



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM184835**

## **ANALISIS KEGAGALAN WASTE HEAT BOILER TUBE**

**ABDUL JABBAR I'JAZURROHMAN**  
NRP 0211154000139

**Dosen Pembimbing:**  
Suwarno, ST., M.Sc., PhD.

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020





**TUGAS AKHIR – TM184835**

**ANALISIS KEGAGALAN WASTE HEAT BOILER TUBE**

ABDUL JABBAR I'JAZURROHMAN  
NRP 02111540000139

Dosen Pembimbing:  
Suwarno, ST.,MSc.,PhD.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020





**FINAL PROJECT – TM184835**

**FAILURE ANALYSIS OF WASTE HEAT BOILER TUBE**

ABDUL JABBAR I'JAZURROHMAN  
NRP 02111540000139

Advising Lecturer:  
Suwarno, ST.,MSc.,PhD.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020







# ANALISIS KEGAGALAN WASTE HEAT BOILER TUBE

## TUGAS AKHIR

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

Oleh :

**Abdul Jabbar I'jazurrohman**

NRP. 02111540000139

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Suwarno ST., MSc., Ph.D. ..... (Pembimbing)  
NIP. 198005202005011003
2. Dr. Eng. Sutikno. ST. MT ..... (Penguji I)  
NIP. 197407032000031001
3. Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA ..... (Penguji II)  
NIP. 196308151989032001
4. Prof. Dr. Ir. Wajan Bera'a, DEA ..... (Penguji III)  
NIP. 195012111983021001

SURABAYA  
AGUSTUS, 2020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **ANALISA KEGAGALAN WASTE HEAT BOILER TUBE**

**Nama Mahasiswa** : Abdul Jabbar P'jazurrohman  
**NRP** : 021 1 15 4000 0139  
**Departemen** : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Suwarno, ST.,MSc.,PhD

### **ABSTRAK**

*Waste Heat Boiler secara umum memiliki beberapa komponen utama, dimana setiap komponen memiliki fungsi masing masing. Komponen utama pada Waste Heat Boiler khususnya pada fire tube boiler, antara lain seperti Flue gas inlet-outlet, fire tube, rear reversing chamber, inspention doors, front reversing chamber, boiler body, smoke tubes, dan inspection holes. Dari beberapa bagian tersebut, bagian yang sering mengalami failure adalah bagian fire tube atau pipa api. Pipa yang digunakan pada WHB ini menggunakan material 13CrMo 4-5 yang merupakan baja karbon rendah. Pipa disebut mengalami kegagalan karena memiliki kondisi Tube Wall Loss >81%.*

*Analisis kegagalan dilakukan dengan beberapa langkah. Pertama yaitu melakukan sampling material dan pengumpulan data operasional boiler. Material yang sudah disampling selanjutnya di amati secara makroskopis untuk melihat tampilan visual dari tube. Selanjutnya material di potong dan dilakukan pengujian komposisi kimia untuk mengetahui komposisi kimia apa saja yang terdapat pada material. Lalu di lakukan pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro dari material. Pengujian SEM - EDS perlu dilakukan juga untuk melihat adanya lapisan oksida dan unsur yang terkandung di permukaan luar dan dalam dari pipa. Yang terakhir yaitu analisa XRD untuk melihat senyawa yang terdapat pada kerak di permukaan tube.*

*Pengamatan makroskopis dari WHB tube menunjukkan adanya penipisan pada permukaan luar akibat terkikis aliran*

*steam. Hasil analisis komposisi kimia dan metalografi tidak menunjukkan adanya perbedaan dari standar. Namun, pengamatan SEM-EDS memperlihatkan adanya lapisan oksida di permukaan luar yang sangat tebal. Lapisan oksida ditemukan pada daerah yang tidak mengalami erosi parah. Hal ini dikarenakan pada bagian inlet WHB memiliki nilai heat flux yang sangat tinggi akibat terbentuknya aliran turbulenta. Aliran turbulenta terjadi karena adanya sudden enlargement oleh ujung ferrule ke pipa. Selain itu, beberapa unsur kimia juga terkandung di dalamnya dan dapat mempercepat terjadinya korosi (oksidasi). Dari hasil analisis XRD, ditemukan senyawa-senyawa hasil pembakaran batubara pada deposit kerak bagian luar. Dari analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penipisan tube terjadi karena efek gabungan dari korosi (oksidasi) akibat heatflux bagian dalam pipa dan erosi yang disebabkan oleh kecepatan aliran steam pada sisi luar.*

***Kata Kunci: Waste Heat Boiler, Failure, Tube Wall Loss, Turbulent, Heat Flux, Korosi, Oksidasi, Erosi***

## ***FAILURE ANALYSIS WASTE HEAT BOILER TUBE***

**Student Name** : Abdul Jabbar I'jazurrohman  
**NRP** : 021 1 15 4000 0139  
**Department** : Mechanical Engineering  
**Advising Lecturer** : Suwarno, ST.,MSc.,PhD

### **ABSTRACT**

*Waste Heat Boilers in general have several main components, where each component has its own function. The main components of the Waste Heat Boiler, especially in fire tube boilers, include Flue gas inlet-outlets, fire tubes, rear reversing chambers, inspection doors, front reversing chambers, boiler bodies, smoke tubes, and inspection holes. Of these parts, the part that often experiences failure is the fire tube or fire tube. The pipes used in this WHB use 13CrMo 4-5 material which is low carbon steel. The pipe is said to have failed because it has a Tube Wall Loss condition of > 81%.*

*The failure analysis is carried out in several steps. The first is conducting material sampling and collecting boiler operational data. The material that has been sampled is then examined macroscopically to see the visual appearance of the tube. Furthermore, the material is cut and chemical composition testing is carried out to determine the chemical composition of the material. Then do a metallographic test to determine the microstructure of the material. SEM - EDS testing also needs to be done to see the presence of oxide layers and elements contained on the outer and inner surface of the pipe. The last one is XRD analysis to see the compounds contained in the crust on the surface of the tube.*

*Macroscopic observations of the WHB tube show the presence of thinning on the outer surface due to clouding of the steam flow. The results of the analysis of chemical composition and*

*metallography did not show any differences from the standard. However, SEM-EDS observations show a very thick oxide layer on the outer surface. The oxide layer is found in areas where there is no severe erosion. This is because the WHB inlet has a very high heat flux value due to the formation of turbulent flow. Turbulent flow occurs due to sudden enlargement by the end of the ferrule to the pipe. In addition, several chemical elements are also contained in it and can accelerate corrosion (oxidation). From the results of XRD analysis, it was found that coal combustion compounds were found in the outer crust deposits. From the analysis that has been carried out, it can be concluded that tube thinning occurs due to the combined effect of corrosion (oxidation) due to heatflux on the inside of the pipe and erosion caused by the velocity of steam flow on the outside.*

***Keywords: Waste Heat Boiler, Failure, Tube Wall Loss, Turbulent, Heat Flux, Corrosion, Oxidation, Erosion***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah atas berkat dan karunia-Nya tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam proses penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Suwarno, ST.,MSc.,PhD, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan ilmu, dukungan dan motivasi, serta membimbing penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini. Segala masukan dan bimbingan yang telah Bapak berikan selama ini sangatlah berharga bagi penulis.
2. Keluarga tercinta, Bapak saya Jamalullail, Ibu saya Ana Fikrotus Zakiyah, Saudara saya Jawwadurrohman, serta Saudari saya Silmy dan Safarina yang senantiasa memberi dukungan dan doa untuk penulis hingga akhirnya berhasil menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Eng. Sutikno, ST, MT., Ibu Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA, dan Bapak Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA., selaku dosen penguji tugas akhir penulis karena telah meluangkan waktu dan untuk saran-saran yang telah Bapak dan Ibu berikan demi kebaikan hasil tugas akhir penulis.
4. Sahabat sekaligus saudara penulis, Fauzi, Kautsar, Hafidz, dan Alwi yang selalu menemani, memberi dukungan dan doa untuk penulis selama ini. Tidak lupa untuk Dimitra dan Hilda yang membantu penulis untuk menyelesaikan akademik di awal dan diakhir perkuliahan
5. Angkatan M58 yang telah memberikan dukungan sekaligus menjadi keluarga penulis selama menempuh perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember mulai dari awal perkuliahan hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

6. Warga laboratorium Metalurgi yang selalu menemani, mendukung, dan memberikan hiburan untuk penulis.
7. Seluruh civitas akademika Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis satu per satu

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan masukan maupun saran dari semua pihak. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>BAB I</b> .....	1
<b>PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Perumusan Masalah</b> .....	4
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	5
<b>1.4 Batasan Masalah</b> .....	5
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	5
<b>BAB II</b> .....	7
<b>DASAR TEORI</b> .....	7
<b>2.1. Waste Heat Boiler (WHB)</b> .....	7
<b>2.2. Pipa Waste Heat Boiler</b> .....	9
<b>2.2.1. Sampling Pipa Waste Heat Boiler</b> .....	10
<b>2.3. Kegagalan pada pipa Waste Heat Boiler</b> .....	12
<b>2.3.1. Korosi</b> .....	12
<b>2.3.2 Erosi</b> .....	23
<b>BAB III</b> .....	25

<b>METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	25
<b>3.1. Diagram Alir Penelitian</b> .....	25
<b>3.2. Pipa Waste Heat Boiler</b> .....	26
<b>3.2.1. Material Pipa</b> .....	26
<b>3.2.2. Dimensi Pipa</b> .....	26
<b>3.2.3. Material Uji</b> .....	27
<b>3.3. Peralatan Penelitian</b> .....	28
<b>3.4 Langkah – Langkah Penelitian</b> .....	31
<b>3.4.1 Analisa Komposisi Kimia Bahan</b> .....	31
<b>3.4.2 Pengujian Metalografi</b> .....	31
<b>3.4.3. Pengujian Micro Vickers Hardness</b> .....	32
<b>3.4.4. Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)         dan <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> (EDX)</b> .....	33
<b>BAB IV</b> .....	35
<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	35
<b>4.1 Waste Heat Boiler Tube</b> .....	35
<b>4.2 Pengamatan Makro</b> .....	37
<b>4.3 Pengukuran Potongan Tube</b> .....	40
<b>4.4 Pengujian Struktur Mikro</b> .....	44
<b>4.4.1 Struktur Mikro Potongan 1</b> .....	45
<b>4.4.2 Struktur Mikro Potongan 4</b> .....	46
<b>4.5 Pengujian XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)</b> .....	48
<b>4.5.1 Pengujian XRD Permukaan Luar Pipa</b> .....	48

4.5.2	Pengujian XRD Permukaan Dalam Pipa .....	50
4.6	Pengujian Micro Vickers Hardness .....	51
4.6.1	<i>Micro Vickers Hardness</i> potongan 4 .....	52
4.6.2	<i>Micro Vickers Hardness</i> potongan 4 .....	53
4.6.3	Perbandingan <i>Micro Vickers Hardness</i> potongan 2 dan potongan 4 .....	55
4.7	Pengujian SEM-EDS .....	56
4.8	Simulasi Aliran Fluida .....	58
4.8.1	Aliran fluida dalam pipa .....	58
4.8.2	Aliran fluida luar pipa .....	61
4.9	Pembahasan .....	63
BAB V	.....	69
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	69
5.1	Kesimpulan .....	69
5.2	Saran .....	70
DAFTAR PUSTAKA	.....	71

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1. 1</b> Pabrik Produsen Pupuk Urea .....	2
<b>Gambar 1. 2</b> Waste Heat Boiler .....	2
<b>Gambar 1. 3</b> Bagian Waste Heat Boiler Tube yang mengalami failure .....	3
<b>Gambar 1. 4</b> Failure yang terjadi pada Waste Heat Boiler Tube .	4
<b>Gambar 2. 1</b> Waste Heat Boiler .....	8
<b>Gambar 2. 2</b> Waste Heat Boiler Pabrik Produsen Pupuk Urea ....	9
<b>Gambar 2. 3</b> Mapping pipa di Waste Heat Boiler.....	10
<b>Gambar 3. 1</b> Diagram Alir Penelitian.....	25
<b>Gambar 3. 2</b> Pipa Waste Heat Boiler.....	26
<b>Gambar 3. 3</b> lokasi pemotongan sampel untuk pengujian .....	27
<b>Gambar 3. 4</b> Hasil potongan sampel pipa, (a) potongan 1, (b) potongan 2, (c) potongan 4, (d) potongan 3 bagian dalam, (e) potongan 3 bagian luar. ....	28
<b>Gambar 3. 5</b> Mikroskop Optik “Olympus BX -6M“ .....	29
<b>Gambar 3. 6</b> Mesin Grinder dan Polisher “ Metcon “ .....	29
<b>Gambar 3. 7</b> Mesin Micro Vickers Hardness.....	30
<b>Gambar 3. 8</b> Mesin HITACHI FLEXSEM 100 untuk pengujian SEM.....	30
<b>Gambar 3. 9</b> Hasil Indentasi pengujian Micro Vickers Hardness .....	33
<b>Gambar 4. 1</b> Beberapa pipa WHB yang mengalami failure .....	36
<b>Gambar 4. 2</b> Potongan pada pipa WHB.....	41
<b>Gambar 4. 3</b> (a) Potongan 1, (b) Potongan 2, (c) Potongan 3, (d) Potongan 4.....	42
<b>Gambar 4. 4</b> Hasil pengujian XRD pada bagian luar pipa.....	48
<b>Gambar 4. 5</b> Persentase senyawa yang terbentuk pada bagian luar pipa.....	49

<b>Gambar 4. 6</b> Hasil pengujian XRD pada bagian dalam pipa .....	50
<b>Gambar 4. 7</b> Persentase senyawa yang terbentuk pada bagian dalam pipa .....	51
<b>Gambar 4. 8</b> Grafik Hasil pengujian kekerasan pada Potongan 4 .....	52
<b>Gambar 4. 9</b> Grafik Hasil pengujian kekerasan pada Potongan 4 .....	54
<b>Gambar 4. 10</b> Grafik perbandingan hasil rata-rata pengujian <i>Micro Vickers Hardness</i> .....	55
<b>Gambar 4. 11</b> Pengamatan Lapisan Oksida pada Potongan 1 ....	56
<b>Gambar 4. 12</b> Analisa SEM-EDS pada potongan 1 .....	57
<b>Gambar 4. 13</b> Hasil simulasi kondisi fluida (flue gas) didalam pipa WHB (flue gas); (a) profil kecepatan, (b) profile temperatur, dan (c) profil wall shear stress .....	59
<b>Gambar 4. 14</b> Hasil simulasi kondisi fluida ( <i>steam</i> ) diluar pipa WHB ( <i>flue gas</i> ); (a) profil kecepatan, (b) profile temperatur, dan (c) profil <i>wall shear stress</i> .....	62
<b>Gambar 4. 15</b> (a) Profil kecepatan <i>steam</i> ; (b) profil <i>wall shear stress steam</i> ; (c) beda ketebalan .....	66

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Spesifikasi Waste Heat Boiler .....	9
<b>Tabel 3. 1</b> Komposisi kimia pipa WHB berdasarkan hasil spectrometer .....	26
<b>Tabel 4. 1</b> Parameter Operasi Waste Heat Boiler 101-C .....	35
<b>Tabel 4. 2</b> Properties Material .....	37
<b>Tabel 4. 3</b> Pengamatan Makro Permukaan dalam Pipa inlet WHB .....	38
<b>Tabel 4. 4</b> Pengamatan Makro permukaan luar Pipa inlet WHB	39
<b>Tabel 4. 5</b> Gambar Potongan Sampel .....	42
<b>Tabel 4. 6</b> Hasil Pengukuran Outside Diameter (mm).....	43
<b>Tabel 4.7</b> Perbandingan Komposisi Kimia Spesimen dengan Standar 13CrMo 4-5 .....	44
<b>Tabel 4. 8</b> Hasil pengamatan struktur mikro potongan 1 .....	45
<b>Tabel 4. 9</b> Hasil pengamatan struktur mikro potongan 4.....	47
<b>Tabel 4. 10</b> Hasil Pengujian Micro Vickers Hardness pada Potongan 4.....	52
<b>Tabel 4. 11</b> Hasil Pengujian Micro Vickers Hardness pada Potongan 1 .....	53
<b>Tabel 4. 12</b> Rata-rata nilai kekerasan Potongan 4 dan potongan 1 .....	55

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

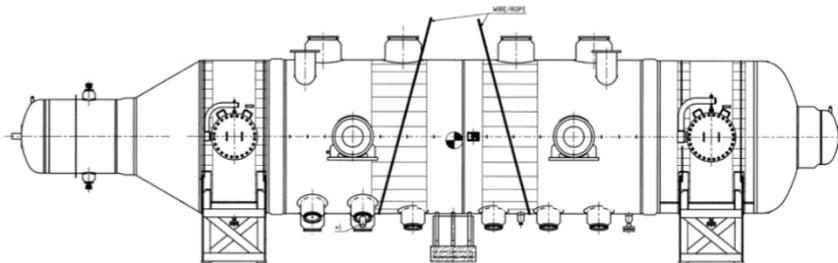
### **1.1 Latar Belakang**

Sebagai negara agraris yang dimana mata pencaharian utama mayoritas masyarakat Indonesia adalah petani, pertanian merupakan salah satu sektor yang menjadi perhatian besar. Pemerintah bertanggung jawab dalam menyediakan sarana prasarana pertanian, termasuk dalam memenuhi kebutuhan pupuk untuk meningkatkan produksi hasil pertanian. Salah satu pupuk yang umum digunakan adalah pupuk urea. Pupuk urea merupakan sumber unsur nitrogen bagi tanaman yang sangat bermanfaat untuk memaksimalkan hasil kualitas pertanian. Selain untuk tanaman, urea juga dapat digunakan sebagai tambahan makanan protein hewan pemamah biak untuk meningkatkan produksi daging dan susu. Pada bidang industri, urea digunakan sebagai bahan pelapis, adhesif, bahan pembuat resin, pembuat ragi, dan pembantu pada pencelupan di pabrik tekstil. Kegunaan urea yang beraneka ragam semakin meningkatkan kebutuhan urea dari waktu ke waktu. Oleh karena itu diperlukan perusahaan yang menjadi pemasok urea di Indonesia dan Kapasitas total mencapai 3,43 juta ton urea per tahun. Pabrik ini mulai dibangun pada 14 September 2011. Pabrik ini diresmikan pada tanggal 19 November 2015 oleh Presiden RI Joko Widodo dan mulai berproduksi sejak akhir tahun 2015. Pabrik ini dengan dengan konsumsi energi terbesar sehingga operasinya dinilai kurang efisien. Pabrik lain didesain lebih hemat energi dengan menggunakan teknologi yang sudah modern dan dapat menghasilkan hingga 1,15 juta ton urea dalam satu tahunnya.



