



TUGAS AKHIR - TM 184835

**ANALISIS KEBOCORAN WATERWALL TUBE
PADA CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER**

**GREGORIUS ROMARIO WICAKSONO SINAGA
NRP. 02111240000161**

**Dosen Pembimbing :
Suwarno, ST, M.Sc, Ph.D.**

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

(Halaman sengaja dikosongkan)



TUGAS AKHIR - TM 184835

**ANALISIS KEBOCORAN WATERWALL TUBE
PADA CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER.**

**GREGORIUS ROMARIO WICAKSONO SINAGA
NRP. 0211124000161**

**Dosen Pembimbing :
Suwarno, ST, M.Sc, Ph.D.**

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

(Halaman sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TM 184835

***ANALYSIS OF WATERWALL TUBE LEAKAGE
IN CIRCULATING FLUIDIZED BED (CFB)
BOILER***

**GREGORIUS ROMARIO WICAKSONO SINAGA
NRP. 0211124000161**

**Supervisor :
Suwarno,ST, M.Sc, Ph.D**

**DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND
SYSTEM ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020**

(Halaman sengaja dikosongkan)

**ANALISIS KEBOCORAN WATERWALL TUBE
PADA CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Gregorius Romario Wicaksono Sinaga

Nrp. 02111240000161

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Suwarno, ST, M.Sc, Ph.D (Pembimbing)
NIP. 198005202005011003
2. Fahmi Mubarak, ST, M.Sc, Ph.D (Penguji 1)
NIP. 197801152003122002
3. Ari Kurniawan Saputra, ST, MT (Penguji 2)
NIP. 198604012015041001
4. Witantyo, Ir, M.Eng, Sc (Penguji 3)
NIP. 196303141988031002



(Halaman sengaja dikosongkan)

ANALISIS KEBOCORAN WATERWALL TUBE PADA CIRCULATING FLUIDIZED BED (CFB) BOILER

Nama Mahasiswa : Gregorius Romario Wicaksono
Sinaga
NRP : 02111240000161
Jurusan : Teknik Mesin, FTI
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., MSc., PhD

Abstrak

Boiler memiliki peranan penting pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Kesalahan pada satu komponen dapat menyebabkan kerugian yang signifikan baik untuk pihak perusahaan, pihak konsumen, dan juga pihak Negara. Kegagalan pada boiler yang sering terjadi ialah pada pipa-pipa dikarenakan lingkungan kerja yang cukup ekstrim dan kinerja pipa yang terus-menerus. Pada kasus ini, pipa yang mengalami kegagalan adalah waterwall tube. Waterwall memiliki peranan penting pada boiler yaitu untuk mengubah feedwater (liquid) menjadi steam (gas).

Waterwall mengalami kegagalan yang berawal dari penipisan hingga mengalami kebocoran. Dari hasil pengujian komposisi diketahui bahwa waterwall tube ini merupakan alloy steel dengan tipe ASTM A192. Tube yang diambil pada penelitian ini adalah tube yang mengalami penipisan ketebalan secara kasat mata dan crack. Hasil pengukuran diameter dalam menunjukkan adanya perubahan bentuk pada tube yang sudah tidak sesuai dengan design awal. Pada pengukuran ketebalan, menunjukkan adanya penipisan pada dinding tube. Pada pengujian kekerasan diketahui bahwa daerah yang tidak mengalami kebocoran memiliki nilai kekerasan sebesar 138 HV dan pada daerah yang mengalami kebocoran memiliki nilai kekerasan sebesar 133 HV. Pada

pengujian EDS deposit tube 24 ditemukan kandungan zinc (Zn) yang tidak sesuai dengan spesifikasi feedwater.

Pada pengamatan mikrostruktur, menunjukkan tube mengalami spheroidizing. Tube 22 memiliki fasa ferrite-pearlite dan pada tube 24 memiliki struktur mikro berupa ferrite dan pearlite yang sudah terdegradasi menjadi spheroidized graphite. Pembentukan spheroidized graphite diakibatkan oleh peningkatan temperature yang berkisar antara 650⁰ C – 700⁰ C. Peningkatan tekanan pada waterwall tube juga meningkat seiring meningkatnya temperature pada waterwall tube. Adanya peningkatan temperature dan tekanan dapat menyebabkan terjadinya reaksi yang dapat mengikis dinding waterwall tube. Dinding waterwall tube yang telah terkikis tidak mampu menahan kondisi tekanan yang tinggi sehingga pada akhirnya mengalami leakage.

Kata kunci : analisa kegagalan, waterwall tube, leakage, overheating, spheroidizing

ANALYSIS OF WATERWALL TUBE LEAKAGE IN CIRCULATING FLUIDIZED BED (CFB) BOILER

Name : Gregorius Romario Wicaksono Sinaga
NRP : 02111240000161
Department : Mechanical Engineering
Supervisor : Suwarno, ST., MSc., PhD

Abstract

Boiler have an important role in steam power plants. Failure in one component can cause significant losses both for the company, the consumer, and the state. Failures in boiler often happens in the pipes due to the extreme work environment and continuously performance of the pipe. In this case, a pipe that experienced failure is waterwall Waterwall has an important role to heat up the feedwater (liquid) to steam (gas).

