dilakukan untuk mengukur apakah terdapat penipisan pada dinding tube. Pada pengamatan visual, pada spesimen terlihat bahwa terdapat adanya kecacatan dengan bentuk *fish mouth rupture* dengan dimensi sebagai berikut:



Gambar 4. 3 Potongan Spesimen Tube Pada Daerah Jauh Dari Kegagalan



Gambar 4. 4 Potongan Spesimen Tube Pada Daerah Kegagalan



Gambar 4. 5 Pengukuran Dimensi Spesimen Daerah Kegagalan

Pada pengukuran dimensi potongan tube pada daerah kecacatan didapatkan beberapa penipisan dinding tube pada daerah kecacatan, yaitu sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Ketebalan *Design* Tube Daerah Kegagalan

Dimensi Potongan Tube Daerah Kecacatan (mm)	
T0	5,88
T1	6,00
T2	5,84
T3	6,12
T4	5,92
T5	6,10

T6	4,12
T7	5,10

Dimensi yang didapatkan dari pengukuran terjadi penipisan yang signifikan pada T6 dengan dimensi ketebalan yaitu 4,12 mm, pada T7 pula terdapat penipisan yang terjadi dengan nilai ketebalan yaitu 5,10 mm. Penipisan terjadi pada daerah tube yang mengalami kecacatan *fish mouth*, sedangkan pada titik lain memiliki ketebalan yang cukup tebal. menurut standar ASTM A 213 T22 ketebalan dinding yang di izinkan sebesar kurang lebih 15% dari 6 mm yaitu sekitar 0,9 mm, sedangkan untuk T6 mengalami penipisan sekitar 1,88 mm.

#### 4.4 Pengujian Komposisi Kimia

Pengamatan komposisi kimia dilakukan dengan mengambil salah satu sample tube yang sudah dipreparasi sesuai dengan kebutuhan pengujian komposisi kimia. Diketahui bahwa material yang mengalami kecacatan merupakan material ASTM A213 grade T22.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Spektrometer pada Tube

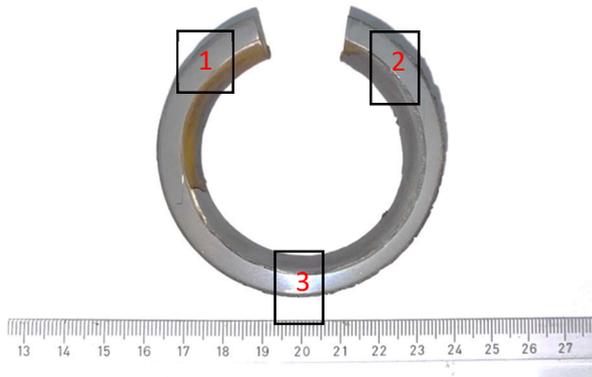
	ASTM A 213 gr T22	Sample Tube	Tube Baru
C	0,05-0,15	0,0678	0,0909
Mn	0,30-0,60	0,450	0,412
P	0,025	0,0089	0,0110
S	0,025	0,0010	< 0,0050
Si	0,50	0,225	0,304

Cr	1,90 - 2,60	2,03	1,90
Mo	0,87 - 1,13	1,01	0,880

Komposisi kimia tube dan tube baru yang dilakukan pengujian spektrometer dibandingkan dengan standar dari material ASTM A213 grade T22, di dapatkan bahwa material yang digunakan merupakan material ASTM A213 grade T22

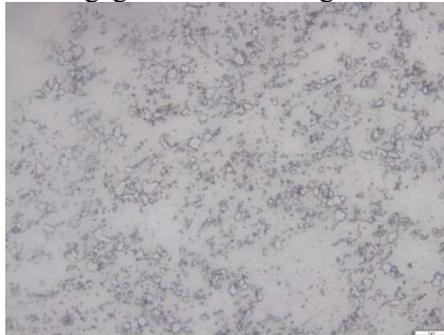
#### 4.5 Pengujian *Metallography*

Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop dengan tujuan mengetahui struktur mikro dari material ASTM A 213 grade T22 ini yang dimana merupakan *low carbon steel*. Pada pengujian *metallography* ini dilakukan pada beberapa daerah sample spesimen yaitu pengamatan pada potongan yang letaknya jauh dari kecacatan, dimana pengujian *metallography* yang dilakukan di amati pada 3 titik yaitu titik 1, titik 2, dan titik 3. Pengamatan *metallography* yang menggunakan *Olympus BX60M* dengan perbesaran yaitu 1000 kali.