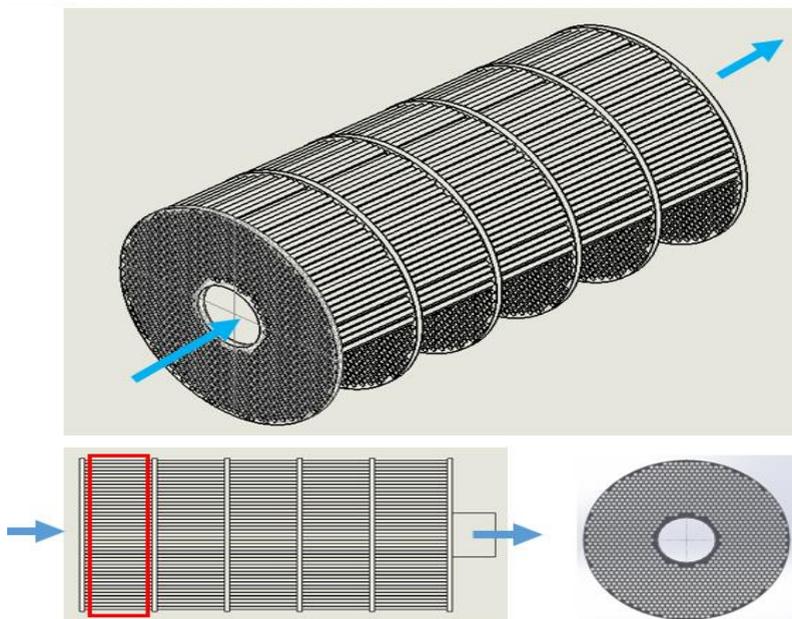
**Gambar 1. 1** Pabrik Produsen Pupuk Urea

Pembangunan pabrik 5 ini juga ditujukan untuk menggantikan produksi amonia dan urea dari pabrik 1 yang sudah tidak efisien lagi. WHB berperan penting sebagai penghasil uap, WHB memanfaatkan panas dari reaksi eksoterm yang menghasilkan karbamat. Uap kering hasil dari WHB sebagian digunakan untuk menguraikan karbamat menjadi urea. Pipa WHB merupakan pipa yang digunakan sebagai saluran pembuangan sisa uap basah yang berada dalam WHB kemudian keluar melalui riser berupa uap panas lanjut ( superheated steam ).



**Gambar 1. 2** Waste Heat Boiler

*Waste Heat Boiler* secara umum memiliki beberapa komponen utama, dimana setiap komponen memiliki fungsi masing masing. Komponen utama pada *Waste Heat Boiler* khususnya pada *fire tube boiler*, antara lain seperti *Flue gas inlet-outlet*, *fire tube*, *rear reversing chamber*, *inspenction doors*, *front reversing chamber*, *boiler body*, *smoke tubes*, dan *inspection holes*. Dari beberapa bagian tersebut, bagian yang sering mengalami *failure* adalah bagian *fire tube* atau pipa api. Hal ini disebabkan karena bagian ini merupakan bagian yang terkena langsung oleh panas dari *flue gas* dan secara bersamaan bagian luar mengalami kontak langsung dengan *cooling water*. Selain itu kondisi seperti ini dialami oleh pipa secara terus menerus sehingga dapat mempengaruhi kondisi dari pipa, terutama ketahanan materialnya.



**Gambar 1. 3** *Bagian Waste Heat Boiler Tube yang mengalami failure*

Salah satu komponen WHB yang mengalami kegagalan terdapat pada bagian inlet WHB. Bagian inlet WHB dengan operasi kerja pada temperatur 894,5°C dari gas inlet mengalir gas panas melalui dalam pipa dan diluar pipa mengalir air sehingga air yang mula –mula pada temperatur ruang terjadi perubahan kenaikan temperatur secara mendadak menjadi 328,2°C. Dalam kasus ini, ditemukan kegagalan pada pipa bagian inlet WHB berupa penipisan atau pengurangan ketebalan pipa hingga melebihi batas toleransi sebesar 3,2 milimeter. Jika hal tersebut diabaikan, dapat menimbulkan masalah yang lebih besar berupa kebocoran pada pipa bagian inlet WHB yang dapat menyebabkan sistem WHB shutdown. Oleh karena itu perlu diadakan penelitian analisa kegagalan ( *failure analysis*) untuk menghindari kasus kegagalan yang sama.



**Gambar 1. 4** Failure yang terjadi pada Waste Heat Boiler Tube

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam tugas akhir ini :

1. Bagaimana mekanisme terjadinya kegagalan pipa *Waste Heat Boiler*?

2. Apakah yang menjadi penyebab kegagalan pada pipa *Waste Heat Boiler*?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian analisa kegagalan ini adalah :

1. Menganalisa mekanisme terjadinya kegagalan pipa *Waste Heat Boiler*
2. Menganalisa penyebab kegagalan yang terjadi pada pipa *Waste Heat Boiler*

### **1.4 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah dan asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Komponen pipa *Waste Heat Boiler* memiliki komposisi kimia yang homogen dan tidak memiliki cacat awal.
2. Desain awal pipa *Waste Heat Boiler* telah memenuhi standar spesifikasi
3. Sampling pipa *Waste Heat Boiler* yang diambil dianggap terkena perlakuan yang sama

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian analisa kegagalan ini adalah :

1. Bagi perusahaan, hasil dari penelitian analisa kegagalan dapat digunakan dalam memilih perawatan maupun *coolant* yang akan digunakan untuk menghindari kegagalan serupa.
2. Bagi penulis, dengan ada penelitian analisa kegagalan ini diharapkan dapat menjadi tambahan ilmu yang dapat diaplikasikan untuk menangani kasus kegagalan yang serupa.
3. Terjalin hubungan yang baik antara institusi pendidikan dengan institusi perusahaan terkait

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB II

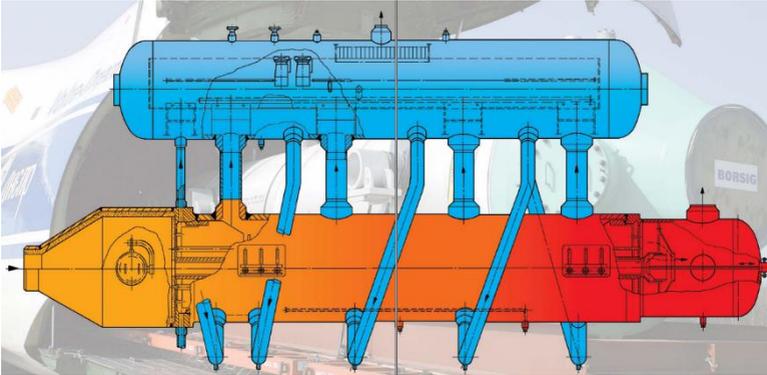
### DASAR TEORI

#### 2.1. Waste Heat Boiler (WHB)

WHB merupakan alat penukar panas yang berfungsi merubah air menjadi uap. WHB termasuk *heat exchanger* jenis *shell and tube* dan pipa yang menyusunnya mempunyai sirip ( *finned tube* ). WHB berperan penting dalam proses pembuatan pupuk urea sebagai alat penukar panas yang memanfaatkan sisa gas panas dari reaksi *eksoterm* pembentukan karbamat.

*Waste Heat Boiler* ( WHB ) atau *Heat Recovery Steam Generator* berperan penting pada industri kimia, kilang minyak, pembangkit listrik, dan sistem proses. WHB diklasifikasikan berdasarkan aplikasi, tipe boiler yang digunakan, gas sisa hasil pembakaran untuk memanfaatkan energi panas, kebersihan gas, dan konfigurasi boiler.

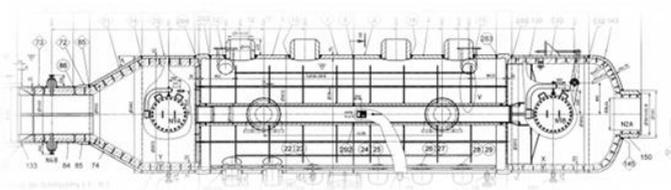
Proses pada WHB digunakan untuk mendinginkan aliran gas dari gas *inlet* pada temperatur tertentu untuk menghasilkan gas keluaran pada temperatur dibawah temperatur gas *inlet* sebagai tujuan pada proses selanjutnya. Pada fasa padat dan cair setelah mengalami proses pembakaran, gas hasil pembakaran umumnya kotor dan mengandung senyawa korosif, uap asam, dan partikulat. Fluida yang mengalir melalui gas *inlet* adalah *flue gas* ( gas sisa pembakaran ) kemudian keluar melalui gas *outlet*. Dari bawah WHB mengalir air masuk melewati *downcomer* dan masuk ke dalam WHB, air tersebut melewati di luar pipa – pipa yang di dalam pipa terdapat gas panas. Terjadi perpindahan panas antara gas panas di dalam pipa dan air di luar pipa. Menurut hukum kekekalan energi, energi panas akan berpindah dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Gas dengan temperatur tinggi melepas kalor dan air dengan temperatur rendah menyerap kalor sehingga temperatur air di luar pipa akan naik.

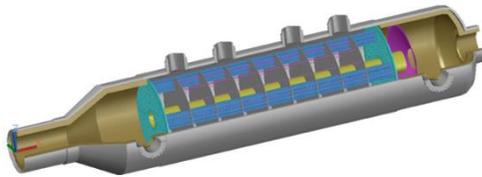


**Gambar 2. 1** *Waste Heat Boiler*

Sedangkan model waste heat boiler yang digunakan di pabrik ini seperti pada gambar berikut

### WHB-101C





**Gambar 2. 2** *Waste Heat Boiler* Pabrik Produsen Pupuk Urea

*Waste Heat Boiler* (WHB) yang digunakan adalah WHB produksi dari Toyo Engineering Corp, perusahaan Jepang dengan tahun pembuatan 2014.

**Tabel 2. 1** Spesifikasi *Waste Heat Boiler*

<b>Merk Pabrik</b>	<b>101 – C WASTE HEAT BOILER</b>
Temperatur gas <i>inlet</i>	894,5°C
Temperatur gas <i>outlet</i>	440,3°C
Temperatur kerja <i>SHELL SIDE</i>	360°C
Temperatur kerja <i>TUBE SIDE</i>	380°C
Tekanan kerja <i>SHELL SIDE</i>	139.7 kg/cm <sup>2</sup>
Tekanan kerja <i>TUBE SIDE</i>	44.7 kg / cm <sup>2</sup>
Jenis boiler	Boiler pipa api

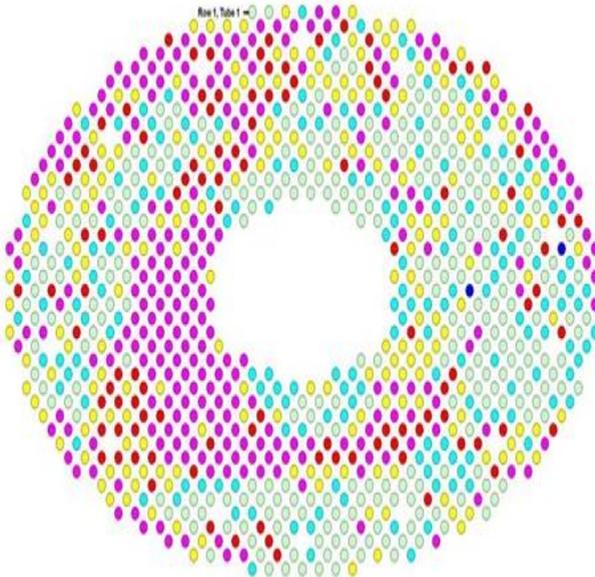
## 2.2. Pipa Waste Heat Boiler

Pipa *Waste Heat Boiler* merupakan salah satu jenis dari boiler pipa api. Boiler pipa api adalah boiler yang pipanya berisi api atau gas panas gas panas inidigunakan untuk memanaskan air sehingga menjadi uap. Boiler jenis pipa api adalah boiler sederhana yang hanya mampu memproduksi uap maksimum sebanyak 10 ton uap per jam pada tekanan maksimum 24kg/cm<sup>2</sup> atau 23,4 bar.

Boiler pipa api tergolong boiler untuk tekanan rendah. Boiler jenis ini merupakan awal dari pembuatan boiler-boiler selanjutnya, Boiler ini umumnya mempunyai isi air yang cukup besar sehingga disebut boiler tangki. Seperti yang sudah diketahui pada tabel spesifikasi pipa, suhu inlet dari pipa WHB adalah sebesar  $890,5^{\circ}$  dan temperatur gas outlet sebesar  $440,3^{\circ}\text{C}$ . Fungsi dari pipa ini adalah tempat menurunkan temperatur flue gas menjadi temperatur yang dapat dimanfaatkan untuk proses lebih lanjut.

### 2.2.1. *Sampling Pipa Waste Heat Boiler*

Berikut adalah gambar *mapping* untuk menentukan posisi pipa di WHB.



**Gambar 2.3** *Mapping pipa di Waste Heat Boiler*

Gambar 2.3 menjelaskan pemetaan / kode pipa – pipa yang ada di *Waste Heat Boiler*. Pada gambar terdapat berbagai macam warna yang menunjukkan pipa diterima (*accept*) atau ditolak (*reject*). Pipa *accept* artinya pipa yang bisa dioperasikan, pipa *reject* artinya pipa yang diambil dari *tube shell* kemudian akan diperbaiki. Terdapat posisi koordinat ( kode ) yang menunjukkan posisi pipa – pipa dengan melihat kolom *Tubes* dan baris *Rows* dan diberi angka untuk kode posisi pipa. Misalnya *Row 1 Tube 1* menunjukkan posisi pipa ada di baris 1 dan kolom 1, dan begitu seterusnya. Untuk sampel yang diambil memiliki kode 29-13 dimana memiliki arti posisi pipa berada pada baris ke 29 dan urutan tube ke 13.

Dari gambar tersebut dapat dibagi menjadi beberapa warna. Untuk warna pada *mapping* tersebut ada warna putih, biru, kuning, merah, dan ungu. Warna-warna yang telah disebutkan sesuai dengan kerusakan yang dialami oleh pipa. Untuk pipa warna putih mengalami *Tube Wall Loss* 0%-20% dan berjumlah 273 pipa (26,66%). Untuk pipa warna biru muda mengalami *Tube Wall Loss* 21%-40% dan berjumlah 174 pipa (16,69%). Untuk pipa warna kuning mengalami *Tube Wall Loss* 41%-60% dan berjumlah 210 pipa (20,51%). Untuk pipa warna merah mengalami *Tube Wall Loss* 61%-80% dan berjumlah 106 pipa (10,35%). Untuk pipa warna ungu mengalami *Tube Wall Loss* >81% dan berjumlah 259 pipa (25,29%).

Posisi pipa yang mengalami kerusakan berada di gas *inlet* dari total panjang pipa sebesar 7060 mm (ujung pipa gas *inlet* sampai ujung pipa gas *outlet*). Diambil beberapa dari pipa tersebut untuk dianalisa kegagalannya dari jumlah pipa keseluruhan sebanyak 1024 pipa. Pipa yang rusak dikeluarkan dan dipotong dengan cara mendorong pipa dari ujung pipa gas *inlet* sampai keluar melewati ujung pipa gas *outlet*. Kemudian kelebihan pipa yang ada di gas *outlet* dilas dengan pipa sepanjang 500 mm dan

didorong lagi ke arah gas *inlet* dan bisa dilakukan pemotongan pipa.

Posisi pipa yang rusak tersebar di bagian dekat lubang besar yang dominan terkena panas dari gas panas berupa *flue gas*. Diambil sampel pipa sebanyak 6 potong untuk dianalisa kegagalan yaitu pipa berwarna ungu ( *Tube Wall Loss* > 81%, 259 tubes, 25,29 %, *reject* ) pada *mapping* pipa di WHB. Pipa yang dipotong dekat dengan *tube sheet* dan terdapat *ferrule* sehingga kondisi pipanya baik, buruk, da baik dari pipa yang diambil. Pipa *ferrule* adalah sebuah pipa dengan mekanisme kerjanya sebagai penahan panas dari *reforming* gas yang bersuhu sekitar 960°C dengan tekanan 28,90 bar yang akan dialirkan masuk ke dalam *tube* WHB. *Ferrule* berada di bagian ujung *shell side water* yang berbatasan langsung dengan *fire break* / batu tahan api. Penahanan panas *reforming gas* berfungsi untuk mencegah *boiling* pada sisi dinding WHB.