The crack is caused by the tube thinning. The composition test shows that the waterwall tube is an alloy steel with ASTM A192 type. The tube that has been investigated on this research is the tube that experienced thinning and cracks. The results of the inner diameter measurement shows that the tube has changes in shape according to the initial design. The results of thickness measurements shows that the tube experienced thinning. The results of hardness test shows the area that did not experienced crack, had hardness number of 138 HV and the ones experienced crack had hardness number of 133 HV. The results of EDS test on tube 24's deposit shows that the tube is containing zinc (Zn) which did not meet the feedwater specifications.

The results of microstructure inspection shows that the material is experienced spheroidizing. Tube 22 has a ferrite-pearlite phase and the cracked tube has a microstructure in the form of ferrite and pearlite that has been degraded to spheroidized graphite. Spheroidized occurs due to increased temperature from 650 – 700⁰C. The increase in temperature on waterwall tube comes

with temperature. An increase in temperature and pressure causing a reactions that can erode the wall of waterwall tube. The eroded wall is unable withstand the condition of high pressure so the wall experiences leakage.

Keyword : Failure analysis, waterwall tube, leakage, overheating, spheroidizing

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan yang telah memberikan berkat, perlindungan, serta pengarahan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “*Analisis Kebocoran Waterwall Tube Pada Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*”. Penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari peran dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan terselesaikannya tugas akhir ini penulis ingin menyampaikan terimakasih pada:

1. Kedua orang tua penulis, Cornelius Togap Sinaga dan Maria Theresia Runia Arif yang selalu memberikan semangat dan doa kepada penulis. Tanpa dukungan dari mereka penulis tidak dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Suwarno, ST., MSc., PhD, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan pencerahan, pembelajaran, dan bimbingan kepada penulis dengan penuh kesabaran sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Ari Kurniawan Saputra, ST, MT; Bapak Fahmi Mubarak, ST, M.Sc, Ph. D; dan Bapak Witantyo. Ir, M. Eng. Sc selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktunya serta memberikan saran kepada penulis untuk tugas akhir ini.
4. Bapak Ary Bachtiar Krishna Putra ST, MT, Ph.D selaku dosen wali penulis yang telah banyak memberikan bimbingan dan meningkatkan moril penulis selama ini.
5. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS yang telah mencurahkan segala tenaga dan pikiran dalam rangka proses akademik dan non-akademik selama penulis menempuh pendidikan sarjana di Departemen Teknik Mesin

Dengan selesainya laporan tugas akhir ini penulis menyadari bahwa penelitian tugas akhir ini belum sempurna sehingga penulis

sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk perbaikan demi kesempurnaan augas akhir ini. Semoga tugas akhir ini memberikan manfaat dan dapat menambah wawasan keilmuan bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

Daftar Isi

Abstrak	ix
KATA PENGANTAR	xiii
Daftar Isi	xv
Daftar Gambar	xviii
Daftar Tabel	xxiv
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah dan Asumsi	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II	6
DASAR TEORI	6
2.1. Penilitan Terdahulu	6
2.2. Boiler	12
2.3 Circulating Fluidized Bed Boiler	13
2.3.1. Sirkulasi Batubara pada CFB Boiler PLTU	16
2.4 Pengaruh Kondisi Operasi Kerja terhadap Material	20
2.5 Fenomena <i>Creep</i> Temperatur Tinggi	20

2.6	Kegagalan Material Boiler.....	25
2.7	Mekanisme Kegagalan pada <i>Water-Wall Tube</i> .	27
2.8	Overheating	29
BAB III.....		36
METODOLOGI PENELITIAN.....		36
3.1	Diagram Alir Penelitian	36
3.2.	Prinsip Kegagalan.....	37
3.3.	Fishbone Diagram	38
3.4	Peralatan Penelitian.....	39
3.5	Langkah Penelitian.....	41
BAB IV		45
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		45
4.1	Kondisi Operasi Kerja <i>Waterwall</i>	45
4.2	Analisa Visual dan Pematangan Spesimen <i>Waterwall Tube</i>	47
4.3	Pengukuran Dimensi pada Spesimen <i>Waterwall Tube</i> .	51
4.4	Pengamatan Komposisi Kimia	54
4.5	Pengujian Metalografi	55
4.6	Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) dan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)	68
4.7	Pengujian Mikro Hardness.....	71
4.9	Pembahasan	75
BAB V		78
KESIMPULAN.....		78

Daftar Pustaka	79
LAMPIRAN	81
LAMPIRAN A	82
PEMBAGIAN SPESIMEN WATERWALL TUBE	82
LAMPIRAN B	83
MIKROSTRUKTUR PADA SETIAP BAGIAN TUBE.....	83