Gambar 4. 6 Spesimen Pengujian Metallography Pada Daerah Jauh Dari Kecacatan

Pengamatan metallography pada titik 1 pada daerah jauh dari lokasi kegagalan adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 7 Mikro struktur Titik 1 Pada Daerah Jauh Dari Kecacatan

Pengamatan *metallography* pada titik 2 pada daerah jauh dari lokasi kegagalan adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 8 Mikro struktur Titik 2 Pada Daerah Jauh Dari Kecacatan

Pengamatan *metallography* pada titik 3 pada daerah jauh dari lokasi kegagalan adalah sebagai berikut:

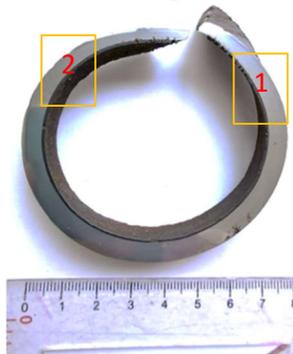


Gambar 4. 9 Mikro struktur Titik 3 Pada Daerah Jauh Dari Kecacatan

Pada mikro struktur yang sudah diamati didapatkan bahwa material tersebut merupakan *ferritic steels* yang dimana mikro struktur yang terdiri dari matriks *ferrite* Mikro struktur yang terang disebut *ferrite*. Pada daerah yang letaknya jauh dari kecacatan tidak terlihat adanya void pada titik 1, titik 2, maupun

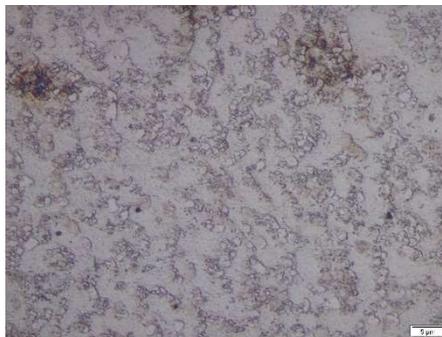
pada titik 3 pada potongan tube yang letaknya jauh dari kegagalan

Pengamatan *metallography* dilakukan juga pada daerah yang mengalami kegagalan dengan metode yang sama dengan pengamatan mikro struktur pada daerah jauh dari kegagalan. Pengamatan dilakukan pada 2 titik yaitu titik 1 dan titik 2.



Gambar 4.10 Spesimen Pengujian Metallography Pada Daerah Kecacatan

Pengamatan metallography pada titik 1 pada daerah lokasi kegagalan adalah sebagai berikut:



#### Gambar 4.11 Mikro struktur Titik 1 Pada Daerah Kecacatan

Pengamatan metallography pada titik 2 pada daerah lokasi kegagalan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.12 Mikro struktur Titik 2 Pada Daerah Kecacatan

Pada pengujian metallography daerah kegagalan titik 1 dan titik 2 didapatkan bahwa material merupakan matriks ferrite yang dimana terdapat banyak jumlah karbida pada titik 1 dan 2 yang memungkinkan terjadinya peningkatan kekerasan yang terjadi