### **2.3. Kegagalan pada pipa Waste Heat Boiler**

Setiap material yang mengalami kegagalan pasti memiliki penyebab, bai penyebab utama maupun penyebab pendukung. Penyebab sebuah kegagalan dapat disebabkan dari faktor internal maupun faktor eksternal. Untuk kegagalan faktor eksternal pun bermacam-macam diantaranya korosi, karburasi, dan dekarburasi. Oleh sebab itu untuk penyebab dari kegagalan pipa WHB ini bisa ditinjau dari beberapa penyebab.

#### **2.3.1. Korosi**

##### **2.3.1.1. Pengertian Korosi**

Korosi atau pengkaratan merupakan suatu peristiwa kerusakan atau penurunan kualitas suatu bahan logam yang disebabkan oleh terjadinya reaksi terhadap lingkungan. Beberapa pakar berpendapat definisi hanya berlaku pada logam saja, tetapi para insinyur korosi juga ada yang mendefinisikan istilah korosi berlaku juga untuk material non logam, seperti keramik, plastik, karet. Sebagai contoh rusaknya cat karet karena sinar matahari atau

terkena bahan kimia, mencairnya lapisan tungku pembuatan baja, serangan logam yang solid oleh logam yang cair (liquid metal corrosion). (AR Hakim, 2012).

Terkorosinya suatu logam dalam lingkungan elektrolit (air) adalah proses elektrokimia. Proses ini terjadi bila ada reaksi setengah sel yang melepaskan elektron dan reaksi setengah yang menerima elektron tersebut. Kedua reaksi ini akan terus berlangsung sampai terjadi kesetimbangan dinamis dimana jumlah elektron yang dilepas sama dengan jumlah elektron yang diterima.

Korosi dapat terjadi di dalam medium kering dan juga medium basah. Sebagai contoh korosi yang berlangsung didalam medium kering adalah penyerangan logam besi oleh gas oksigen ( $O_2$ ) atau oleh gas belerang dioksida ( $SO_2$ ). Di dalam medium basah, korosi dapat terjadi secara seragam maupun secara terlokalisasi. Contoh korosi seragam di dalam medium basah adalah apabila besi terendam di dalam larutan asam klorida ( $HCl$ ). Korosi di dalam medium basah yang terjadi secara terlokalisasi ada yang memberikan rupa makroskopis, misalnya peristiwa korosi galvanik sistem besi - seng, korosi erosi, korosi retakan, korosi lubang, korosi pengelupasan, serta korosi pelumeran, sedangkan rupa mikroskopis dihasilkan misalnya oleh korosi tegangan, korosi patahan, dan korosi antar butir.

### **2.3.1.2. Jenis-jenis Korosi**

Berdasarkan bentuk kerusakan yang dihasilkan, penyebab korosi, lingkungan tempat terjadinya korosi, maupun jenis material yang diserang, korosi terbagi menjadi beberapa jenis, diantaranya adalah :

#### **1. Korosi Merata**

Korosi merata adalah bentuk korosi yang pada umumnya sering terjadi. Hal ini biasanya ditandai dengan adanya reaksi kimia atau elektrokimia yang terjadi pada permukaan yang bereaksi. Logam menjadi tipis dan akhirnya terjadi kegagalan pada logam

tersebut. Sebagai contoh, potongan baja atau seng dicelupkan pada asam sulfat encer, biasanya akan terlarut secara seragam pada seluruh permukaannya. Contoh lain dari korosi merata adalah pada pelat baja atau profil, permukaannya bersih dan logamnya homogen, bila dibiarkan di udara biasa beberapa bulan maka akan terbentuk korosi merata pada seluruh permukaannya. Korosi merata merupakan keadaan kerusakan yang sangat besar terhadap material, namun demikian korosi ini kurang diperhatikan karena umur dari peralatan dapat diperkirakan secara akurat dengan pengujian lain yang lebih sederhana. Korosi merata dapat dilakukan pencegahan dengan cara pelapisan, inhibitor dan proteksi katodik.

## 2. Korosi Atmosfer

Korosi ini terjadi akibat proses elektrokimia antara dua bagian benda padat khususnya metal besi yang berbeda potensial dan langsung berhubungan dengan udara terbuka.

## 3. Korosi Galvanis

Korosi galvanis adalah jenis korosi yang terjadi ketika dua macam logam yang berbeda berkontak secara langsung dalam media korosif. Logam yang memiliki potensial korosi lebih tinggi akan terkorosi lebih hebat dari pada kalau ia sendirian dan tidak dihubungkan langsung dengan logam yang memiliki potensial korosi yang lebih rendah. Logam yang memiliki potensial korosi yang lebih rendah akan kurang terkorosi dari pada kalau ia sendirian dan tidak dihubungkan langsung dengan logam yang memiliki potensial korosi yang lebih tinggi. Pada kasus ini terbentuk sebuah sel galvanik, dengan logam yang berpotensi korosi lebih tinggi sebagai anoda dan logam yang berpotensi korosi lebih rendah sebagai katoda.

## 4. Korosi Regangan

Korosi ini terjadi karena pemberian tarikan atau kompresi yang melebihi batas ketentuannya. Kegagalan ini sering disebut

retak karat regangan (RKR). Sifat retak jenis ini sangat spontan (tiba-tiba terjadinya), regangan biasanya bersifat internal atau merupakan sisa hasil pengerjan (residual) seperti pengeringan, pengepresan dan lain-lain.

#### 5. Korosi Celah

Korosi celah ialah sel korosi yang diakibatkan oleh perbedaan konsentrasi zat asam. Karat ini terjadi, karena celah sempit terisi dengan elektrolit (air yang pHnya rendah) maka terjadilah suatu sel korosi dengan katodanya permukaan sebelah luar celah yang basa dengan air yang lebih banyak mengandung zat asam dari pada bagian sebelah dalam celah yang sedikit mengandung zat asam sehingga bersifat anodic. Korosi celah termasuk jenis korosi lokal. Jenis korosi ini terjadi pada celah-celah konstruksi, seperti kaki-kaki konstruksi, drum maupun tabung gas. Korosi jenis ini juga dapat dilihat pada celah antara tube dari Heat Exchanger dengan tubesheet-nya. Adanya korosi bisa ditandai dengan warna coklat di sekitar celah. Tipe korosi ini terjadi akibat terjebaknya elektrolit sebagai lingkungan korosif di celah-celah yang terbentuk diantara peralatan konstruksi.

#### 6. Korosi Sumuran

Korosi sumuran juga termasuk korosi lokal. Jenis korosi ini mempunyai bentuk khas yaitu seperti sumur, sehingga disebut korosi sumuran. Arah perkembangan korosi tidak menyebar ke seluruh permukaan logam melainkan menusuk ke arah ketebalan logam dan mengakibatkan konstruksi mengalami kebocoran. Walaupun tidak sampai habis terkorosi, konstruksi tidak dapat beroperasi optimal, bahkan mungkin tidak dapat dipergunakan lagi karena kebocoran yang timbul. Korosi sumuran sering terjadi pada stainless-steel, terutama pada lingkungan yang tidak bergerak (stasioner) dan non-oksidator (tidak mengandung oksigen).

#### 7. Korosi Erosi

Korosi erosi adalah proses korosi yang bersamaan dengan erosi/abrasi. Korosi jenis ini biasanya menyerang peralatan yang lingkungannya adalah fluida yang bergerak, seperti aliran dalam pipa ataupun hantaman dan gerusan ombak ke kaki-kaki jetty. Keganasan fluida korosif yang bergerak diperhebat oleh adanya dua fase atau lebih dalam fluida tersebut, misalnya adanya fase liquid dan gas secara bersamaan, adanya fase liquid dan solid secara bersamaan ataupun adanya fase liquid, gas dan solid secara bersamaan. Kavitasi adalah contoh erosi corrosion pada peralatan yang berputar di lingkungan fluida yang bergerak, seperti impeller pompa dan sudu-sudu turbin. Erosion / abrasion corrosion juga terjadi di saluran gas-gas hasil pembakaran.

#### 8. Korosi Arus Liar

Prinsip serangan karat arus liar ini adalah merasuknya arus searah secara liar tidak sengaja pada suatu konstruksi baja, kemudian meninggalkannya kembali menuju sumber arus.

#### 9. Korosi Pelarutan Selektif

Korosi pelarutan selektif ini meyangkut larutnya suatu komponen dari zat paduan yang biasa disebut pelarutan selektif. Zat komponen yang larut selalu bersifat anodic terhadap komponen yang lain. Walaupun secara visual tampak perubahan warna pada permukaan paduan namun tidak tampak adanya kehilangan materi berupa takik, Perubahan dimensi, retak atau alur

#### 10. *Hydrogen Attack*

Hydrogen attack mengakibatkan logam menjadi rapuh akibat penetrasi hidrogen ke kedalaman logam. Peristiwa perapuhan ini biasa disebut dengan “Hydrogen Embrittlement”. Logam juga bisa retak oleh invasi hidrogen. Belum diketahui bagaimana hidrogen bisa merusak logam secara kimiawi ataupun secara elektrokimia.

#### 11. Korosi Mikrobiologis

Korosi ini disebabkan oleh mikroorganisme yang melakukan metabolisme secara langsung dengan logam sehingga hasil akhir akan menimbulkan korosi, atau dapat pula hasil reaksinya membuat lingkungan yang korosif. Contohnya mikroba sulfat anaerobic atau *Desulfofibrion desulfuricans*.

## 12. Korosi Titik Embun

Karat titik embun ini disebabkan oleh faktor kelembaban yang menyebabkan titik embun atau kondensasi, tanpa adanya unsur kelembaban relatif, segala macam kontaminan (zat pencemar) tidak akan atau sedikit sekali menyebabkan karat. Titik embun ini sangat korosif sekali terutama di daerah dekat pantai dimana banyak partikel air asin yang berhembus dan mengenai permukaan metal atau di daerah kawasan industri yang kaya akan pencemaran udara.

## 13. Korosi Antar Batas Butir

Di daerah batas butir memiliki sifat yang lebih reaktif. Banyak-sedikitnya batas butir akan sangat mempengaruhi kegunaan logam tersebut. Jika semakin sedikit batas butir pada suatu material maka akan menurunkan kekuatan material tersebut. Jika logam terkena karat, maka di daerah batas butir akan terkena serangan terlebih dahulu dibandingkan daerah yang jauh dari batas butir. Serangan yang terjadi pada daerah batas butir dan daerah yang berdekatan dengan batas butir hal ini biasa disebut intergranular corrosion. Intergranular corrosion dapat terjadi karena adanya kotoran pada batas butir, penambahan pada salah satu unsur paduan, atau penurunan salah satu unsur di daerah batas butir. Sebagai contoh paduan besi dan aluminium, dimana kelarutan besi lambat maka akan terjadi serangan pada batas butir. Beberapa kegagalan pada 18-8 baja karbon telah terjadi karena intergranular corrosion. Ini terjadi dalam lingkungan dimana paduan harus memiliki ketahanan korosi yang sangat baik.

Ketika baja dipanaskan pada suhu kira-kira antara 9500 F sampai 14500 F, baja tersebut akan peka atau rentan terhadap intergranular corrosion. Sebagai contoh untuk menghindari terjadinya intergranular corrosion, maka prosedur kepekaan di panaskan pada suhu 12000 F selama satu jam. Kebanyakan teori tentang terjadinya intergranular corrosion didasarkan pada kehilangan atau penipisan kromium di daerah batas butir. Penambahan kromium pada baja akan meningkatkan ketahanan korosi diberbagai kondisi lingkungan. Umumnya penambahan tersebut berkisar 10% kromium untuk pembuatan baja karbon tahan karat. Jika kromium secara efektif diturunkan ketahanan terhadap korosi akan berkurang.

Berdasarkan lingkungannya, korosi dapat dibedakan menjadi dua kategori yaitu sebagai berikut :

1. Korosi Lingkungan Gas (*Dry Corrosion*)
2. Korosi Lingkungan Cairan (*Wet Corrosion*)

Korosi lingkungan gas dapat terjadi pada lingkungan atmosfer maupun lingkungan gas yang lain. Korosi lingkungan cairan dapat terjadi pada lingkungan air maupun cairan yang lain. Korosi dapat dibedakan berdasarkan suhu korosif yang melingkungi konstruksi logam. Berdasarkan suhu korosif ini, korosi dibedakan menjadi dua kategori, yaitu :

1. Korosi Suhu Tinggi (*High Temperature Corrosion*)
2. Korosi Biasa/ Suhu Kamar (*Normal Temperature Corrosion*)

High Temperature Corrosion terjadi pada burner, boiler, reformer, reaktor, dsb. Korosi jenis ini banyak terjadi dalam suasana lingkungan gas.

### **2.3.1.3. Faktor-faktor Laju Korosi**

Beberapa faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi proses korosi

antara lain, yaitu :

#### **1. Suhu**

Suhu merupakan faktor penting dalam proses terjadinya korosi, di mana kenaikan suhu akan menyebabkan bertambahnya kecepatan reaksi korosi. Hal ini terjadi karena makin tinggi suhu maka energi kinetik dari partikel-partikel yang bereaksi akan meningkat sehingga melampaui besarnya harga energi aktivasi dan akibatnya laju kecepatan reaksi (korosi) juga akan makin cepat, begitu juga sebaliknya. (Fogler, 1992).

#### **2. Kecepatan Alir Fluida atau Kecepatan Pengadukan**

Laju korosi cenderung bertambah jika laju atau kecepatan aliran fluida bertambah besar. Hal ini karena kontak antara zat pereaksi dan logam akan semakin besar sehingga ion-ion logam akan makin banyak yang lepas sehingga logam akan mengalami kerapuhan (korosi). (Kirk Othmer, 1965).

#### **3. Konsentrasi Bahan Korosif**

Hal ini berhubungan dengan pH atau keasaman dan kebasaan suatu larutan. Larutan yang bersifat asam sangat korosif terhadap logam dimana logam yang berada didalam media larutan asam akan lebih cepat terkorosi karena merupakan reaksi anoda. Sedangkan larutan yang bersifat basa dapat menyebabkan korosi pada reaksi katodanya karena reaksi katoda selalu serentak dengan reaksi anoda (Djaprie, 1995).

#### **4. Oksigen**

Adanya oksigen yang terdapat di dalam udara dapat bersentuhan dengan permukaan logam yang lembab. Sehingga

kemungkinan menjadi korosi lebih besar. Di dalam air (lingkungan terbuka), adanya oksigen menyebabkan korosi (Djaprie, 1995).

## 5. Waktu Kontak

Dalam proses terjadinya korosi, laju reaksi sangat berkaitan erat dengan waktu. Pada dasarnya semakin lama waktu logam berinteraksi dengan lingkungan korosif maka semakin tinggi tingkat korosifitasnya. Aksi inhibitor diharapkan dapat membuat ketahanan logam terhadap korosi lebih besar. Dengan adanya penambahan inhibitor kedalam larutan, maka akan menyebabkan laju reaksi menjadi lebih rendah, sehingga waktu kerja inhibitor untuk melindungi logam menjadi lebih lama. Kemampuan inhibitor untuk melindungi logam dari korosi akan hilang atau habis pada waktu tertentu, hal itu dikarenakan semakin lama waktunya maka inhibitor akan semakin habis terserang oleh larutan. (Uhlig; 1958).

### 2.3.1.4. Mekanisme Terbentuknya Korosi Temperature Tinggi

Korosi temperature tinggi didefinisikan sebagai proses degradasi atau penurunan mutu material, termasuk degradasi sifat-sifat mekanisnya yang disebabkan oleh adanya pengaruh atmosfer pada tempertur tinggi. Tempertur tinggi memiliki pengertian bahwa air dalam fasa gas, atmosfer tidak mengadung air. Temperatur dimana terjadi difusi atom yang memberikan pengaruh yang besar dan temperaturnya diestimasi dengan  $0,5 T_m$  ( $T_m$ = temperature melting, Kelvin). Temperature terjadinya oksidasi besi/baja dengan cepat, yaitu di atas 570 celcius.

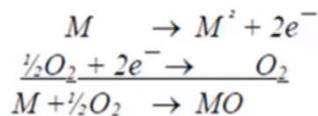
Temperature tinggi memberikan pengaruh ganda terhadap degradasi logam yang ditimbulkannya. Pertama, kenaikan temperature akan mempengaruhi aspek termodinamika dan kinetika reaksi, artinya degradasi akan semakin cepat pada temperature yang lebih tinggi. Yang kedua, kenaikan temperature akan mempengaruhi dan merubah struktur dan perilaku logam. Jika struktur berubah, maka secara umum kekuatan dan perilaku logam

juga berubah. Jadi selain terjadi degradasi yang berupa kerusakan fisik pada permukaan atau kerusakan eksternal, juga terjadi degradasi, penurunan sifat mekanik, logam menjadi rapuh.