Daftar Gambar

Gambar 1. 1 Sampel membrane waterwall tube yang dianalisis.....	3
Gambar 2. 1 Kegagalan waterwall tube pada penelitian Patel Sunny Sanjay.....	7
Gambar 2. 2 Gambar pengamatan mikro pada penelitian Patel Sunny Sanjay.....	9
Gambar 2. 3 Kegagalan tube pada penelitian S.W.Liu	10
Gambar 2. 4 Sampel yang digunakan pada penelitian	11
Gambar 2. 5 Gambar pengamatan mikro pada penelitian S.W.Liu	12
Gambar 2. 6 Skema Circulating Fluidized Bed PLTU.....	14
Gambar 2. 7 Kurva Creep	22
Gambar 2. 8 Ilustrasi kurva creep berdasarkan perbedaan material dengan parameter temperature dan juga	23
Gambar 2. 9 Diffusional Creep	24

Gambar 2. 10 Dislocation Creep	25
Gambar 2. 11 Perilaku creep material baja berdasarkan evolusi cavities	27
Gambar 2. 12 Pecah thick lip dan struktur mikro permukaan akibat overheating	31
Gambar 2. 13 Kegagalan thin lip rupture.....	33
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian	37
Gambar 3. 2 Fishbone diagram untuk kebocoran pada waterwall tube	39
Gambar 4. 1 Skema Operasional Waterwall	46
Gambar 4. 2 Operasional Waterwall	46
Gambar 4. 3 Crack pada tube 24 di waterwall	47
Gambar 4. 4 Perubahan bentuk tube pada waterwall tube 22 dengan tube 24	48
Gambar 4. 5 Pemotongan pada tube 24.....	49

Gambar 4. 6 Pengambilan sampel pada waterwall tube.....	50
Gambar 4. 7 Pembagian letak pengambilan data diameter dalam pada tube 22 sampai tube 24f	52
Gambar 4. 8 Pembagian titik pengambilan ketebalan potongan tube 24	53
Gambar 4. 9 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 22	56
Gambar 4. 10 Pengamatan spesimen tube 22 dengan perbesaran 50x.....	56
Gambar 4. 11 Spesimen tube 24a	
Gambar 4.11 Spesimen tube #24a	57
Gambar 4. 12 Pengamatan spesimen tube 24a dengan perbesaran 20x.....	57
Gambar 4. 13 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24b	58

Gambar 4. 14 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24b di titik 1 dengan perbesaran 50x	58
Gambar 4. 15 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24b di titik 2 dengan perbesaran 50x	59
Gambar 4. 16 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24c	59
Gambar 4. 17 Pengujian metalografi pada spesimen tube 2c di titik 1 dengan perbesaran 50x	60
Gambar 4. 18 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24c di titik 2 dengan perbesaran 20x.....	60
Gambar 4. 19 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24d.....	61
Gambar 4. 20 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24d di titik 1 dengan perbesaran 100x	61
Gambar 4. 21 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24d di titik 2 dengan perbesaran 50x	62
Gambar 4. 22 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24e	62

Gambar 4. 23 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24e di titik 1 dengan perbesaran 100x.....	63
Gambar 4. 24 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24e di titik 2 dengan perbesaran 50x.....	64
Gambar 4. 25 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24f.....	64
Gambar 4. 26 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24f di titik 1 dengan perbesaran 20x	64
Gambar 4. 27 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24f di titik 2 dengan perbesaran 100x	65
Gambar 4. 28 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24g.....	65
Gambar 4. 29 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24g di titik 1 dengan perbesaran 50x	66
Gambar 4. 30 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24g di titik 2 dengan perbesaran 50x	66
Gambar 4. 31 Spheroidizing pada diagram fasa Fe-Fe ₃ C .	67

Gambar 4. 32 Hasil pengujian EDS pada serbuk kerak pada bagian belakang tube yang mengalami kegagalan 69

Gambar 4. 33 Hasil pengujian EDS pada deposit header waterwall tube 70

Gambar 4. 34 Pembagian titik pengambilan uji mikrohardness pada spesimen 1,2, dan bagian belakang tube yang mengalami crack..... 73

Daftar Tabel

Tabel 2. 1 Spesifikasi boiler pada PLTU PT. PLN berdasarkan performance test pada tahun 2017	15
Tabel 2. 2 Spesifikasi air pada PLTU PT.PLN	18
Tabel 2. 3 Temperatur Flue Gas hasil performance test pada tahun 2017.....	19
Tabel 3. 1 Tabel prinsip kegagalan	37
Tabel 4. 1 Operasi kerja waterwall.....	45
Tabel 4. 2 Hasil pengukuran diameter dalam.....	52
Tabel 4. 3 Data ketebalan tube	53
Tabel 4. 4 Komposisi kimia hasil pengujian	54
Tabel 4. 5 Hasil pengujian mikrohardness pada spesimen.	74