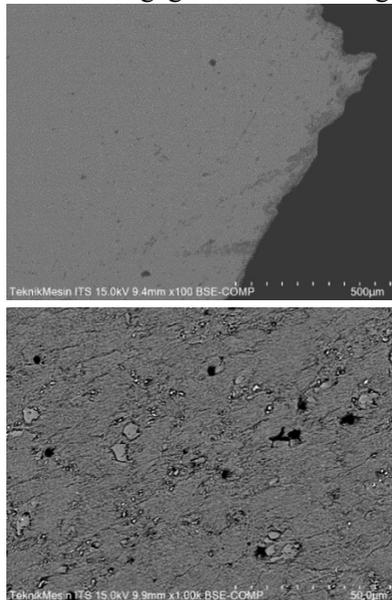
#### 4.6 Pengujian *Scanning Electron Microscope*

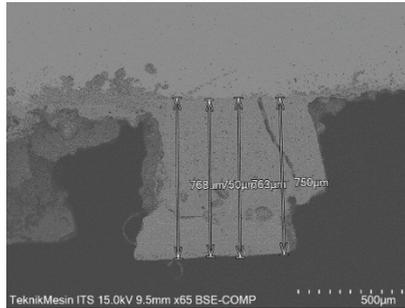
Pengujian yang dilakukan untuk melihat bentuk morfologi dari suatu spesimen yang mengalami kegagalan, dimana pengujian dilakukan untuk melihat secara jelas bentuk mikro struktur yang terjadi pada daerah yang mengalami kegagalan. Pada pengujian SEM ini dilakukan pada daerah sample tube yang mengalami kegagalan, ditinjau bagaimana keadaan mikro struktur suatu tube, serta menghitung dimensi dari lapisan oksida yang terbentuk pada daerah kegagalan. Pengujian dilakukan pada daerah yang mengalami kegagalan yang dimana pengujian dilakukan pada 2 titik yang berbeda yaitu titik 1 dan titik 2.



Gambar 4. 13 Spesimen Pengujian SEM Pada Daerah Kecacatan

Pengamatan *Scanning Electron Microscope* pada titik 1 pada daerah lokasi kegagalan adalah sebagai berikut:

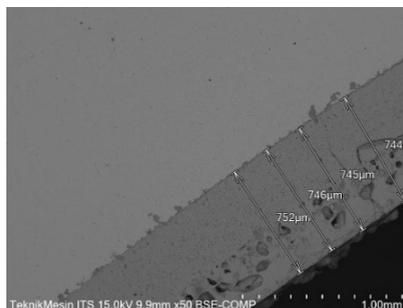


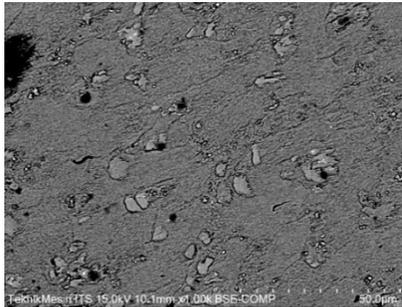


Gambar 4. 14 Hasil Titik 1 Pengujian SEM pada Daerah Kecacatan

Pada pengamatan SEM yang diamati pada titik 1 daerah yang mengalami kegagalan didapatkan lebih banyak bentuk void yang terjadi dibandingkan dengan void yang terbentuk pada titik 2. Pengamatan yang dilakukan pun memperlihatkan bahwa terjadi pembentukan lapisan oksida yaitu 750-768 mikron dengan rata-rata sebesar 758 mikron atau sama dengan 0,758 milimeter

Pengamatan *Scanning Electron Microscope* pada titik 1 pada daerah lokasi kegagalan adalah sebagai berikut:



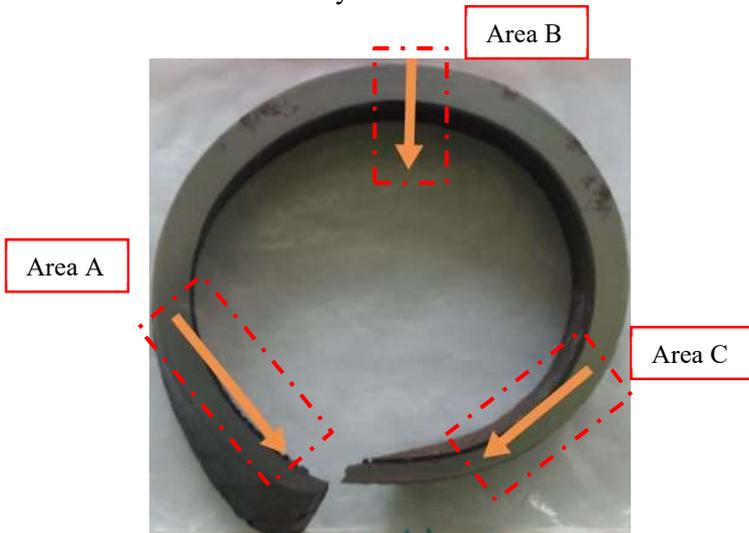


Gambar 4. 15 Hasil Titik 2 Pengujian SEM pada Daerah Kecacatan

Pada pengujian SEM titik 2 didapatkan bahwa void yang terbentuk lebih sedikit dibandingkan titik 1 daerah kecacatan. Pengamatan yang dilakukan pun memperlihatkan bahwa terjadi pembentukan lapisan oksida yaitu 744-752 mikron dengan rata-rata sebesar 747 mikron atau sama dengan 0,747 milimeter.

#### 4.7 Pengujian *Microhardness*

Salah satu pengujian *destructive test* ini bertujuan untuk mengamati nilai kekerasan dari suatu sample uji yang dimana hasil yang didapatkan akan dibandingkan dengan nilai kekerasan standarnya.

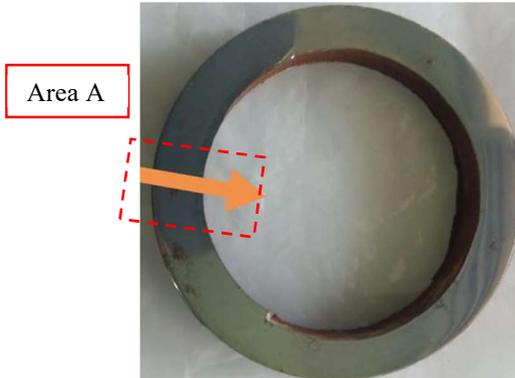


Tabel 4. 4 Hasil *Microhardness* pada Sample Tube Daerah  
Kecacatan  
Gambar 4. 16 Sample Tube *Microhardness* pada Daerah Kecacatan

Sample Tube (Daerah kecacatan)			
Titik Uji	Area A	Area B	Area C
Titik 1	231	146	300
Titik 2	225	141	314
Titik 3	227	143	323
Titik 4	229	151	295
Titik 5	230	145	325
Titik 6	223	147	326
Titik 7	204	152	323
Rata-rata	224	146	315

Pada pengujian *microhardness* sample tube pada daerah kecacatan dilakukan pada 3 area dimana dilakukan pengujian dari diameter luar tube ke bagian diameter dalam tube. Pada area A dan C (daerah kecacatan) didapatkan rata-rata

kekerasan yaitu 224 dan 315 sedangkan pada area A terdapat nilai kekerasan yang lebih kecil yaitu 146.



Gambar 4. 17 Sample Tube *Microhardness* pada Tube Baru

Pada pengujian *microhardness* dilakukan pengujian pula pada tube dengan spesifikasi yang sama dengan sample tube yang mengalami kecacatan, tube tersebut juga memiliki spesifikasi material yaitu ASTM A213 grade T22, dimana dengan asumsi tube tersebut belum pernah terkena panas dan tekanan operasional. Pengujian *microhardness* yang dilakukan didapatkan data sebagai berikut:

Tabel 4. 5 Hasil *Microhardness* pada Sample Tube Baru

Sample Tube baru	
Titik Uji	Area A
Titik 1	147
Titik 2	139
Titik 3	144

Titik 4	137
Titik 5	138
Titik 6	149
Titik 7	136
Rata-rata	141

Pada pengujian sample tube baru didapatkan nilai rata-rata kekerasan mikro area A didapatkan nilai kekerasan yaitu 141. Nilai kekerasan ini memiliki nilai yang hampir sama dengan nilai kekerasan pada daerah kecacatan pada area B.