Pada temperature tinggi, atmosfer bersifat oksidatif, atmosfer yang berpotensi untuk mengoksidasi logam. Atmosfer ini merupakan lingkungan penyebab utama terjadinya korosi pada temperature tinggi. Korosi pada temperature tinggi mencakup reaksi langsung antara logam dengan gas. Untuk lingkungan tertentu kerusakan dapat terjadi akibat reaksi dengan lelehan garam, atau fused salt yang terbentuk pada temperature tinggi, korosi ini biasa disebut hot corrosion, atau korosi panas.

Telah diketahui bahwa korosi sebagai penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya, tetapi lingkungan yang dimaksudkan hampir selalu mengandung air. Korosi pada permukaan logam ternyata masih dapat terjadi meskipun elektrolit cair tidak ada; karena itu tidak mengherankan bila proses tersebut sering disebut korosi kering. Namun demikian, definisi tentang korosi yang telah digunakan selama ini tidak berubah.

Proses oksidasi yang terjadi pada korosi temperature tinggi sebagai berikut :



Korosi temperatur tinggi dapat diklasifikasikan berdasarkan degradasi yang dialami oleh material logam, antara lain

1. Oksidasi
2. Korosi oleh lelehan endapan garam, hot corrosion
3. Sulfidasi

4. Karburisasi dan Metal Dusting
5. Nitridasi
6. Korosi oleh Halogen
7. Korosi oleh Lelehan Logam

### **2.3.1.5. Dampak Korosi**

Korosi merupakan proses atau reaksi elektrokimia yang bersifat alamiah dan berlangsung spontan, oleh karena itu korosi tidak dapat dicegah atau dihentikan sama sekali. Korosi hanya bisa dikendalikan atau diperlambat lajunya sehingga memperlambat proses kerusakannya. Banyak sekali dampak yang diakibatkan oleh korosi ini, berikut beberapa dampak negatif yang bisa ditimbulkan oleh proses korosi diantaranya adalah :

- a. Patahnya peralatan yang berputar karena korosi, yang merugikan dari segi materil dan mengancam keselamatan jiwa.
- b. Pecahnya peralatan bertekanan dan/atau bersuhu tinggi karena korosi, yang selain merusak alat juga membahayakan keselamatan
- c. Hancurnya peralatan karena lapuk oleh korosi sehingga tidak bisa dipakai lagi sebagai bahan konstruksi, dan harus diganti dengan yang baru.
- d. Hilangnya keindahan konstruksi karena produk korosi yang menempel padanya.
- e. Bocornya peralatan, seperti : tangki, pipa dan sebagainya, sehingga tidak bisa berfungsi optimal. Peralatan yang bocor/rusak juga mengakibatkan produk ataupun fluida kerja terkontaminasi oleh fluida atau bahan-bahan lain, maupun oleh senyawa-senyawa hasil korosi. Bocor/rusaknya peralatan juga merugikan dari segi produksi, akibat hilangnya produk berharga.

Kebocoran/kerusakan bisa mengakibatkan terhentinya operasi pabrik, bahkan membahayakan lingkungan akibat terlepasnya bahan berbahaya ke lingkungan.

### 2.3.2 Erosi

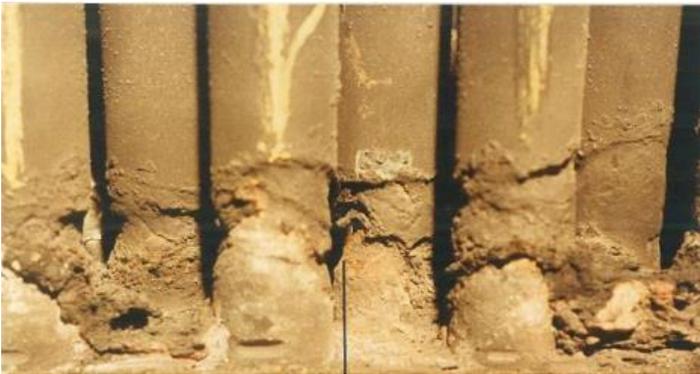
Erosi adalah hilangnya sejumlah bagian material akibat adanya partikel padat yang menimpanya. Erosi dapat dijumpai di beberapa komponen industry salah satunya adalah boiler. Kegagalan tube boiler akibat erosi mencapai sepertiga dari total kegagalan yang terjadi pada tube boiler. Studi tentang erosi menunjukkan bahwa tingkat pengurangan rata-rata ketebalan tube pada boiler berbahan bakar batubara berkisar antara  $2.0 \times 10^{-5} \mu\text{m/s}$  sampai  $15 \times 10^{-5} \mu\text{m/s}$ . Bahkan pada tingkat laju erosi tertinggi, tube boiler akan pecah setelah waktu operasi mencapai 16.000 jam. Namun erosi yang terjadi ini kebanyakan terjadi di sisi luar dari tube. Jarang ditemui penipisan akibat erosi pada sisi dalam dari tube. Beberapa jenis mekanisme erosi yang sering di temui di boiler adalah sebagai berikut:

#### a. *Fly Ash Erosion*

*Fly ash erosion* disebabkan oleh sejumlah partikel yang terperangkap di dalam *flue gas* dengan kecepatan tinggi dan menghantam permukaan logam. Faktor terpenting yang mempercepat erosi ini yaitu jumlah dan juga kecepatan partikel abrasif yang terdapat di *flue gas*. Hal ini dapat mempercepat penipisan *tube* dikarenakan meningkatkan jumlah energi kinetik per impak dan juga jumlah impak per satuan waktu pada suatu daerah tertentu. Kandungan unsur tertentu pada partikel abrasif juga dapat meningkatkan laju erosi. Unsur silikon (Si) dan juga aluminium (Al) lebih bersifat erosif karena memiliki kekerasan yang tinggi dan energi kinetik partikel yang besar.

Erosi ini sering ditemui pada jenis boiler *overfeed stokers* dikarenakan jenis boiler ini memungkinkan partikel abrasif memasuki aliran gas panas (*flue gas*) dalam jumlah besar. *Fly ash*

*erosion* kebanyakan terjadi pada area yang mempunyai suhu *flue gas* rendah seperti pada *primary superheater* atau *economizer*. Hal tersebut dikarenakan partikel abrasif akan menjadi lebih keras pada saat suhu rendah. *Fly ash erosion* dalam waktu yang cukup lama akan membuat permukaan *tube* terpolos halus atau bahkan dapat menimbulkan alur (*grooves*). Pada kondisi ekstrem, erosi ini menyebabkan penipisan yang signifikan hingga akhirnya pecah. Penampakan erosi akibat partikel *fly ash* dapat dilihat pada gambar di bawah



**Gambar 2. 11** Penampakan Alur Akibat *Erosion* pada *Waste Heat Boiler Tube*

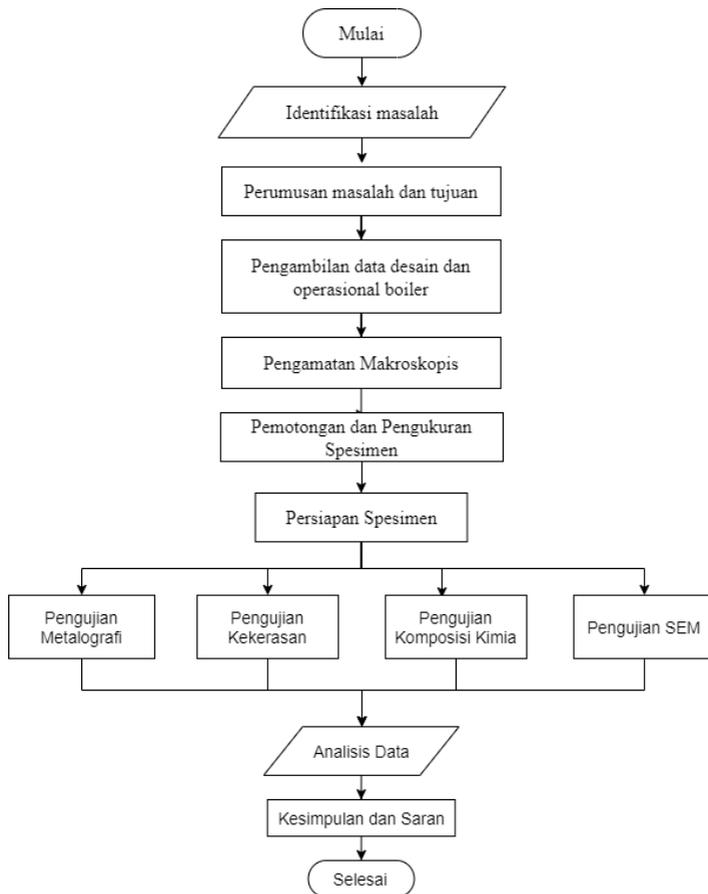
*a. Coal Particle Erosion*

Secara umum erosi ini mirip dengan *fly ash erosion*. Hanya saja erosi ini sering terjadi di *tube* sepanjang atau sekitar *cyclone burner*. Erosi sering terjadi di sekitar *cyclone burner* karena partikel-partikel *coal* atau batubara yang tidak terbakar sempurna oleh *burner* akan menghantam dan menempel pada *tube*. *Tube* yang tertumbuk oleh partikel-partikel tersebut akan membuat aus dan memperlihatkan permukaan *tube* yang tak terlindungi. Partikel batu bara menumbuk dengan kecepatan hingga 9 m/s. Penampakan logam yang tererosi mirip dengan penampakan logam akibat *fly ash erosion*.

# BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2. Pipa Waste Heat Boiler

#### 3.2.1. Material Pipa

Telah diuji komposisi kimia pipa WHB yaitu material baja karbon disebut 13CrMo 4-5 di PT. Barata hasilnya adalah sebagai berikut :

**Tabel 3. 1** Komposisi kimia pipa WHB berdasarkan hasil spectrometer

Komposisi Kimia	% Berat
Karbon (C)	0,14428
Silika (Si)	0,29767
Mangan (Mn)	0,50887
Fosfor (P)	0,01292
Sulfur (S)	0,00464
Nikel (Ni)	0,05284
Kromium (Cr)	0,87158
Molibdenum (Mo)	0,48033

#### 3.2.2. Dimensi Pipa

Pipa *Waste Heat Boiler* dengan material 13CrMo 4-5 ini didapat dari salah satu produsen pupuk urea di Indonesia dengan dimensi sebagai berikut



**Gambar 3. 2** Pipa *Waste Heat Boiler*

1. Panjang Pipa WHB = 268,72 mm
2. *Outside Diameter* = 38,06 mm
3. *Inside Diameter* = 34,54 mm
4. Ketebalan = 3,52 mm

### 3.2.3. Material Uji

Setelah diukur dimensi pipa secara keseluruhan, pipa dipotong menjadi 4 bagian untuk dilakukan beberapa pengujian. Untuk lokasi pengambilan sampel pipa sebagai berikut :



**Gambar 3. 3** lokasi pemotongan sampel untuk pengujian

Dari hasil pemotongan tersebut, maka didapatkan 4 sampel material yang akan diuji untuk mendapatkan data yang diperlukan. Hasil dari potongan tersebut sebagai berikut :



(a)



(b)



(c)



**Gambar 3. 4** Hasil potongan sampel pipa, (a) potongan 1, (b) potongan 2, (c) potongan 4, (d) potongan 3 bagian dalam, (e) potongan 3 bagian luar.

### 3.3. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan untuk analisa kegagalan dan fungsinya adalah sebagai berikut :

1. Penggaris dan Jangka Sorong  
Penggaris dan jangka sorong digunakan untuk mengukur panjang pipa, diameter pipa, dan tebal pipa setelah dipotong.
2. Gerinda  
Gerinda digunakan untuk memotong spesimen menjadi beberapa bagian dan untuk memperhalus permukaan spesimena
3. Kamera Digital  
Kamera digital digunakan untuk mengambil gambar spesimen pipa dan kerak.
4. Mikroskop Optik  
Mikroskop optik digunakan untuk mengamati fase, distribusi, morfologi, dan topologi struktur mikro spesimen.



**Gambar 3. 5** Mikroskop Optik “Olympus BX -6M“

5. Perangkat pengujian metalografi berupa *mounting*, *grinding/polishing*, dan *etching*  
Mounting spesimen menggunakan resin dan hardener dengan komposisi 1 : 3, Mesin grinder dan polisher “ Metcon “ digunakan untuk proses grinding kertas amplas mulai dari grid 80,100,150 sampai 2000 dan proses polishing menggunakan kain beludru dengan ditaburi bubuk alumina.



**Gambar 3. 6** Mesin Grinder dan Polisher “ Metcon “

6. Perangkat pengujian kekerasan yaitu Mesin *Micro Vickers Hardness* bertujuan untuk mendapatkan besar

nilai kekerasam pada titik-titik tertentu pada material. Untuk penelitian kali ini titik diambil dalam satu garis untuk membandingkan kekersan bagian luar pipa dengan bagian dalam pipa



**Gambar 3. 7** Mesin Micro Vickers Hardness

7. *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)*

Karakterisasi sampel dengan menggunakan alat SEM bertujuan untuk melihat morfologi dan topografi dari sampel. EDS merupakan suatu alat yang digunakan mengetahui unsur yang terkandung pada sampel. EDS dapat dilakukan pada daerah yang kecil (titik), garis dan kotak. Selain itu EDS dapat digunakan untuk mengetahui sebaran unsur (mapping) pada sampel.



**Gambar 3. 8** Mesin HITACHI FLEXSEM 100 untuk pengujian SEM

8. *X-Ray Diffraction (XRD) dan Spectrometer*  
Difraksi sinar-X (XRD) adalah teknik non-destruktif untuk menganalisis struktur bahan kristalin atau semi-kristalin, namun XRD dapat juga untuk mempelajari bahan non-kristalin. Sedangkan *Spectrometer* berfungsi untuk menentukan kuantitas unsur pada sampel. Panjang gelombang atomic spectral line memberikan informasi mengenai identitas unsur dengan intensitas cahaya yang diemisikan sebanding dengan jumlah atom unsur tertentu.

### **3.4 Langkah – Langkah Penelitian**

Langkah – langkah penelitian dalam tugas akhir ini meliputi :

#### **3.4.1 Analisa Komposisi Kimia Bahan**

Pengujian komposisi kimia ini dilakukan di PT. Barata. Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui unsur – unsur kimia dan membandingkannya dengan spesifikasi standar agar dapat diketahui jenis dari material tersebut. Alat yang digunakan untuk pemeriksaan komposisi kimia tersebut adalah mesin Spectrometer.

#### **3.4.2 Pengujian Metalografi**

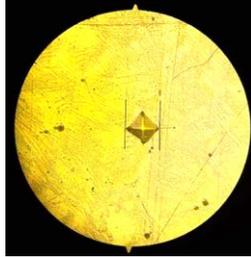
Metalografi dilakukan untuk melihat kecenderungan struktur mikro di dalam spesimen dan bentuk patahan yang akan dipergunakan untuk mengetahui sifat – sifat mekanik fasa – fasa yang terdapat pada spesimen tersebut. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin ITS. Spesimen tersebut diamati dan dipotret di bawah mikroskop di berbagai lokasi dengan beberapa kali pembesaran. Tube WHB dipotong melintang melalui tengah – tengah lubang yang rusak untuk pemeriksaan metalografi, hal ini dilakukan untuk memudahkan pengamatan pada daerah kerusakan.

Langkah – langkah dalam pemeriksaan ini meliputi :

1. Pemotongan spesimen menggunakan gerinda tangan.
2. Mounting spesimen menggunakan resin dan hardener dengan perbandingan 1:3.
3. Proses grinding yaitu spesimen digosok dengan mesin grinder menggunakan kertas gosok grid 80, 100, 120, 150, 180, 220, 240, 320, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, dan 2000.
4. Proses polishing menggunakan mesin Polisher Metcon dengan memakai kain beludru dan ditaburi bubuk alumina.
5. Spesimen dietsa menggunakan campuran 2 % asam nitrat (  $\text{HNO}_3$  ) dan 98 % alkohol selama beberapa detik, dicelup alkohol, dicuci menggunakan air dan dikeringkan.
6. Spesimen diamati struktur mikro menggunakan mikroskop optik Olympus BX – 6M pada lokasi pengamatan dengan perbesaran 100 X, 500 X, dan 1000 X.

### **3.4.3. Pengujian Micro Vickers Hardness**

Pengujian *Micro Vickers Hardness* dilakukan untuk mengetahui besar nilai kekerasan pada material. Untuk pemilihan titik percobaan dilakukan pada satu garis yang sama dari luar kedalam. Hal ini dilakukan untuk membandingkan nilai kekerasan dari bagian luar pipa dengan bagian dalam pipa. Dari hasil nilai kekerasan yang didapatkan dapat dibuat grafik nilai kekerasan dari masing-masing titik di material.



**Gambar 3. 9** Hasil Indentasi pengujian Micro Vickers Hardness

#### **3.4.4. Pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)***

Pengujian ini berfungsi untuk mengetahui Karakterisasi sampel dengan menggunakan alat SEM bertujuan untuk melihat morfologi dan topografi dari sampel. EDS merupakan suatu alat yang digunakan mengetahui unsur yang terkandung pada sampel. EDS dapat dilakukan pada daerah yang kecil (titik), garis dan kotak. Selain itu EDS dapat digunakan untuk mengetahui sebaran unsur (mapping) pada sampel.

Langkah-langkah yang harus dilakukan untuk melakukan pengujian ini adalah :

1. Pemotongan spesimen menggunakan gerinda tangan.
2. Mounting spesimen menggunakan resin dan hardener dengan perbandingan 1:3.
3. Proses grinding yaitu spesimen digosok dengan mesin grinder menggunakan kertas gosok grid 80, 100, 120, 150, 180, 220, 240, 320, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, dan 2000.
4. Proses polishing menggunakan mesin Polisher Metcon dengan memakai kain beludru dan ditaburi bubuk alumina.