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan listrik pada era sekarang merupakan kebutuhan primer bagi masyarakat Indonesia, setiap orang menggunakannya untuk berbagai kepentingan, mulai dari sekedar penerangan sampai untuk usaha baik level kecil maupun level besar. Ini menunjukkan bahwa seiring berjalannya waktu, kebutuhan listrik di Indonesia akan semakin meningkat. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), hingga 2018 masih terdapat 1,7% wilayah yang belum teraliri listrik. Namun, Menteri ESDM, Ignasius Jonan menyatakan per Juli 2019 rasio elektrifikasi telah mencapai 98,8% [Databoks Katadata, Agustus, 2019]. Namun, pada kenyataannya ketersediaan listrik masih rendah. Salah satu penyebab ketersediaan listrik yang masih rendah adalah pembangkit listrik tidak dapat beroperasi sebagaimana mestinya sehingga tidak dapat memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. PT.PLN (Persero) sebagai Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang mengurus semua aspek kelistrikan di Indonesia, memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia. Melalui program percepatan pembangunan listrik tahap 10.000 MW, PT.PLN (Persero) menjawab kebutuhan listrik di Indonesia dengan membangun Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berlokasi di Sulawesi Utara yang menggunakan batu bara sebagai bahan utamanya.

PLTU Amurang memiliki lima komponen penting untuk menghasilkan listrik, yaitu boiler, turbin, generator, transformator dan gardu induk. Boiler memiliki fungsi untuk memanaskan air yang berada di dalam pipa sehingga menghasilkan steam yang digunakan untuk memutar poros turbin. Putaran turbin yang berupa energi mekanik diteruskan ke generator untuk diubah menjadi energi listrik. Transformator memiliki fungsi untuk mengatur

tegangan listrik yang dihasilkan dari putaran turbin dan dilanjutkan ke gardu induk untuk didistribusikan ke konsumen. Boiler yang digunakan pada PLTU Amurang bertipe *Circulating Fluidized Bed (CFB)*.

Kinerja pembangkit listrik sangat rentan mengalami kegagalan dan kerusakan dikarenakan karena kinerjanya yang terus menerus dan juga temperature operasi yang sangat tinggi, terutama pada boiler. Kerusakan komponen pada boiler dapat memberikan pengaruh negatif apabila dilihat dari berbagai aspek. Salah satunya ialah listrik yang dihasilkan PLTU tidak sesuai dengan kinerja PLTU yang optimal. Suatu kegagalan dapat ditelusuri penyebabnya, kemudian dianalisis, dan dapat ditemukan solusi untuk meminimalisir maupun pencegahan terhadap kegagalan tersebut. Dalam kasus ini, ditemukan kegagalan pada *waterwall tube* seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.1, yang mengalami kebocoran disertai dengan perubahan bentuk diseluruh permukaan hingga melebihi batas toleransi. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian analisa kegagalan untuk menghindari terjadinya kasus kegagalan yang serupa di kemudian hari.



Gambar 1. 1 Sampel membrane waterwall tube yang dianalisis

1.2 Perumusan Masalah

Adapun masalah dari laporan analisis kegagalan ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Apa penyebab utama terjadinya kebocoran pada *waterwall tube* yang terdapat pada *Circulating Fluidized Bed boiler*?
2. Bagaimana mekanisme kebocoran pada *waterwall tube* yang terdapat pada *Circulating Fluidized Bed boiler*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari analisis kegagalan ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui penyebab utama terjadinya kebocoran pada *waterwall tube* yang terdapat pada *Circulating Fluidized Bed* boiler.
2. Mengetahui mekanisme kebocoran pada *waterwall tube* yang terdapat pada *Circulating Fluidized Bed* boiler.
- 3.

1.4 Batasan Masalah dan Asumsi

Beberapa batasan masalah yang digunakan agar penelitian dapat berjalan dengan baik adalah sebagai berikut:

1. Aliran dalam tube mempunyai temperatur konstan.
2. Bentuk aliran fluida adalah turbulen
3. Desain awal yang digunakan sudah sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.
4. Proses terbentuknya lapisan oksida tidak termasuk bahan penelitian.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi perusahaan dan pembangkit, dengan adanya penelitian mengenai analisa kegagalan ini, dapat dijadikan pertimbangan dalam pelaksanaan operasi dan diharapkan menjadi solusi untuk menghadapi kegagalan yang serupa di masa yang akan datang.
2. Bagi kalangan akademisi, dengan adanya penelitian mengenai analisa kegagalan ini, diharapkan dapat menjadi tambahan pengetahuan dan dasaran untuk mengatasi kejadian serupa.

3. Terjalin hubungan baik antara institusi pendidikan dengan perusahaan yang terlibat.

(Halaman sengaja dikosongkan)

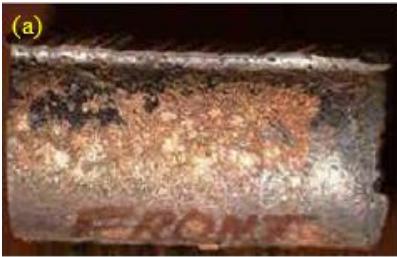
BAB II

DASAR TEORI

2.1. Penilitan Terdahulu

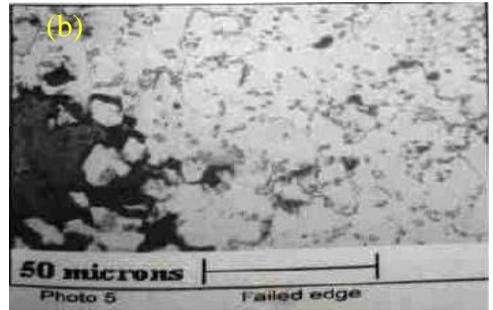
Penelitian mengenai kegagalan pada *waterwall tube* sudah banyak dilakukan sebelumnya. Penelitian-penelitian tersebut dapat dijadikan acuan untuk pengambilan data dan dasar teori dalam menemukan penyebab kegagalan pada *waterwall tube*. Berikut penelitian penelitian terdahulu yang dapat dijadikan acuan:

Patel Sunny Sanjay, Dr. R. K. Mandloi, “*A Failure Analysis and Remaining Life Assesment of Boiler Water Wall Tube*” pada tahun 2016. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kegagalan pada *SA210GrC waterwall tube* dengan inspeksi visual pada tube, pengukuran ketebalan pada tube, pengujian komposisi kimia, pengujian kekerasan, dan analisis mikro. Menurut laporan Patel dan Dr. Mandloi, tube mengalami kegagalan berupa pembengkakan, dan retakan akibat creep disepanjang permukaan luar tube yang terletak di dekat *Soot Blower*. Pengukuran ketebalan tube dilakukan pada beberapa *waterwall tube* yang berada pada tingkatan yang sama dengan tube yang mengalami kegagalan. Pemeriksaan analisis mikroskopik dilakukan pada daerah yang mengalami kegagalan dan daerah yang agak jauh dari tube yang mengalami kegagalan untuk mengetahui akar penyebab dan mekanisme kegagalan pada *waterwall tube*. Patel dan Dr. Mandloi juga mengambil data yang relevan dari beberapa bulan sebelum terjadinya kegagalan untuk mengidentifikasi alasan kegagalan (Sanjay & Mandloi, 2016). Bentuk kegagalan *waterwall tube* pada penelitian yang dilakukan Patel Sunny Sanjay dan Dr. R. K. Mandloi, dapat dilihat pada gambar 2.1.



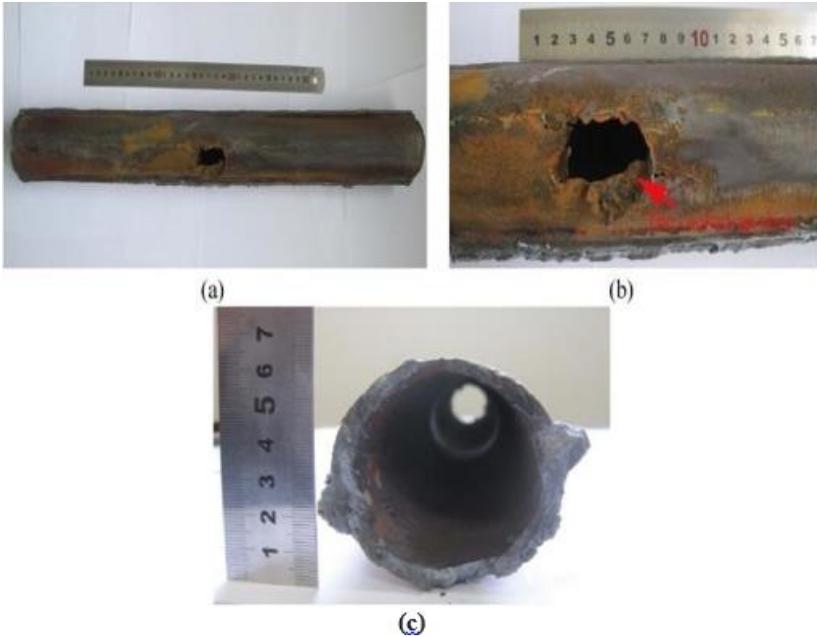
Gambar 2. 1 Kegagalan waterwall tube pada penelitian Patel Sunny Sanjay (a) waterwall tube sebelum mengalami kegagalan (b) pembengkakan pada waterwall tube (c) adanya kebocoran logam dari tube (d) adanya pembengkakan di 2 lokasi pada waterwall tube (e) adanya deposit korosi di permukaan tube dibagian yang mengalami pembengkakan. (Sanjay & Mandloi, 2016)