#### 4.8 Pembahasan

Pada pengujian komposisi kimia didapatkan beberapa spesifikasi unsur yang menunjukkan bahwa material yang mengalami kecacatan merupakan standar ASTM A213 grade T22, yang merupakan baja karbon rendah, dimana material ini sangat cocok digunakan pada *reheater tube* yang dimana memiliki keuletan yang tinggi, kekerasan yang rendah, *creep strength* yang baik dan ketahanan oksidasi yang baik pula. Pada komposisi kimia didapatkan bahwa terdapat pengurangan komposisi unsur karbon pada tube yang mengalami kegagalan dibandingkan dengan tube baru namun batas komposisi unsur karbon masih sesuai dengan standar ASTM A213 grade T22. Pada pengukuran ketebalan tube didapatkan bahwa terdapat penipisan dinding tube yang signifikan, penipisan terjadi akibat adanya degradasi suatu material akibat temperatur tinggi dalam waktu yang cukup lama. (Liu S, Wang, dan Liu C, 2017). Pada pengamatan visual didapatkan kegagalan dengan bentuk seperti ledakan terbuka lebar (fish mouth). Fish mouth menjadi salah satu ciri bahwa suatu material mengalami suatu mekanisme kegagalan yang diakibatkan oleh overheating. Kegagalan ini terjadi akibat adanya ledakan sesaat yang mengakibatkan material tidak mampu menahan deformasi plastis yang terjadi sehingga terbentuklah kecacatan seperti ledakan dengan bentuk seperti mulut ikan

Pengujian *metallography* yang dilakukan pada spesimen yang letaknya jauh dari kegagalan memperlihatkan bahwa spesimen tersebut adalah ferritic steels yang dimana terdiri matriks *ferrite*. *Ferrite* merupakan mikro struktur yang berwarna terang. Pada daerah yang letaknya jauh dari kecacatan tidak terlihat adanya void pada titik 1, titik 2, maupun pada titik 3 pada potongan tube yang letaknya jauh dari kegagalan. Pada daerah yang mengalami kegagalan didapatkan bahwa nilai kekerasan naik dari tube baru akibat terlihat pada pengujian *metallography* adanya karbida yang terdispersi pada daerah tersebut yang memungkinkan terjadinya nilai kekerasan.

Pengujian SEM yang dilakukan pada 2 titik daerah kegagalan menunjukkan bahwa banyak void yang terjadi terutama pada daerah titik 1 yang mengalami penipisan yang signifikan dan letaknya sangat dekat dengan daerah yang mengalami kegagalan. Pada pengujian SEM pun didapatkan pada kedua titik ketebalan oksida yang cukup tebal yaitu pada titik 1 dengan rata-rata 758 mikron dan pada titik 2 dengan rata-rata 747 mikron. Lapisan oksida terbentuk pada temperatur tinggi diakibatkan adanya adsorpsi oksigen yang kemudian membentuk oksida pada permukaan suatu material. Hilangnya ketebalan karena oksidasi yang meningkatkan tegangan pada dinding tube dan konduktivitas thermal yang lebih rendah dibandingkan skala oksida akan mengurangi energi perpindahan panas yang melintas dinding tube, kegagalan tersebut memungkinkan dimulai akibat adanya void yang dapat di indikasi sebagai creep yang menjadi crack initiation dari kegagalan tersebut. disertai dengan adanya pembentukan lapisan oksida pada bagian dalam yang berlebih dan terjadinya penipisan dinding tube dapat meningkatkan panas yang diterima oleh suatu material tertentu yang dimana mempercepat material tersebut dalam mengalami kegagalan. Semakin meningkatnya lapisan oksida yang terjadi maka akan meningkatkan temperatur pada tube yang dimana menyebabkan secondary creep menjadi

lebih cepat yang dimana akan masuk pada tertiary creep yang kemudian menyebabkan rupture/failure pada material. Pada pengujian di asumsikan bahwa material tidak mengalami void akibat defect manufacturing dengan asumsi bahwa material didesain sesuai dengan standar material tersebut yang dimana telah di fabrikasi dengan baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB V