5. Spesimen dietsa menggunakan campuran 2 % asam nitrat (  $\text{HNO}_3$  ) dan 98 % alkohol selama beberapa detik, dicelup alkohol, dicuci menggunakan air dan dikeringkan.
6. Material diamati morfologi, topografi, dan sebaran unsur pada material. Setelah dilakukan akan didapatkan data-data yang dibutuhkan dan dapat digambarkan pada grafik.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 *Waste Heat Boiler Tube*

WHB ini memiliki total pipa sebanyak 1024 dengan panjang total (ujung pipa gas *inlet* sampai ujung pipa gas *outlet*) 7060mm. *Waste Heat Boiler* sendiri memiliki parameter operasi masing-masing. Hal tersebut ditentukan dari beberapa aspek. WHB ini memiliki parameter operasi yang sesuai dengan kebutuhan pabrik dan parameter operasi tersebut bisa dilihat pada tabel 4.1. Pipa WHB merupakan pipa yang digunakan sebagai saluran pembuangan sisa uap basah yang berada dalam WHB kemudian keluar melalui riser berupa uap panas lanjut (*superheated steam*).

**Tabel 4. 1** Parameter Operasi Waste Heat Boiler 101-C

Parameter	Data Sheet	
	Shell Side	Tube Side
Kecepatan inlet		24 m/s
Temperatur In	328,4 °C	870°C
Temperatur out	328,4 °C	444,4 °C
Transfer Rate		619,4 kcal/hrm <sup>2</sup> .°C
Inlet Pressure		39,8 kg/cm <sup>2</sup>
Pressure Drop		0,25 kg/cm <sup>2</sup>
Viscosity		0,0438 cP
Density		6,9 kg/m <sup>3</sup>
Specific Heat		0,526 kcal/kg°C
Wall Thick		3,2 mm
Bypass Wall Thick		60 mm

Sampel yang diambil pada pabrik terdiri dari beberapa pipa. Masing-masing pipa berada pada posisi yang berbeda namun dengan kondisi yang hampir sama. Kondisi pipa yang diambil adalah pipa-pipa yang sudah bisa dianggap mengalami kegagalan. Posisi masing-masing sampel adalah *Row 3 tube 6*, *Row 24 tube 9*, dan *Row 29 tube 13*. Untuk penelitian ini pipa yang digunakan adalah pipa pada posisi *Row 29 tube 13*. Kondisi pipa sampel dapat dilihat pada gambar 4.1.



**Gambar 4. 1** Beberapa pipa WHB yang mengalami failure

Pipa yang digunakan pada WHB ini memiliki bentuk dan sifat tertentu berdasarkan material yang digunakan. Untuk material yang digunakan adalah 13 CrMo 4-5. Pipa yang telah dipotong untuk dijadikan sampel memiliki properties lain seperti pada tabel 3.

**Tabel 4. 2** Properties Material

Jenis Material	Low Carbon Steel
Standar Material	13CrMo 4-5 / ASTM A182 F11
Panjang	268,72 mm
Diameter luar	38,06 mm
Diameter dalam	34,54 mm
Ketebalan	3,52 mm

Dalam pengoperasiannya, sering kali di temukan kegagalan pada WHB. Beberapa kegagalan yang terjadi pada WHB yaitu *ash/high temperature corrosion*, *selective leaching* dan *decarburization*. Salah satu kegagalan yang biasa terjadi yaitu terjadinya pengurangan ketebalan WHB tube. Pengurangan ketebalan pipa bisa dianggap sebagai sebuah kegagalan ketika pengurangan sudah melebihi dari batas toleransi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui penyebab serta mekanisme penipisan dari tube sehingga di kemudian hari dapat dilakukan upaya preventive untuk mencegah terjadinya kegagalan.

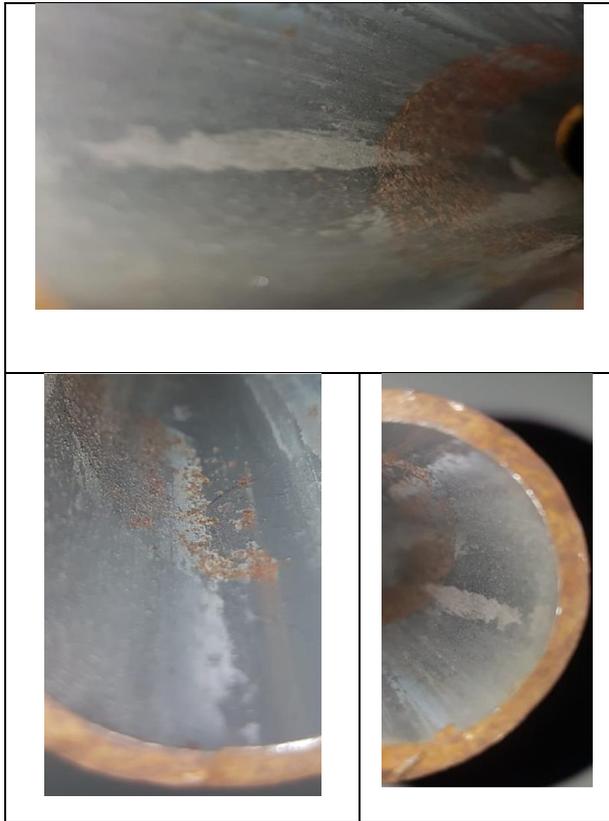
#### **4.2 Pengamatan Makro**

Analisa visual dilakukan pada permukaan dalam dan luar tube WHB untuk melihat kerusakan berupa pengelupasan di bagian luar pipa, pembentukan produk korosi, dan perubahan warna yang terjadi pada spesimen. Pengamatan makro dilakukan pada permukaan dalam dan permukaan luar tube.

Hasil dari pengamatan pada bagian permukaan dalam pipa WHB tidak mengalami kerusakan yang parah seperti di bagian luar pipa. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh permukaan dalam pipa WHB memiliki lapisan berwarna merah bata yang merata sepanjang permukaan dalam pipa. Hal tersebut menunjukkan indikasi terjadi proses korosi yang berhubungan dengan gas panas. Tidak terlihat adanya kerusakan seperti garis

retakan atau lubang pada permukaan dalam pipa WHB, sehingga penyerangan korosi pada permukaan dalam pipa tergolong jenis *uniform corrosion*.

**Tabel 4. 3** Pengamatan Makro Permukaan dalam Pipa inlet WHB



Sedangkan pengamatan makro pada bagian permukaan luar pipa memperlihatkan adanya beberapa tingkat penipisan yang terjadi. Spesimen yang didapatkan berupa satu buah pipa WHB

yang mengalami pengelupasan pada luar permukaan pipa. Pada pipa bagian dekat *tubesheet* terdapat *ferrule* yang berada di bagian dalam pipa, *ferrule* dipasang di dalam pipa agar lapisan yang berada di *tubesheet* tidak menutupi *tubesheet* karena batu tahan api dipasang di *tubesheet* agar *tubesheet* tidak meleleh terkena gas panas dari gas inlet yang suhunya 894°C. Kondisi pipa WHB dekat *tubesheet* yang didalamnya terdapat *ferrule* tidak mengalami kerusakan dan bagian pipa yang tidak terdapat *ferrule* telah mengalami kerusakan, kemudian bagian setelah rusak pipanya tidak mengalami kerusakan karena kondisi pipanya tidak sepanas yang mengalami kerusakan.

Dapat dilihat ada daerah yang hampir dikatakan tidak mengalami penipisan atau daerah normal (ujung kiri), ada daerah yang mengalami penipisan paling parah (tengah), serta bagian yang mengalami sedikit penipisan (ujung kanan). Dari pengamatan penipisan, dapat dilihat terbentuknya lapisan-lapisan kerak pada pipa dimana lapisan tersebut berada pada sebagian beq3sar permukaan pipa atau hampir menyelimuti seluruh permukaan pipa. Ketebalan dari kerak juga bermacam macam pada tiap lokasi. Selain dari kerak yang terbentuk, terdapat juga perbedaan warna dimana daerah yang mengalami penipisan memiliki warna yang lebih gelap dari pada daerah yang cenderung normal.

**Tabel 4. 4** Pengamatan Makro permukaan luar Pipa inlet WHB

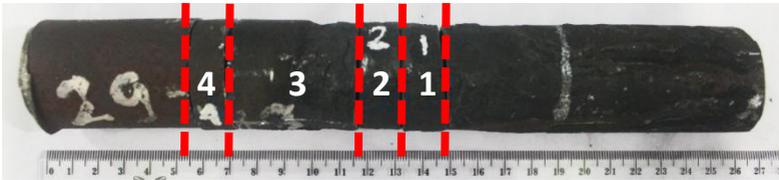




Dari gambar diatas dapat diketahui bentuk penipisan yang terjadi pada bagian luar pipa terlihat akibat adanya aliran yang mengenai permukaan. Hal ini dilihat dari penipisan yang berlapis-lapis. Pipa terlihat terkikis dengan kedalaman yang berbeda-beda. Semakin dalam penipisan yang terjadi pada area pipa maka erosi yang terjadi pada daerah tersebut semakin parah dan kemungkinan kecepatan steam yang menabrak area tersebut semakin tinggi.

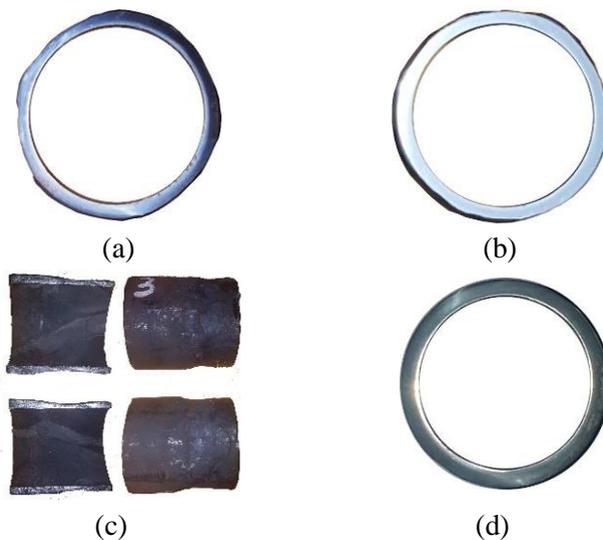
### 4.3 Pengukuran Potongan Tube

Pemotongan tube dan pengukurannya berfungsi untuk membagi sampel yang dibagi berdasarkan data yang ingin diambil. Dari pipa yang diambil, dilakukan pemotongan sebanyak 4 sample. Pemotongan dilakukan berdasarkan tingkat pengikisan yang terjadi pada permukaan. Pada gambar 5 dapat dilihat pemotongan yang dilakukan pada pipa WHB.



**Gambar 4. 2** Potongan pada pipa WHB

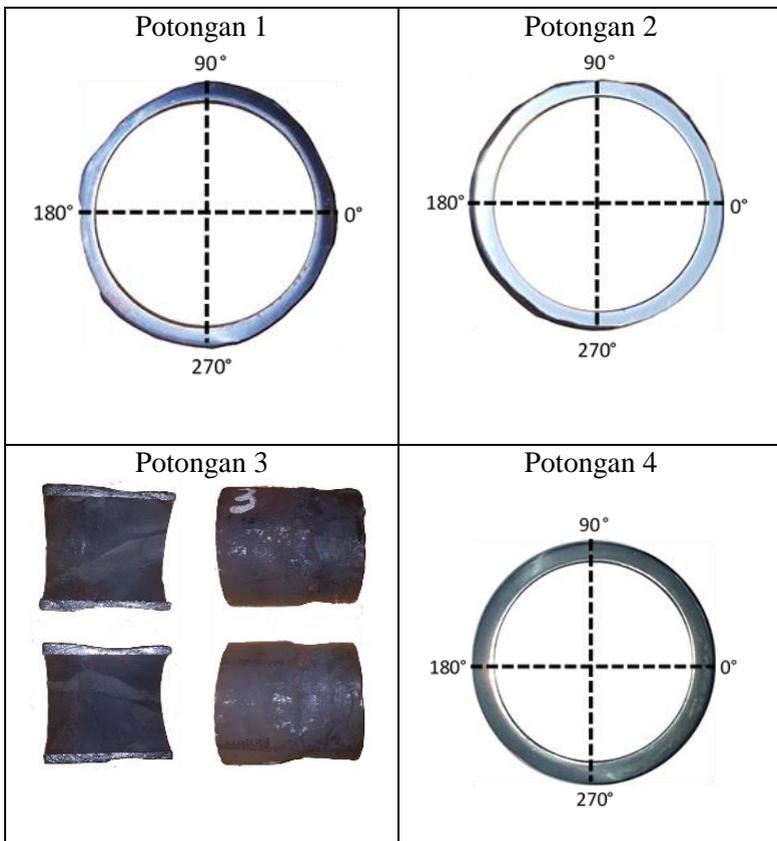
Pipa yang digunakan dipotong menjadi 4 sampel bagian. Jumlah potongan berdasarkan dari kondisi dan jumlah pengujian. Dari tiap potongan akan didapatkan data penyebab dari kegagalan pada pipa. Hal ini dikarenakan dibutuhkan data pembandingan pada masing-masing kondisi potongan. Potongan 4 merupakan potongan yang digunakan sebagai potongan referensi. Hal ini dikarenakan potongan 4 secara visual tidak terlihat mengalami pengikisan. Potongan 3 merupakan potongan transisi dimana daerah yang terkikis dengan daerah normal. Sedangkan potongan 1 dan potongan 2 adalah daerah yang mengalami pengikisan dan penipisan yang parah.



**Gambar 4.3** (a) Potongan 1, (b) Potongan 2, (c) Potongan 3, (d) Potongan 4

Setelah dilakukan pemotongan, maka dilakukan pengukuran dimensi (outside diameter). Hasil pengukuran tiap potongan dilakukan pada  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  dan  $270^\circ$ . Untuk hasil pemotongan dapat dilihat pada tabel 4 sedangkan hasil pengukuran dapat dilihat dari tabel 5.

*Tabel 4.5 Gambar Potongan Sampel*



**Tabel 4. 6 Hasil Pengukuran Outside Diameter (mm)**

Posisi	0°	90°	180°	270°
Potongan 1	36,03	37,59	37,33	37,81
Potongan 2	36,29	36,2	36,68	36,02
Potongan 3 (tipis)	36,41	36,18	36,7	36,1
Potongan 3 (tebal)	37,88	37,98	38,02	37,92
Potongan 4	37,91	38,06	37,91	38,01

Dari hasil pengukuran potongan tube WHB, nilai *Outside Diameter* terkecil yaitu 36, 02 mm yang terletak pada potongan 2 di titik 270°. Sedangkan untuk nilai *Outside Diameter* terbesar terdapat pada potongan 4 di titik 90° yaitu sebesar 38,06 mm. Dari pengukuran potongan dapat diambil kesimpulan bahwa potongan yang paling mendekati kondisi awal yaitu potongan 4 dan bisa dijadikan sebagai referensi. Sedangkan potongan yang mengalami pengikisan paling parah terdapat pada potongan 1 dan potongan 2.

### 4.3 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan metode *Optical Emission Spectroscopy* untuk validasi apakah terdapat perbedaan antara komposisi kimia tube dengan komposisi kimia standar tube. Untuk standar yang dicantumkan merupakan komposisi kimia standar pada material 13CrMo 4-5. Perbandingan komposisi kimia tube dengan standar material tube dapat dilihat pada tabel

**Tabel 4.7** Perbandingan Komposisi Kimia Spesimen dengan Standar 13CrMo 4-5

Unsur Penyusun	%	
	Standar 13CrMo 4-5	Hasil Uji Spesimen
Carbon (C)	0,8-0,18	0,14428
Silicon (Si)	0,35 maks	0,29767
Manganese (Mn)	0,40-1,00	0,50887
Phosphor (P)	0,025 maks	0,01292
Sulfur (S)	0,01 maks	0,00464
Nickel (Ni)	0	0,05284
Chromium (Cr)	0,70 -1,15	0,87158
Molibdenum (Mo)	0,40-0,60	0,48033

Setelah dilakukan pengujian, komposisi kimia spesimen sebagian besar masih sesuai dengan standar 13CrMo 4-5, namun ada beberapa yang sudah tidak sesuai standar. Dari hasil perbandingan dapat dilihat semua unsur penyusun masih sesuai dengan standar material komposisi kimia dari 13CrMo 4-5. Perbedaan hanya berada pada unsur Nickel (Ni) yang memang ditambahkan pada material pipa untuk mendapatkan sifat material yang dibutuhkan pada pipa WHB. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada perubahan dari unsur penyusun pada material sampel dan dapat disimpulkan failure yang terjadi tidak dipengaruhi oleh komposisi kimia.

#### 4.4 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui bagaimana bentuk struktur mikro yang pada material. Sampel yang diuji adalah potongan 1 dan potongan 4. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan struktur mikro daerah yang memiliki

ketebalan dibawah batas toleransi dengan daerah yang hampir tidak mengalami penipisan (*virgin tube*).