Hasil analisis dari penelitian pada *SA210GrC waterwall tube* ialah pada pengukuran ketebalan tube terjadi penipisan tube sebesar 1.10 mm dan di bagian yang berlawanan menunjukkan adanya sejumlah peningkatan ketebalan yang diakibatkan oleh *layer* yang dihasilkan dari kebocoran logam. Pada pengujian komposisi kimia didapatkan bahwa komposisi kimia pada sampel sudah melewati batas komposisi kimia tube awal mulanya. Terlihat dari komposisi C dan Si dimana komposisi tube awal memiliki komposisi C sebesar 0.35% dan Si sebesar 0.10% min, sedangkan sampel tube memiliki komposisi kimia C sebesar 0.191% dan komposisi Si sebesar 0.272 %. Pada penelitian kekerasan, Patel dan Dr.Mandloi, menggunakan standard ASTM E92 dan pengujian kekerasan dilakukan dengan diamond indenter 136⁰ dan pembebanan sebesar 10 Kgf. Hasil yang didapat ialah pada daerah yang mengalami pembengkakan didapat lebih lunak dan mudah pecah akibat dari peningkatan temperature. Pada pengamatan mikrostruktur, hasil yang didapat pada bagian ujung sampel yang mengalami kegagalan menunjukkan pertumbuhan dari *grain boundary* dan terlihat terdapat banyak lubang pada lapisan oxide. Pada daerah yang mengalami pembengkakan menunjukkan mikrostruktur berupa *ferrite* dan *pearlite* yang tersebar dengan batas butir karbida. Gambar pengamatan mikro pada penelitian Patel Sunny Sanjay dan Dr. R. K. Mandloi dapat dilihat pada gambar 2.2



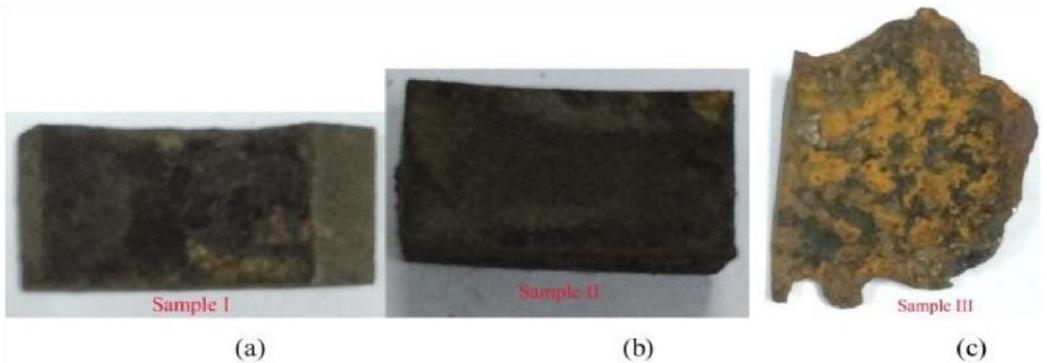
Gambar 2. 2 Gambar pengamatan mikro pada penelitian Patel Sunny Sanjay (a) Kegagalan pada daerah yang mengalami pembengkakan (b) Lapisan oxide terdapat lubang dan patah akibat creep. (Liu & Liu, 2017)

S.W. Liu, dkk, “*Failure Analysis of the Boiler Water-Wall Tube*” pada tahun 2017. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kegagalan pada *waterwall* tube yang dibuat dengan standard 20G yang beroperasi pada tekanan 10.8 MPa dan pada temperature 320⁰C. Analisa dilakukan dengan pengamatan visual, pengujian komposisi kimia, dan analisis mikroskopik. *Waterwall* tube mengalami kegagalan berupa lubang kecil sepanjang 30 mm dan lebar 17 mm setelah 8 tahun beroperasi. Kebocoran *waterwall tube* pada penelitian S.W.Liu, dapat dilihat pada gambar 2.3



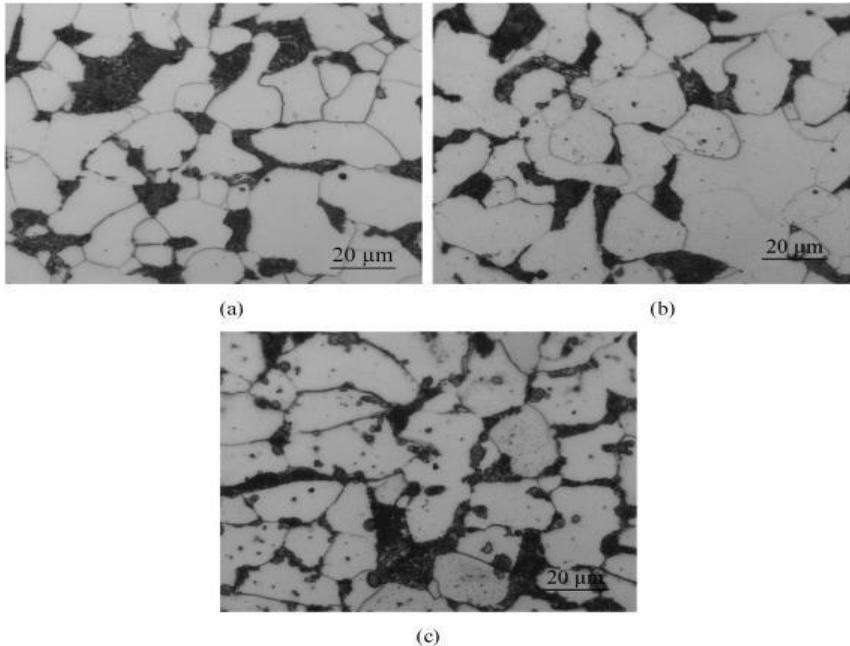
Gambar 2. 3 Kegagalan tube pada penelitian S.W.Liu (a) Tube yang mengalami kegagalan. (b) Perbesaran tube yang mengalami kegagalan (c) Bagian dalam tube yang mengalami kegagalan. (Liu & Liu, 2017)