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang didapatkan pada analisis kegagalan *reheater tube* pada *boiler subcritical 600 MW* yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut:

1. *Creep* menjadi faktor penyebab *reheater tube boiler sub critical 600-MW* mengalami kegagalan, terlihat adanya void yang terbentuk pada mikro struktur daerah kegagalan yang terjadi.
2. Tube mengalami kegagalan akibat tube terkena panas yang berlebih. Panas yang berlebih (*overheating*) pada tube akan meningkatkan kegagalan pada tube reheater akibat melewati panas operasionalnya dalam jangka waktu tertentu. Panas berlebih tersebut diakibatkan oleh adanya interaksi antara penipisan dinding tube dan terbentuknya lapisan oksida yang berlebih sekitar 0,75 mm dan void dapat mengindikasikan creep yang menjadi crack initiation kegagalan tersebut.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB VI

### SARAN

Beberapa saran yang dapat diberikan agar kegagalan tidak terjadi lagi di kemudian hari adalah sebagai berikut:

1. Pengoperasian boiler dilakukan sesuai prosedur agar tidak terjadinya kegagalan yang dapat dimulai dengan penipisan akibat terkena temperatur tinggi yang berlebih dalam jangka waktu yang lama, penipisan dapat juga terjadi akibat adanya korosi yang diakibatkan oleh abu dari flue gas atau sering disebut *fly-ash corrosion*. Faktor lainnya yang dapat menyebabkan penipisan adalah adanya erosi dari material tertentu yang mengakibatkan penipisan ketebalan pada suatu material.
2. Pada analisis kegagalan material dengan standar ASTM A 213 grade T22 dapat dilakukan pengujian komposisi kimia, pengamatan visual, pengukuran ketebalan oksida, pengujian *scanning electron microscope*, pengamatan *metallography*, dan pengujian *microhardness*

## DAFTAR PUSTAKA

1. 116379556-EPRI-Field-Guide-for-Boiler-Tube-Failures.pdf [Internet]. Scribd. Scribd;[cited2020Mar23].Available from: <https://www.scribd.com/document/338080649/116379556-EPRI-Field-Guide-for-Boiler-Tube-Failures-pdf>
2. Atlas of microstructures of industrial alloys. (1973). Metals Park - O: American Society for Metals.
3. Djukic M, Zeravcic VS, Bakic G, Sedmak A, Rajcic B. Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model. *Engineering Failure Analysis*. 2015; 58:485–98.
4. Gianfrancesco AD. The fossil fuel power plants technology. *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*. 2017;1–49
5. Gupta GK, Chattopadhyaya S. Critical Failure Analysis of Superheater Tubes of Coal-Based Boiler. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. 2017;63(5):287–99.
6. Haghghat-Shishavan B, Firouzi-Nerbin H, Nazarian-Samani M, Ashtari P, Nasirpouri F. Failure analysis of a superheater tube ruptured in a power plant boiler: Main causes and preventive strategies. *Engineering Failure Analysis*. 2019; 98:131–40.
7. Kurniawan T, Fauzi FAB, Asmara YP. High-temperature Oxidation of Fe-Cr Steels in Steam Condition – A Review. *Indonesian Journal of Science and Technology*. 2016Feb;1(1):107.
8. Liu S, Wang W, Liu C. Failure analysis of the boiler water-wall tube. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2017;9:35–9.