#### 4.4.1 Struktur Mikro Potongan 1

Pengambilan struktur mikro pada sampel dilakukan pada 3 bagian, yaitu bagian dalam, bagian tengah, dan bagian luar dari tube. Hal ini dilakukan untuk mengetahui ada atau tidaknya perbedaan struktur mikro pada bagian yang berbeda. Hasil pengujian struktur mikro dapat dilihat pada tabel dibawah

**Tabel 4. 8** Hasil pengamatan struktur mikro potongan 1

Spesimen Uji	Titik Uji	Mikro Struktur
	Bagian Dalam	
	Bagian Tengah	
	Bagian Luar	

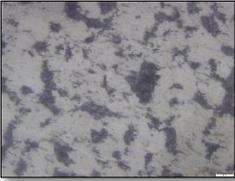
Berdasarkan hasil metalografi pada potongan 1, dapat diketahui bahwa matriks penyusunnya berupa normal ferrit dan *pearlite*. Fase ferrite ditunjukkan dengan area berwarna putih bersih dan terang sedangkan *pearlite* terlihat berwarna gelap. Hasil pengamatan struktur mikro dari potongan 1 dapat dilihat terdapat perbedaan yang cukup signifikan pada tiap bagian. Pada mikro struktur bagian dalam batas butir tidak terlihat begitu jelas. Selain itu bentuk dari *pearlite* yang terlihat tidak beraturan dan terlihat lebih sedikit dibanding bagian yang lain. Pada mikro struktur bagian tengah memiliki sedikit perbedaan dengan bagian dalam. Perbedaannya hanya terlihat dari komposisi *pearlite* yang lebih banyak daripada bagian dalam. Sedangkan untuk bagian luar terlihat perbedaan yang sangat jelas dengan bagian lainnya. Pada bagian luar batas butir terlihat sangat jelas. Bentuk dari ferrite dan *pearlite* dari mikro struktur bagian luar terlihat sangat jelas.

Perubahan mikro struktur pada bagian dalam dan tengah disebabkan oleh penyerapan panas yang berlebih ( $\pm 800^{\circ}\text{C}$ ) disertai dengan pendinginan yang lambat. Bagian luar tidak memiliki struktur mikro yang berbeda dengan yang lain karena pada bagian luar menerima panas yang paling kecil. Selain paling jauh dari *flue gas*, bagian luar juga paling dekat dengan *cooling water*.

#### **4.4.2 Struktur Mikro Potongan 4**

Pengambilan struktur mikro pada sampel 4 dilakukan pada 3 bagian, yaitu bagian dalam, bagian tengah, dan bagian luar dari tube. Hal ini dilakukan untuk mengetahui ada atau tidaknya perbedaan struktur mikro pada bagian yang berbeda. Hasil pengujian struktur mikro dapat dilihat pada tabel 4.9

**Tabel 4. 9** Hasil pengamatan struktur mikro potongan 4

Spesimen Uji	Titik Uji	Mikro Struktur
	Bagian Dalam	
	Bagian Tengah	
	Bagian Luar	

Dari hasil pengamatan pada potongan 4, untuk matriks penyusunnya tidak berbeda dengan potongan yaitu berupa normal ferrite dan *pearlite*. Fase ferrite di tunjukan dengan area berwarna putih bersih dan terang sedangkan *pearlite* terlihat berwarna gelap. Dapat dilihat bahwa hasil pengujian mikro struktur bagian tengah dan bagian luar memiliki hasil yang mirip bahkan cenderung sama. Kesamaan pada bagian tengah dan luar terlihat dari segi matrik penyusun dan kejelasan batas butir. Sedangkan untuk bagian dalam terlihat perbedaan dimana batas butir terlihat samar. Kemungkinan dikarenakan proses etsa yang kurang. Bagian dalam memiliki struktur mikro yang berbeda karena bagian yang paling dekat dengan sumber panas. Bagian tengah dan bagian luar memiliki

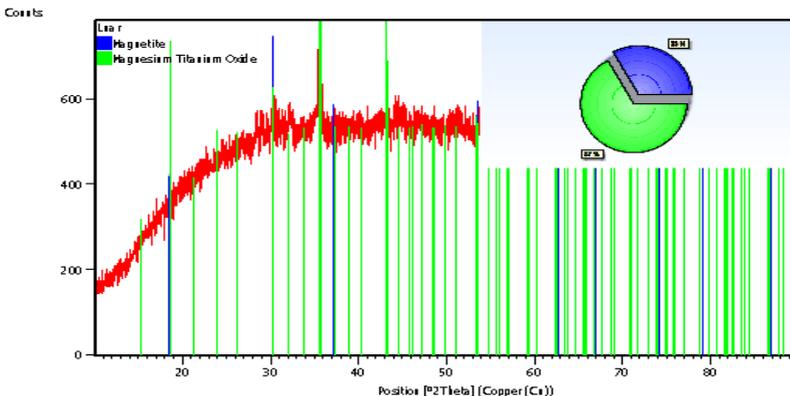
struktur mikro yang cenderung sama karena bisa dianggap mendapatkan perlakuan yang sama atau panas yang sampai di bagian tengah dan dibagian luar tidak terlalu signifikan.

Jika dibandingkan dengan potongan 1, struktur mikro bagian 4 memiliki keseluruhan struktur mikro yang hampir sama. Hal ini dikarenakan pada bagian potongan 4 masih ada *ferrule* yang melindungi dari panas pada bagian pipa *inlet*. Sedangkan untuk potongan 1 terpapar panas karena tidak adanya *ferrule* pada pipa bagian potongan 1. Tidak ditemukan juga tanda-tanda *failure* pada kedua potongan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa mikrostruktur pada semua bagian cenderung sama dan tidak ada perubahan.

#### 4.5 Pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*)

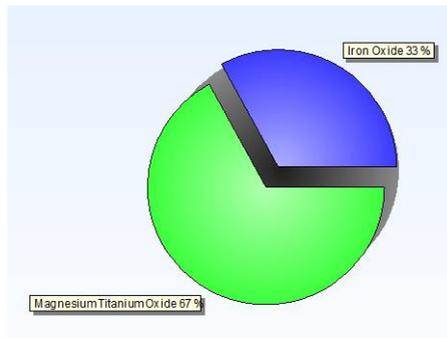
Uji XRD dilakukan pada bagian lapisan kerak yang terdapat pada sisi luar dan sisi dalam pipa. Uji XRD dilakukan untuk mengidentifikasi produk senyawa korosi yang terbentuk akibat reaksi antara logam paduan pipa dengan fluida di bagian luar berupa air dan fluida bagian dalam berupa uap panas.

##### 4.5.1 Pengujian XRD Permukaan Luar Pipa



**Gambar 4. 4** Hasil pengujian XRD pada bagian luar pipa

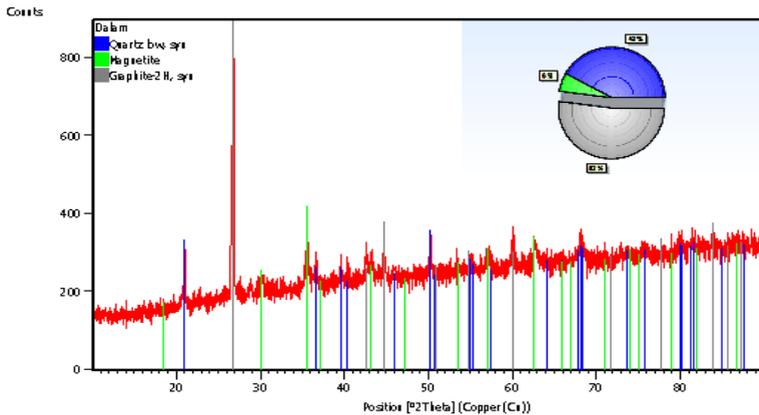
Dari hasil pengujian produk korosi bagian luar pipa dapat diketahui bahwa teridentifikasi senyawa  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  terbentuk akibat reaksi antara Fe pada permukaan luar pipa dengan  $\text{H}_2\text{O}$  (uap air) pada temperatur tinggi.  $\text{H}_2\text{O}$  pada temperatur tinggi mengalami ionisasi menjadi  $2\text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}^-$  pada temperatur  $200^\circ\text{C}$  dan dinding luar pipa mengalami kenaikan temperatur menjadi  $328^\circ\text{C}$  akibat transfer panas dari gas panas dalam pipa. Sehingga Fe bereaksi dengan oksigen dari hasil ionisasi air.



**Gambar 4. 5** Persentase senyawa yang terbentuk pada bagian luar pipa

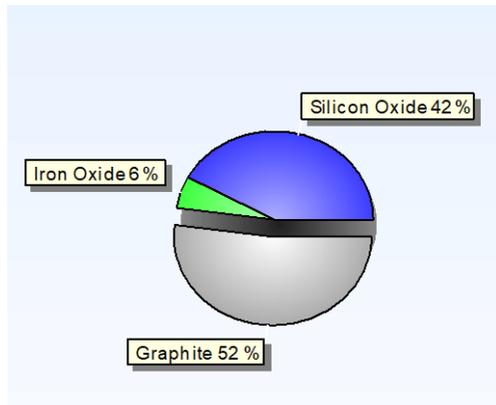
Dari hasil pengujian didapatkan juga nilai persentase antara senyawa yang terbentuk pada produk korosi bagian luar pipa. Warna biru pada diagram merupakan persentase dari *Iron Oxide* yaitu sebesar 33% sedangkan warna hijau adalah *Magnesium Titanium Oxide* yaitu sebesar 67%.

#### 4.5.2 Pengujian XRD Permukaan Dalam Pipa



**Gambar 4. 6** Hasil pengujian XRD pada bagian dalam pipa

Selain produk korosi bagian luar pipa, dilakukan pengujian XRD juga pada produk korosi pada bagian dalam pipa. Berdasarkan hasil uji XRD teridentifikasi senyawa *Graphite* (C). Unsur C terbentuk akibat gas sisa pembakaran yang membentuk jelaga dan menempel di dinding lapisan dalam pipa. *Graphite* (C) terdapat di bagian dalam pipa karena fluida yang mengalir adalah gas panas (*flue gas*) / gas hasil sisa pembakaran yang umumnya berupa gas CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O sisa, N<sub>2</sub>.



**Gambar 4. 7** Persentase senyawa yang terbentuk pada bagian dalam pipa

Dari hasil pengujian didapatkan juga nilai persentase antara senyawa yang terbentuk pada produk korosi bagian dalam pipa. Warna biru pada diagram merupakan persentase dari *Silicon Oxide* ( $\text{SiO}_2$ ) sebesar 42%, warna hijau adalah *Iron Oxide* sebesar 6%, dan warna abu-abu adalah *Graphite* (C) 52%. Dari hasil tersebut bisa disimpulkan bahwa adanya pelarutan pada unsur Si hingga terbentuk deposit bagian dalam pipa.

#### 4.6 Pengujian Micro Vickers Hardness

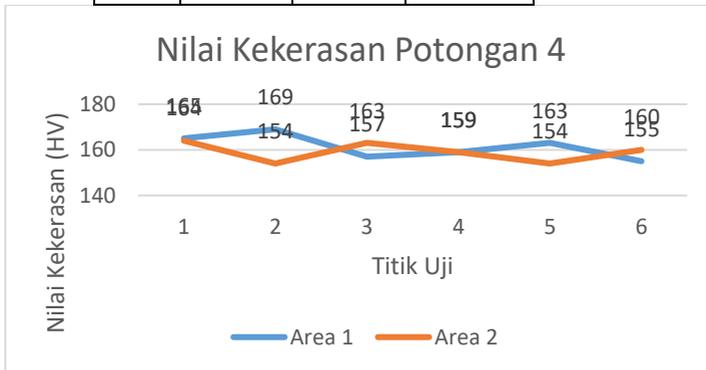
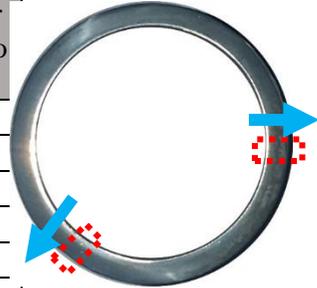
Untuk mengetahui nilai kekerasan pada spesimen penelitian ini dikhususkan pada uji kekerasan *micro vickers*. Pengujian menggunakan dua sample yg diambil pada potongan 4 dan potongan 1. Titik penetrasi dihitung jaraknya dari permukaan dalam pipa, dimulai dengan titik pertama dari jarak 1 mm, titik kedua berjarak 1,5 mm, titik ketiga berjarak 2 mm, titik keempat berjarak 2,5 mm, titik kelima berjarak 3 mm, dan titik keenam berjarak 3,5 mm. Pengambilan titik dilakukan pada 2 area berbeda di tiap sampelnya. Pengujian *micro vickers* pada penelitian ini menggunakan pembebanan sebesar 0,5 HV dengan waktu pembebanan selama 5 detik

#### 4.6.1 *Micro Vickers Hardness* potongan 4

Berikut adalah nilai kekerasan spesimen dari hasil pengujian vickers potongan 4 dan dibandingkan dengan nilai kekerasan standar 13CrMo 4-5. Pengujian micro vickers pada penelitian ini menggunakan pembebanan sebesar 0,5 HV dengan waktu pembebanan selama 5 detik. Berikut adalah nilai kekerasan spesimen dari hasil pengujian vickers potongan 2 dan dibandingkan dengan nilai kekerasan standar 13 CrMo 4-5 :

**Tabel 4. 10** Hasil Pengujian Micro Vickers Hardness pada Potongan 4

Titik	Nilai kekerasan (HV)		
	Area 1	Area 2	Standar 13CrMo 4-5
1	165	164	170
2	169	154	170
3	157	163	170
4	159	159	170
5	163	154	170
6	155	160	170



**Gambar 4. 8** Grafik Hasil pengujian kekerasan pada Potongan 4

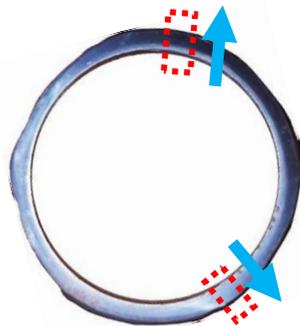
Untuk hasil pengujian pada Potongan 4 data yang didapatkan terlihat acak. Terdapat nilai kekerasan yang sama ataupun mendekati pada beberapa titik, seperti titik 1 dan titik 4. Namun terdapat nilai kekerasan yang sangat berbeda seperti pada titik 2. Untuk titik 3, 5, dan 6 memiliki perbedaan nilai kekerasan yang selisihnya hampir sama. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai kekerasan pada potongan 4 baik di titik 1 sampai titik 6 cenderung tersebar merata. Jika dibandingkan dengan standar kekerasan dari material 13CrMo 4-5, maka keseluruhan nilai kekerasan pada potongan 4 berada dibawah standar.

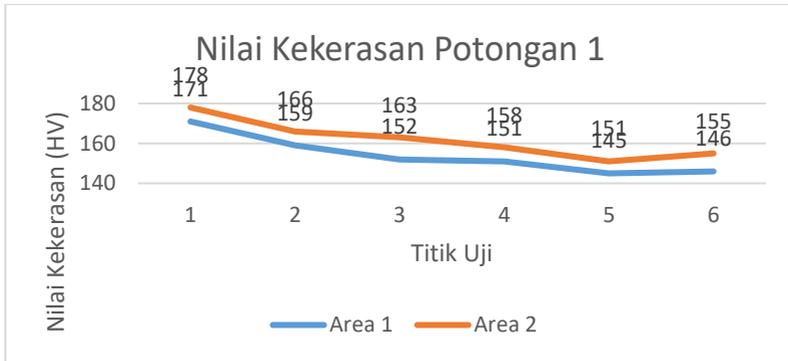
#### 4.6.2 *Micro Vickers Hardness* potongan 4

Setelah dilakukannya pengujian kekerasan pada potongan 4, maka dilakukan pengujian kekerasan pada potongan 1. Pengujian micro vickers pada penelitian ini menggunakan pembebanan sebesar 0,5 HV dengan waktu pembebanan selama 5 detik. Berikut adalah nilai kekerasan spesimen dari hasil pengujian vickers potongan 1 dan dibandingkan dengan nilai kekerasan standar 13CrMo 4-5:

**Tabel 4. 11** Hasil Pengujian Micro Vickers Hardness pada Potongan 1

Titik	Nilai kekerasan (HV)		
	Area 1	Area 2	Standar 13CrMo 4-5
1	171	178	170
2	159	166	170
3	152	163	170
4	151	158	170
5	145	151	170
6	146	155	170





**Gambar 4. 9** Grafik Hasil pengujian kekerasan pada Potongan 4

Untuk hasil pengujian pada Potongan 1 data yang didapatkan cenderung teratur. Untuk nilai kekerasan dari titik uji yang sama di kedua area memiliki selisih yang hampir sama. Dari keseluruhan hasil nilai kekerasan dapat dilihat bahwa grafik yang terbentuk cenderung turun. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan dari potongan 1 semakin mendekati pusat maka nilai kekerasannya semakin besar. Untuk perbandingan dengan standar 13CrMo 4-5 hampir sama dengan potongan 4, yaitu hampir semua nilai kekerasan pada potongan 1 dibawah standar. Namun ada 1 nilai kekerasan yang berada diatas standar yaitu pada titik 1 (paling dalam) baik di area 1 maupun area 2.