9. Metya AK, Munda P, Rajinikanth V, Roy RK. Failure Analysis of SA213-T22 Re-heater Rear Tube of Thermal Power Plant. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2015;69(2):665–8.
10. Moran MJ, Shapiro HN. Fundamentals of engineering thermodynamics. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.
11. Munda P, Husain MM, Rajinikanth V, Metya AK. Evolution of Microstructure During Short-term Overheating Failure of a Boiler Water Wall Tube Made of Carbon Steel. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2018;18(1):199–211.
12. Nitiswati S, Sudarno S, Santosa K, Rahman AN. STUDI KOMPARASI SIFAT CREEP TAHAP SEKUNDER PADA LOGAM INDUK DAN LOGAM LAS-LASAN SA516 Gr. 70. SIGMA EPSILON-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir. 2018 Jan 12;21(2).
13. Purbolaksono J, Tarlochan F, Rahman MM, Nordin NF, Ahmad B. Failure Investigation on Reheater Tube Due to Deposit and Wall Thinning. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2009;9(4):365–9
14. Psyllaki, P. P., Pantazopoulos, G. and Lefakis, H. 2009. Metallurgical evaluation of creep – failed superheater tubes. Engineering Failure Analysis.
15. Radiant Boilers - Babcock & Wilcox [Internet]. [cited 2020Mar25]. Available from: <https://www.babcock.com/-/media/documents/products/radiant-boiler/e101-3193-rb-boiler.ashx>
16. Ray A, Tiwari Y, Roy P, Chaudhuri S, Bose S, Ghosh R, et al. Creep rupture analysis and remaining life assessment of 2.25Cr–1Mo steel tubes from a thermal power plant. Materials Science and Engineering: A. 2007;454-455:679–84.

17. SA, ASME. "213/SA-213M." *Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat Exchanger Tubes. The American Society of Mechanical Engineers, New York* (2015): 314-326.
18. Sagaf M. Analisa faktor-faktor penyebab perubahan efisiensi boiler jenis pulverized coal fired forced circulation sub-critical pressure menggunakan metode tak langsung. *Teknoin*. 2018Jan;24(2):147–58.
19. Sudaryanto S, N Utari S. *Mengenal Sifat Material*. Darpublic, Kanayakan D-30, Bandung, 2012
20. Teir S. *Steam boiler technology*. Espoo: Helsinki University of Technology; 2003
21. Stultz SC, Litto JB. *Steam: its generation and use*. Ohio: Babcock & Wilcox; 1992.
22. Zhong J, Ke H, Wang X, Han J, Wang B, Yu C, et al. Failure Analysis on High Temperature Reheater Tube of T23 Steel in a 660MW Thermal Power Plant Boiler. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019 Sep; 563:032002.

## BIODATA



Samuel Edric merupakan nama penulis dari tugas akhir ini. Penulis lahir di Jakarta pada tanggal 11 Mei 1998 yang merupakan anak dari kedua pasangan Bapak Johannes Bangun dan Rina Novida Ginting. Penulis memulai pendidikan formal di TK Happy Holy Kids, kemudian melanjutkan ke SD Mahanaim Bekasi. Setelah lulus SD, pada tahun 2010 penulis melanjutkan SMP di SMP Kristen 5 Penabur

Jakarta dan melanjutkan jenjang SMA di SMA Kristen 7 Penabur Jakarta pada tahun 2013. Setelah menyelesaikan studi SMA, penulis menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur mandiri ITS pada tahun 2016 dengan NRP 0211164000208. Penulis mengambil bidang studi Metalurgi khususnya laboratorium Metalurgi. Selama perkuliahan, penulis juga aktif ikut serta dalam kegiatan dan organisasi sebagai staff Inventaris Mesin Music Club dan juga staff khusus inventaris pada tahun kedua menjabat. Penulis juga merupakan asisten dari laboratorium Metalurgi dalam 2 semester berturut-turut dimana didapatkan banyak pembelajaran terutama dalam time management. Penulis berhasil menyelesaikan perkuliahan selama 8 semester. Penulis memiliki hobi untuk membaca dan mencoba hal-hal baru seperti menempuh studi lanjut S2 di luar negeri pada kemudian hari