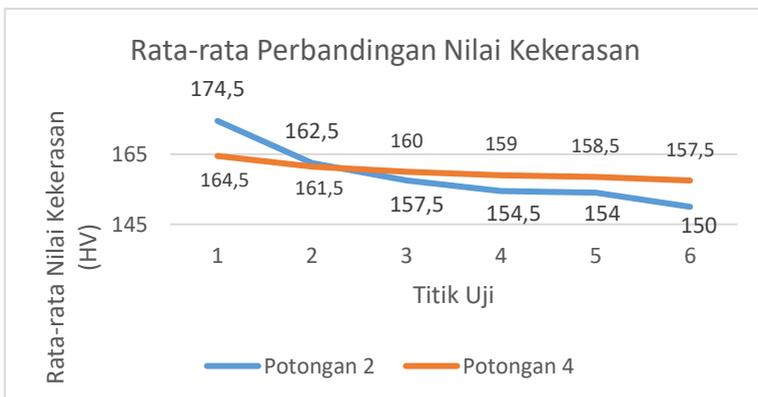
Setelah mendapatkan nilai kekerasan pada masing masing potongan maka hasil rata rata dari tiap potongan dibandingkan. Hal ini dilakukan agar mengetahui bagaimana perbedaan nilai kekerasan potongan yang paling mendekati normal (potongan 4) dengan potongan yang mengalami kegagalan parah (potongan 1). Hasil perbandingan keseluruhan data dapat dilihat pada tabel 12 dan gambar 15.

#### 4.6.3 Perbandingan *Micro Vickers Hardness* potongan 2 dan potongan 4

Setelah mendapatkan nilai kekerasan pada masing masing potongan maka hasil rata rata dari tiap potongan dibandingkan. Hal ini dilakukan agar mengetahui bagaimana perbedaan nilai kekerasan potongan yang paling mendekati normal (potongan 4) dengan potongan yang mengalami kegagalan parah (potongan 2). Hasil perbandingan keseluruhan data dapat dilihat pada tabel 10 dan gambar 15

**Tabel 4. 12** Rata-rata nilai kekerasan Potongan 4 dan potongan 1

Titik	Rata -rata Nilai kekerasan (HV)		
	Potongan 2	Potongan 4	Standar 13CrMo 4-5
1	174,5	164,5	170
3	162,5	161,5	170
5	157,5	160	170
4	154,5	159	170
2	154	158,5	170
6	150	157,5	170

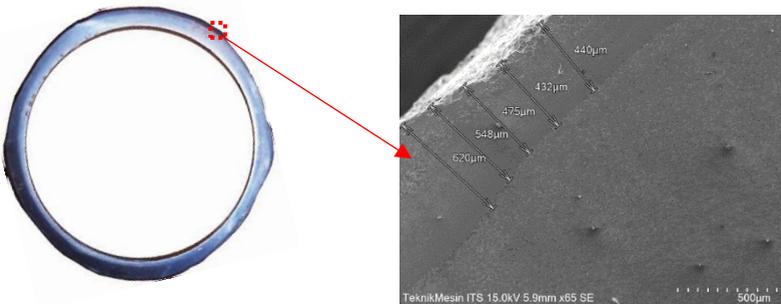


**Gambar 4. 10** Grafik perbandingan hasil rata-rata pengujian *Micro Vickers Hardness*

Dari grafik diatas dapat dilihat *trendline* nilai kekerasan pada potongan 4 dan potongan 1. Nilai yang didapatkan semakin dekat dengan permukaan luar pipa, maka nilai kekerasan semakin kecil, sehingga *trendline* yang terbentuk adalah menurun. Jika ditinjau atau dibandingkan dengan standar nilai kekerasan 13CrMo 4-5, hampir semua rata-rata nilai kekerasan pada semua titik berada dibawah standar. Untuk derajat kemiringannya, potongan 1 memiliki derajat kemiringan yang lebih besar daripada potongan 4. Hal ini dapat diartikan bahwa persebaran nilai kekerasan pada potongan 4 lebih merata dari pada potongan 1 atau bisa juga dikatakan bahwa pada potongan 1 mengalami penurunan nilai kekerasan pada bagian luar pipa.

#### 4.7 Pengujian SEM-EDS

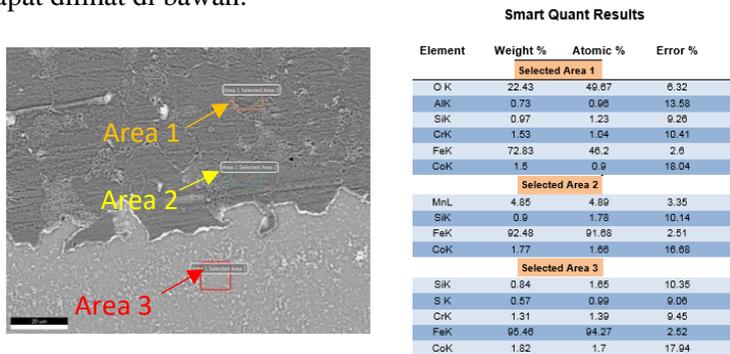
Pengujian SEM-EDS dilakukan untuk mengetahui adanya lapisan oksida pada tube dan juga komposisi kimia yang terdapat di dalamnya. Pengamatan lapisan oksida dilakukan dengan menggunakan metode Scanning Electron Microscope (SEM) sedangkan untuk analisis komposisi kimia lapisan oksida dengan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). Gambar hasil pengamatan lapisan oksida dapat dilihat di bawah.



**Gambar 4. 11** Pengamatan Lapisan Oksida pada Potongan 1

Pada potongan 1, lapisan oksida dapat dilihat keberadaannya pada bagian luar tube. Gambar diatas merupakan gambar lapisan oksida pada sisi luar dari tube (steam side) dan sisi dalam dari tube (flue gas side). Lapisan oksida pada potongan 1 bagian luar memiliki nilai rata-rata ketebalan sebesar 503  $\mu\text{m}$ . Hal ini menunjukkan bahwa oksidasi pada sisi luar potongan 1 sangat tebal dan menjadi indikasi terjadinya oksidasi yang sangat parah pada bagian steam side.

Untuk pengujian EDS diambil 3 area berbeda yaitu lapisan oksida bagian luar (area 1), lapisan oksida bagian dalam (area 2), dan pada tube bagian luar (area 3). Gambar hasil pengujian EDS dapat dilihat di bawah.



**Gambar 4. 12** Analisa SEM-EDS pada potongan 1

Dari hasil EDS, diketahui pula unsur-unsur yang terdapat pada lapisan oksida pada area yang dipilih. Pada lapisan oksida bagian luar (area 1), ditemukan unsur besi (Fe) dan oksigen (O) dalam jumlah besar. Sedangkan unsur lain berupa aluminium, silicon, chromium, dan cobalt ditemukan dalam jumlah kecil. Unsur aluminium dan cobalt merupakan unsur yang terbawa oleh steam dan mengendap di lapisan oksida bagian luar. Sedangkan untuk chromium dan silicon, merupakan unsur penyusun dari tube itu sendiri. Pada lapisan oksida bagian dalam (area 2) jumlah unsur besi (Fe) lebih besar dari pada area 1. Sedangkan unsur lain berupa mangan, silicon dan cobalt ditemukan dalam jumlah kecil. Untuk

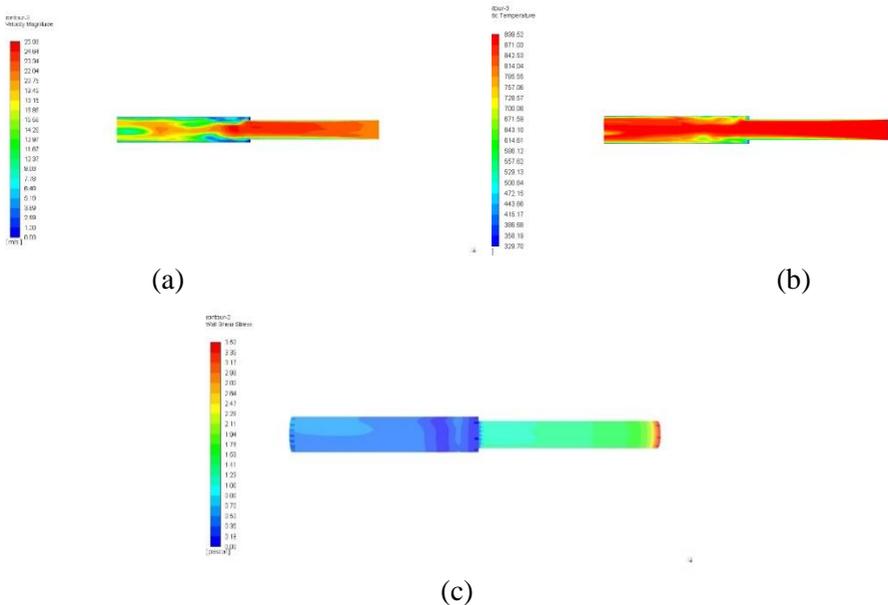
unsur mangan memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan unsur lainnya dimana unsur mangan merupakan unsur yang berfungsi untuk mencegah karat dan korosi pada baja. Pada lapisan oksida bagian luar (area 3), unsur Fe paling besar ditemukan jika dibandingkan dengan area lain. Unsur lain yang ditemukan adalah adanya unsur sulfur, silicon, cobalt dan chromium. Untuk unsur chromium, silicon dan sulfur merupakan unsur penyusun dari tube. Untuk unsur cobalt merupakan unsur tambahan yang berada pada di semua area uji.

#### **4.8 Simulasi Aliran Fluida**

Simulasi fluida dilakukan untuk mengetahui bagaimana profil fluida pada bagian dalam dan bagian luar pipa. Dari pengujian ini dapat diketahui bagaimana pengaruh fluida pada permukaan pipa. Untuk fluida yang berada di dalam pipa adalah *flue gas* sedangkan untuk fluida yang diluar pipa adalah *water (steam)*. Hasil dari pengujian ini akan menampilkan beberapa profil dari fluida seperti kecepatan, temperatur, dan *wall shear stress*.

##### **4.8.1 Aliran fluida dalam pipa**

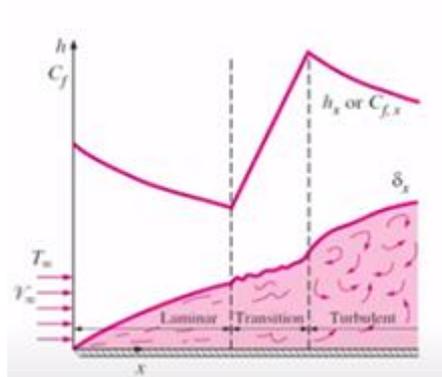
Dari simulasi pada aliran dalam pipa ini akan didapatkan kecepatan, temperatur, dan *wall shear stress* pada fluida di dalam maupun di luar pipa. Untuk hasil simulasi dapat dilihat pada gambar dibawah. Arah gerak fluida adalah dari kanan ke kiri. Dapat dilihat adanya perbedaan diameter dalam pada pipa. Hal ini dikarenakan pada sebagian pipa didalamnya telah dilapisi oleh *ferrule* sebagai pelindung dari panas *flue gas*.



**Gambar 4. 13** Hasil simulasi kondisi fluida (flue gas) didalam pipa WHB (flue gas); (a) profil kecepatan, (b) profile temperatur, dan (c) profil wall shear stress

Dari hasil simulasi kondisi fluida didalam pipa, dapat diketahui bahwa ditinjau dari kecepatan, temperature, dan *wall shear stress*-nya, dilihat dari kontur warna ketika aliran sudah melewati *ferrule*, bagian permukaan dalam pipa masih berada dikondisi standar. Untuk profil kecepatan dapat dilihat bahwa aliran *flue gas* terbentuk *discontinuity flow* pada area dekat dengan ujung *ferrule*. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan diameter dalam sehingga ada area yang menahan aliran *flue gas*. Hal ini mempengaruhi profile pada temperatur. Untuk profil temperatur dapat dilihat lebih meluasnya daerah berwarna merah pada bagian pipa setelah *ferrule*. Namun kondisi ini hanya terjadi pada sebagian

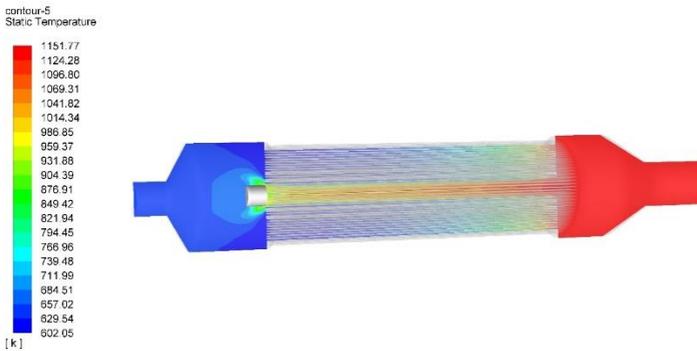
area dan semakin jauh dari inlet, temperature pada bagian dalam pipa semakin kecil.



**Gambar 4.13** Grafik perbandingan  $C_f$  (koefisien konveksi) dengan bentuk aliran

Dengan terbentuknya *discontinuity flow* akan mengakibatkan naiknya koefisien konveksi pada daerah tersebut. Dapat dilihat dari gambar grafik diatas bahwa aliran turbulente akan melonjokkan nilai koefisien konveksi dan akan kembali turun hingga menjadi aliran yang *fully developed*. Dengan naiknya nilai koefisien konveksi, akan meningkatkan nilai heat flux pada area tersebut pula. Heatflux yang tinggi akan menyebabkan *steam blanketing* yang dimana akan menghasilkan suhu dinding pipa yang lebih tinggi secara lokal. Serta ketika suhu dinding pipa tinggi, maka laju korosi yang terjadi juga akan tinggi. Hal ini yang mengakibatkan kerusakan hanya terjadi pada bagian inlet saja, sedangkan pada bagian pipa yang lain tidak terjadi.

Selain itu dilakukan juga simulasi pada keseluruhan bagian pipa untuk profil temperature. Hal ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana persebaran panas pada pipa WHB. Untuk hasil simulasi dapat dilihat pada gambar berikut.

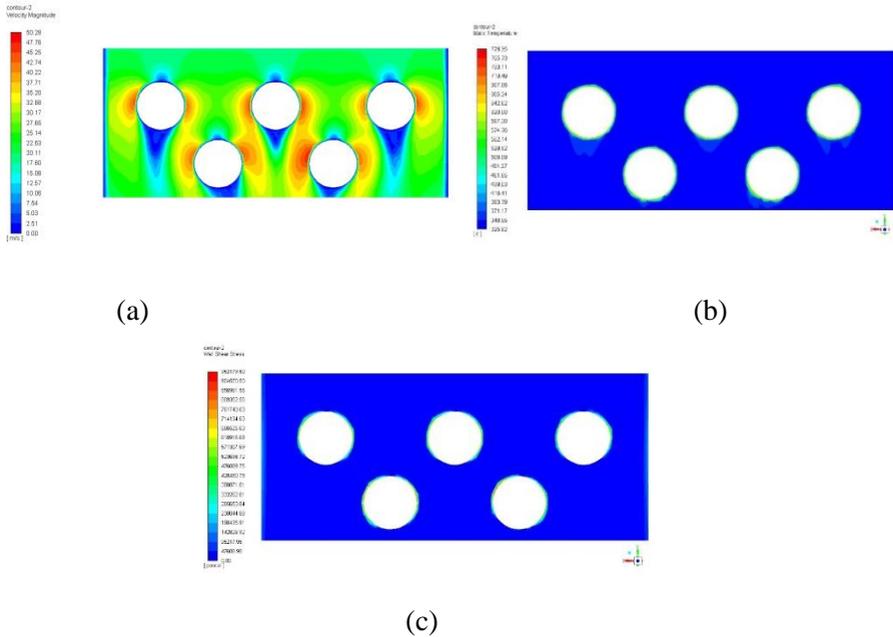


**Gambar 4.14** Simulasi kondisi temperature steam pada keseluruhan pipa

Dari hasil simulasi diatas dapat dilihat bahwa panas pada inlet sangat tinggi hingga mencapai 1151 K. Sedangkan untuk bagian pipa setelahnya telah mengalami pendinginan oleh steam dibagian luar pipa. Dari hasil simulasi juga dapat diketahui bahwa temperature yang tinggi hanya berada sampai seperlima panjang pipa atau hanya sampai segmen 2. Oleh karena kondisi temperature yang jauh berbeda, kondisi pipa yang rusak hanya pada bagian inlet saja akibat temperature yang sangat tinggi sedangkan bagian lainnya tidak mengalami penipisan yang parah baik di permukaan dalam maupun permukaan luar pipa

#### 4.8.2 Aliran fluida luar pipa

Selain kondisi fluida didalam pipa, simulasi juga dilakukan pada kondisi dibagian permukaan luar pipa. Hal ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh fluida luar pipa (*steam*) terhadap permukaan luar pipa. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada gambar dibawah



**Gambar 4. 14** Hasil simulasi kondisi fluida (*steam*) diluar pipa WHB (*flue gas*); (a) profil kecepatan, (b) profile temperatur, dan (c) profil *wall shear stress*

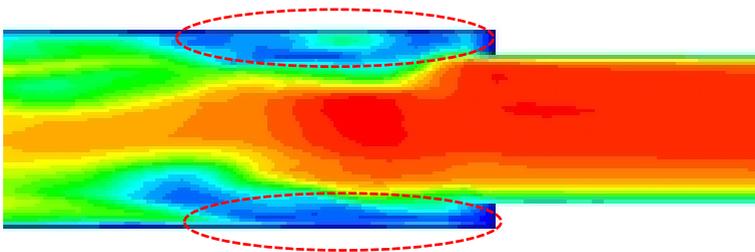
Dari hasil simulasi kondisi fluida (*steam*) diluar pipa, dakan didapati profil kecepatan, temperatur, dan *wall shear stress*. Untuk profil kecepatan dapat dilihat bahwa terjadi kecepatan yang tinggi pada bagian kedua sisi pipa. Hal ini menunjukkan bahwa permukaan luar pipa bagian sisi tersebut akan terus-menerus terkena aliran fluida dengan kecepatan yang cukup tinggi. Sedangkan untuk bagian yang tegak lurus dengan arah aliran (depan dan belakang) kecepatan cenderung kecil bahkan mendekati nol. Untuk profil temperature dapat dilihat hampir tersebar merata, hanya terdapat penurunan temperatur yang kecil pada bagian sisi pipa yang membelakangi arah aliran steam. Untuk

profil *wall shear stress*, kontur warna mengikuti profil kecepatan, dimana daerah yang terkena kecepatan steam tinggi maka nilai *wall shear stress* juga tinggi. Begitu juga sebaliknya, sisi yang tidak terkena aliran *steam* maka nilai *wall shear stress* rendah atau bahkan mendekati nol.

#### 4.9 Pembahasan

Untuk analisa pada potongan 4 WHB tube tidak ditemukannya lapisan oksida secara jelas dari pengamatan makro. Berbeda dengan potongan 1 dan potongan 2 dimana lapisan oksida yang terbentuk sangat tebal sehingga dapat dilihat secara makro. Selain itu pada potongan 1 dan 2 terlihat perbedaan ketebalan pada bagian tertentu. Hal tersebut mengindikasikan adanya erosi pada bagian yang mengalami penipisan parah.

Diketahui bahwa daerah yang mengalami penipisan berada bagian pipa yang tidak dilapisi oleh *ferrule*. Ketebalan pada bagian pipa yang dilapisi *ferrule* bisa dikatakan tidak mengalami penipisan yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu dari *flue gas* sangat mempengaruhi terjadinya penipisan, terbukti dari perbedaan kondisi permukaan luar potongan 4 dan potongan 2.

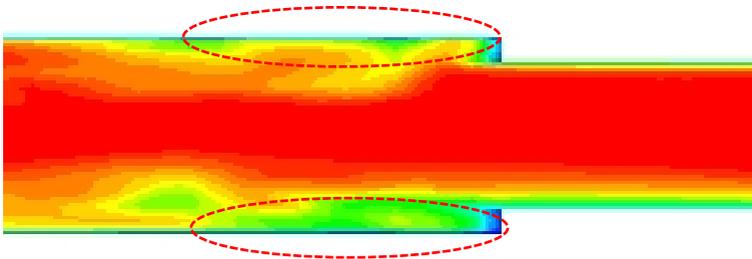


**Gambar 4.16** Area terbentuknya *flow discontinuity*

Ditinjau dari simulasi aliran *flue gas*, akan terlihat kondisi dimana pada kedalaman tertentu (dari *inlet*), tepatnya daerah setelah *sudden enlargement*, terdapat daerah dimana kecepatan *flue gas* sangat kecil hingga hampir berhenti. Hal ini membuat *flue gas* terperangkap pada daerah tersebut dan membuat adanya *flow*

*channel discontinuity*. Setelah area tersebut maka aliran *flue gas* akan perlahan memenuhi pipa hingga membentuk *fully development flow*.

Dari profil kecepatan yang menunjukkan adanya *flow channel discontinuity* tersebut mempengaruhi profil temperature. Pada area terjadinya *flow channel discontinuity* diketahui memiliki temperature yang jauh lebih kecil dibandingkan temperature pada pipa *inlet* area pusat. Hal ini terjadi karena pada area tersebut tidak terkena langsung aliran *flue gas*, namun panas yang terbentuk akibat adanya *flow channel discontinuity*. Dapat dilihat dari gambar berikut



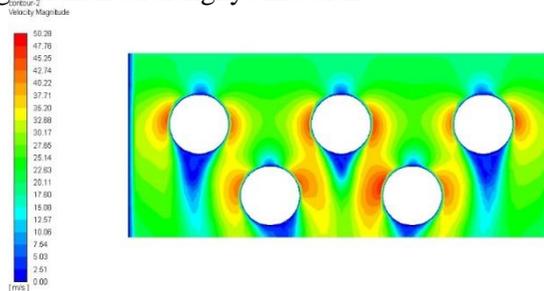
**Gambar 4.17** Area yang menunjukkan temperature lebih rendah

Jika ditinjau dari koefisien konveksi yang terjadi, daerah pada gambar diatas akan memiliki nilai koefisien konveksi yang lebih besar. Hal ini dikarenakan koefisien konveksi dipengaruhi oleh perbedaan suhu antara permukaan pipa dengan *fluid gas*. Semakin kecil temperatur *flue gas* akan memperbesar nilai koefisien konveksi. Nilai konveksi ini akan mempengaruhi panas pada permukaan luar pipa dan akan membuat material pipa semakin panas. Panas pada pipa akan mempengaruhi membuat reaksi oksidasi pada permukaan luar pipa. Hal ini dikarenakan fungsi laju oksidasi berbanding lurus dengan temperatur dan waktu.

Kondisi steam blanketing pada tabung boiler adalah hal yang penting. Kecepatan fluks panas berakhir seluruh panjang

tabung dari WHB harus dievaluasi, terutama area masuk yang bergolak di dekat ujung dari ferrule tersebut. Kecepatan *heatflux* pada seluruh tabung setelah ditinjau tidak ada yang terlalu parah karena aliran yang terbentuk adalah *fully developed* yang memiliki nilai fluks panas yang kecil. Fluks panas tidak boleh melebihi 50% dari fluks nukleat maksimum pada desain, dan 65% untuk kondisi batas maksimal. Batasan ini akan menjaga dinding tabung dalam  $10^{\circ}\text{C}$  ( $18^{\circ}\text{F}$ ) dari air mendidih suhu pada desain, jauh di bawah  $40^{\circ}\text{C}$  ( $72^{\circ}\text{F}$ ) break-over ke pendidihan film Leidenfrost, yang terjadi ketika fluks nukleat maksimum kritis terlampaui. Kondisi dalam pelayanan, kotor akan jauh lebih rendah fluks panas daripada kondisi bersih maksimum meskipun suhu logam dinding tabung lebih tinggi.

Analisis sebab dan akibat kegagalan WHB adalah metode yang mengarah ke daftar semua kemungkinan alasan dan hasil yang terkait dengan kegagalan melihat seluruh sistem WHB dan bukan hanya parameter proses hanya melalui satu tabung WHB. Ini adalah proses yang diarahkan untuk mengungkap faktor penyebab yang mungkin atau mungkin dan manifestasi mereka. Prosesnya mengidentifikasi bagaimana mereka terhubung, tetapi tidak selalu mengarah ke root penyebab, atau penghapusan alasan untuk menghentikan terulangnya masalah.

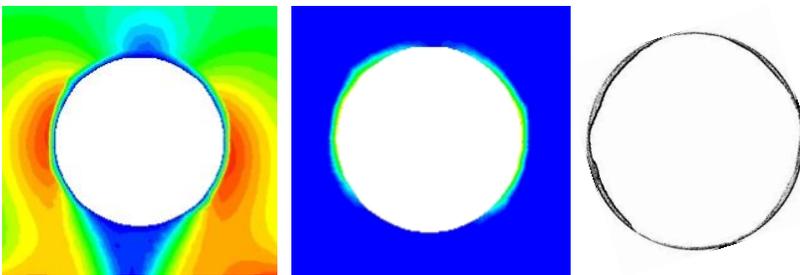


**Gambar 4.18** (a) Profil kecepatan *steam* di permukaan luar pipa

Selain dipengaruhi oleh fluida di dalam pipa, fluida luar pipa (*steam*) juga mempengaruhi terutama profile kecepatan dan

*wall shear stress*. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa kecepatan steam pada luar pipa bisa mencapai kecepatan 45-47 m/s, padahal batas maksimal kecepatan aliran steam yang mengenai permukaan luar pipa antara 15m/s hingga 40 m/s. Jika kecepatan steam berada diatas batas tersebut maka akan terjadi percepatan erosi pada pipa. Hal ini dikarenakan baik lapisan oksida yang terbentuk maupun *base* dari material pipa akan terkikis secara terus-menerus dengan kecepatan tersebut.

Selain itu pada bagian pipa yang terkena *steam* kecepatan tinggi akan memiliki temperature yang lebih rendah daripada bagian yang terkena aliran diam. Hal ini dikarenakan panas pipa pada aliran yang berjalan akan dengan cepat terbawa sedangkan panas pada daerah aliran diam akan terperangkap. Dampak dari aliran steam ini akan terbentuknya lapisan oksida yang tebal pada daerah dengan aliran diam dikarenakan panas dari dalam pipa sulit untuk keluar. Sedangkan sebaliknya, pada daerah yang terkena aliran cepat, lapisan oksida tidak sempat terbentuk karena nilai temperature pada pipa bagian tersebut akan turun dengan cepat. Namun meskipun menurunkan temperature dengan cepat, aliran cepat *steam* tersebut akan menghasilkan *wall shear stress* lebih tinggi dari bagian lain. Profil dari kecepatan dan *wall shear stress* dapat dilihat pada gambar dibawah.



**Gambar 4.19** (a) Profil kecepatan *steam* ; (b) profil *wall shear stress steam* ; (c) beda ketebalan

Setelah dilakukan seluruh pengujian, tidak ditemukan keanehan pada hasil mikrostruktur dan kekerasan. Mikrostruktur pada bagian yang terkikis dengan bagian yang normal tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan baik pada bagian dalam, tengah, maupun luar. Pada hasil kekerasan, nilai kekerasan yang didapatkan masih sesuai standar material pipa. Perbedaan pada pipa yang terkikis dengan pipa yang normal hanya pada trendnya, dimana pada pipa normal nilai kekerasan pada semua titik cenderung menyebar merata dan untuk pipa yang terkikis memiliki trend nilai yang semakin keluar nilai kekerasan semakin kecil. Untuk hasil XRD ditemukan Magnesium pada bagian luar yang diduga terbawa dari aliran steam. Untuk hasil SEM-EDS sendiri dapat dilihat terbentuknya lapisan oksida yang sangat tebal akibat kondisi pipa bagian dalam maupun luar.

Dari kondisi diatas dapat disimpulkan bahwa terkikisnya permukaan luar pipa pada daerah tertentu dikarenakan pada daerah tersebut belum terbentuk lapisan oksida (karena pendinginan) namun hal itu juga yang menyebabkan *wall shear stress* langsung mengikis permukaan pipa. Hal ini terbukti dari tidak ditemukannya lapisan oksida pada bagian yang mengalami penipisan parah. Sedangkan pada daerah yang lain terbentuk lapisan oksida yang tebal karena panas pada pipa tertahan oleh aliran steam diam. Dapat disimpulkan bahwa penipisan diakibatkan adanya oksidasi dan korosi erosi.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan, maka hasil dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Dari hasil simulasi aliran *flue gas*, terdapat area yang terpapar temperature *flue gas* yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh *backflow* akibat adanya perbedaan diameter dalam antara *ferrule* dengan pipa. Pada area ini akan terbentuk lapisan oksida yang tebal dan mengakibatkan terkikisnya permukaan luar.
2. Dari hasil simulasi aliran steam, terdapat area yang terkena aliran *steam* yang tinggi. Kecepatan steam pada titik ini sebesar 47-50 m/s dimana sudah melebihi batas kecepatan maksimum steam yang diperbolehkan yaitu sebesar 40 m/s sehingga mengakibatkan erosi yang sangat cepat.
3. Area yang terkena aliran dengan kecepatan tinggi tersebut juga merupakan area yang terkena *wall shear stress* dengan nilai yang besar sehingga akan mengikis permukaan pipa.
4. Dari hasil analisa lapisan oksida yang terbentuk dibagian luar sangat berbeda jauh dengan bagian dalam. Ditemukan juga unsur O yang tinggi pada lapisan oksida bagian luar. Selain itu ada unsur magnesium yang ditemukan akibat dibawa oleh aliran steam.
5. Dari berbagai analisa yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa mekanisme penipisan dari WHB tube secara garis besar terjadi akibat *erosion corrosion* dan *corrosion* (oxidation)

## 5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran agar kegagalan atau penipisan pada primary superheater dapat dicegah, yaitu:

1. Melapisi (coating) pipa dengan lapisan anti korosi untuk mencegah oksidasi terjadi.
2. Panjang *ferrule* pada pipa inlet ditambah hingga minimal sampai temperature *flue gas* tidak terlalu tinggi
3. Memasang pelindung (*shield*) pada permukaan luar pipa terutama pada bagian yang terkena *wall shear stress* dan kecepatan *steam* tinggi.
4. Melakukan pengecekan berkala untuk menjaga temperature *inlet* tidak melonjak tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Ganapathy, 2014. **Steam Generators and Waste Heat Boilers For Process and Plant Engineers**
- [2] Fontana, Mars G. 1987. **Corrosion Engineering, 3rd edition**. New York: McGraw – hill Book Co.
- [3] Incropera, Frank P., De Witt, David P. 2002. **Fudamentals of Heat and Mass Transfer, Seventh Edition**. New York: John Willey & Sons, Inc.
- [4] William D. Callister, Jr. 2007. **Material Science and Engineering**. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- [5] **Uniform corrosion**.  
<https://www.intechopen.com/books/appliedstudiesofcoastal-andmarineenvironments/computatonalanalysis-ofsystem-anddesign-parameters-ofelectrodepositionfor-marineapplications>
- [6] **Erosion corrosion**.  
<http://www.doyouknow.in/Articles/Engineering/Erosion-Corrosion-Atmospheric-Corrosion.aspx>
- [7] **Stress corrosion cracking**.  
<http://faculty.kfupm.edu.sa/ME/hussaini/Corrosion%20Engineering/04.06.03.htm>
- [8] **Hydrogen embrittlement**.  
<https://www.slideshare.net/sidheshwar1988mm24/hydrogen-embrittlement-causes-effects-prevention>  
Diakses tanggal 12 April 2018
- [9] ASM Handbook Committee. **ASM Metals Handbook Vol. 11 : Failure Analysis and Prevention**. Ohio : ASM International. 2002
- [10] Jones, Denny A. 1992. **Principles and Prevention of Corrosion 2<sup>nd</sup> Edition**. USA : Pearson Education.
- [11] Pierre R. Roberge, Ph. D, P. Eng, 1976.

- Corrosion Engineering Principles and Practice:**  
New York : McGraw – Hill Book Co.
- [12] **Wijayanto, Sanjaya Okky dan Bayuseno, A. P.**  
“*Analisis Kegagalan Material Pipa Ferrule Nickel Alloy n06025 Pada Waste Heat Boiler Akibat Suhu Tinggi Berdasarkan Pengujian : Makrografi dan Kekerasan*”. Tahun 2014
- [13] **Karakteristik keausan lapisan baha karbon rendah**  
[https://www.researchgate.net/publication/314724741\\_KARAKTERISTIK\\_KEAUSAN\\_LAPISAN\\_KARBURASI\\_BAJA\\_KARBON\\_RENDAH](https://www.researchgate.net/publication/314724741_KARAKTERISTIK_KEAUSAN_LAPISAN_KARBURASI_BAJA_KARBON_RENDAH)
- [14] <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.7335-13CrMo4-5-Chromium-Molybdenum--Steel>
- [15] [https://www.borsig.de/uploads/tx\\_bcpageflip/BPHE\\_Process\\_Gas\\_Waste\\_Heat\\_Boilers\\_with\\_Thin\\_Flexible\\_Tubesheet\\_Design\\_E\\_BORSIG.pdf](https://www.borsig.de/uploads/tx_bcpageflip/BPHE_Process_Gas_Waste_Heat_Boilers_with_Thin_Flexible_Tubesheet_Design_E_BORSIG.pdf)
- [16] <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node29.html>
- [17] <https://www.bicmagazine.com/resources/sponsored-content/ceramic-technologies/>
- [18] Makhlof, Abdel S.H dkk. 2016.  
“*Handbook of Materials Failure Analysis With Case Studies from the Chemicals, Concrete, and Power Industries*”. United Kingdom: Elsevier Ltd.

## BIODATA PENULIS



Abdul Jabbar Ijazurrohman lahir di Malang pada 7 Oktober 1996, merupakan anak ketiga dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK/BA Restu (2001-2003), MIN Malang 1 (2003-2009), MTsN Malang 1 (2009-2012), MAN 3 Malang (2012-2015), dan menempuh perkuliahan di Departemen Teknik Mesin FTI ITS. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berorganisasi. Organisasi yang diikuti oleh penulis

antara lain: Sie Sponsorship ITS Team Sapuangan (2017-2018), Asisten Dirjen Pengembangan Tingkat, Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa BEM ITS Dasar (2018-2019). Penulis juga aktif dalam mengikuti kepanitiaan dalam berbagai acara seperti Ketua Gerigi ITS 2017, Koordinator logistik KMHE 2017, dan lain-lain.

Moto hidup penulis “*Hasbunallahu Wa Ni'mal Wakil*” menjadi pengingat bagi penulis untuk selalu bersyukur dan melakukan yang terbaik dalam segala hal yang dihadapi oleh penulis. Semua pesan atau informasi yang hendak disampaikan kepada penulis dapat dikirim melalui email: [ijazurrohman@gmail.com](mailto:ijazurrohman@gmail.com).