Diambil 3 sampel dari bagian yang berbeda, yaitu sampel I diambil pada sisi yang menghadap pengapian, sampel II diambil pada bagian belakang tabung, dan sampel III diambil pada bagian sekitar lubang. Pengambilan sampel dapat dilihat pada gambar 2.4



Gambar 2. 4 Sampel yang digunakan pada penelitian S.W.Liu (a) Sampel I (b) Sampel II (c) Sampel III. (Liu & Liu, 2017)

Hasil dari pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan dari sampel dengan standard GB 5310-2008. Pada pengamatan mikroskopik pun hanya terlihat struktur *ferrite-pearlite* dan tidak menunjukkan tanda-tanda degradasi mikrostruktur berupa *pearlite spheroidization*. Namun, terdapat banyak lubang korosi ditemukan pada permukaan dalam tube yang menghadap ke arah pengapian. Pada dinding bagian dalam sisi belakang hampir tidak didapatkan lubang-lubang korosi akibat temperature operasi yang rendah (Liu & Liu, 2017). Gambar pengamatan mikro pada penelitian S.W.Liu, dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Gambar pengamatan mikro pada penelitian S.W.Liu
(a) Struktur mikro pada sampel I (b) Struktur mikro pada sampel II (c) Struktur mikro pada sampel III. (Liu & Liu, 2017)

2.2. Boiler

Boiler atau ketel uap adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap bertekanan dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari hasil pembakaran bahan bakar (*stock*) seperti batu bara, minyak bumi maupun gas pada ruang bakar, dimana air dengan volume besar diubah menjadi uap panas bertekanan dengan volume yang lebih kecil yang selanjutnya digunakan untuk memutar turbin uap. Dalam pembangkit listrik tenaga uap konvensional, *boiler* terdiri dari *furnace* dimana *stock* dibakar, *surface* untuk mengirim panas

dari pembakaran *stock* ke air, dan *space* untuk menampung air yang telah menjadi uap. Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa, maka boiler diklasifikasikan menjadi dua, yaitu:

2.3 Circulating Fluidized Bed Boiler

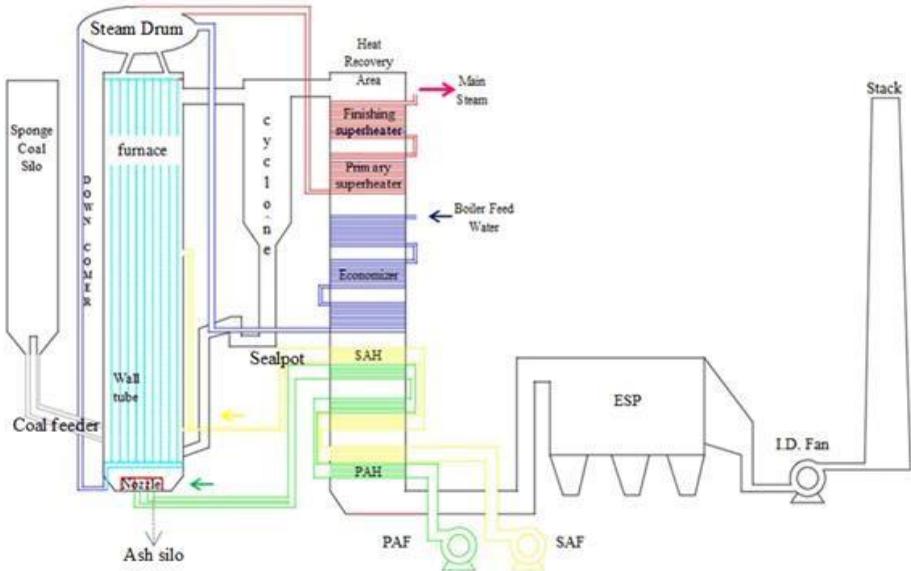
Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler adalah perangkat yang menggunakan konsep *fluidized bed* yang mensirkulasikan bed material pada *furnace* secara kontinu selama proses pembakaran. Bed Material difluidisasikan oleh udara berkecepatan tinggi oleh *primary air fan* melalui *nozzle* pada bagian dasar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

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

Pemanasan awal pada boiler dilakukan dengan melakukan pembakaran menggunakan bahan bakar minyak *High Diesel Speed* (HSD) hingga mencapai suhu 593⁰C kemudian batubara mulai diumpankan. Ketika suhu telah mencapai 789⁰C, bahan bakar minyak HSD akan dinonaktifkan. Udara dengan tekanan dan kecepatan tinggi dihembuskan dari dasar tungku melalui *nozzle-nozzle* dan menembus tumpukan bed material sehingga batubara yang berada diatas bed material tersebut dapat melayang dan terbakar dalam ruang bakar

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Unit 2 menggunakan boiler yang menggunakan bahan bakar utama fosil yaitu batubara dan menggunakan teknologi pembakaran batubara dengan tipe

Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler yang lebih ramah lingkungan. Skema Circulating Fluidized Bed Boiler



Gambar 2. 6 Skema Circulating Fluidized Bed PLTU

Komponen Utama Boiler CFB terdiri dari :

1. *Furnace* yang berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pembakaran bahan bakar batubara. Terdiri dari *Wall tube*.
2. *Cyclone* yang berfungsi untuk mensirkulasikan kembali material pembakaran dari *furnace* untuk dikembalikan ke *furnace*. Disini juga terjadi proses pemisahan batubara yang belum terbakar dan bed material sisa pembakaran untuk disirkulasikan ke *furnace* dan *flue gas* untuk di teruskan ke *Electrostatic presipitator* (ESP) atau *backpass*. Terdiri dari *Cyclone*, *Sealpot*.

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

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

Tabel 2. 1 Spesifikasi boiler pada PLTU PT. PLN berdasarkan performance test pada tahun 2017

Merek Pabrik	China Wastern Power Industrial Co. Ltd
Tipe	CFB (Circulating Fluidized Bed) Boiler DGJ120/9.8-II 1
Serial No.	11ES-SM
Parameter Utama	
Kapasitas Maksimum	120 ton/hour
<i>Main Steam Pressure</i>	8,34 Mpa
<i>Main Steam Temperature</i>	534 °C
<i>Feed Water Temperature</i>	215 °C
<i>Output Waterwall Tube Temperature</i>	350 °C
Efisiensi Boiler	79,32 %
Konsumsi batubara	21.54 ton/hour
Nilai <i>Moisture</i> Batubara	36,67 %
Jenis Bahan Bakar	Lignite

2.3.1. Sirkulasi Batubara pada CFB Boiler PLTU

Batubara yang berada di *sponge coal silo* diteruskan menuju *coal feeder* yang berfungsi mengatur jumlah aliran batubara ke *furnace* (ruang bakar) boiler. Pemanasan awal pada boiler dilakukan dengan melakukan pembakaran menggunakan bahan bakar minyak *High Diesel Speed* (HSD) hingga mencapai suhu 593°C kemudian batubara mulai diumpankan. Ketika suhu telah mencapai 789°C, bahan bakar minyak HSD akan dinonaktifkan. Di dalam *furnace* batubara dicampur dengan bed material (pasir kuarsa, pasir kapur, dan lain-lain), dan udara sehingga terjadi pembakaran yang mengubah air yang ada di *waterwall* menjadi uap [Shaanxi Northwest Power Generation co, 2010].

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

2.3.2. Sirkulasi Air dan Uap pada Boiler CFB PLTU

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

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

Air yang masuk ke *economizer* langsung dialirkan ke *steam drum*. *Steam drum* berfungsi sebagai tempat dimana uap dan air ditampung kemudian akan didistribusikan ke masing-masing saluran yang berupa *tube-tube*. Air yang ada di *steam drum* turun ke *down comer* yaitu saluran turun yang akan mendistribusikan air dan menyalurkannya ke *waterwall tube* yang terletak di dalam *furnace*. Air di dalam *waterwall tube* dipanaskan sampai menjadi uap jenuh dan kemudian masuk kembali ke *steam drum* yang akan memisahkan air dan uap. Air akan masuk kembali menuju *down comer* sementara uap jenuh langsung dialirkan menuju *Primary Superheater* dan *Finishing Superheater* untuk dinaikkan temperatur menggunakan *flue gas*. Keluaran dari *superheater* ini akan langsung masuk ke turbin. Uap bekas keluaran turbin akan dikembalikan menjadi air di kondensor. Air pada PLTU PT.PLN memiliki spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.2

Tabel 2. 2 Spesifikasi air pada PLTU PT.PLN

Item	Unit	Value
PH value		8,8-9,2 copper system
		9,2-9,6 noncopper system
Hardness	ppm	0
Silicon dioxide	ppm	0,02
Hydrazine	ppm	0,02
Oxygen	ppm	0,005
Iron	ppm	0,01
Copper	ppm	0,005
Organism	ppm	0

2.3.3. Sirkulasi Udara dan Gas Buang pada CFB Boiler PLTU

Material yang terbakar lama kelamaan akan naik ke bagian atas *furnace* karena massanya berkurang dan masuk ke *cyclone separator* sehingga *flue gas* dan *fly ash* terpisah dari material. *Flue gas* dan *Fly ash* hasil pembakaran dihisap keluar dari boiler oleh

ID Fan dan dilewatkan melalui *Electric Precipitator (ESP)* yang menyerap 99.5% dari abu terbang dan debu yang dihembuskan ke *stack* atau cerbong asap. Material solid yang belum terbakar masuk kembali ke dalam bagian dalam cyclone menuju *sealpot* dan diinjeksikan kembali menuju ke *furnace* sedangkan *flue gas* menuju ke *heat recovery area* atau *backpass area*. *Flue gas* akan dimanfaatkan kalornya untuk memanaskan uap jenuh pada *Finishing superheater* dan *primary superheater*, memanaskan air pada *economizer*, dan udara pada *tube air preheater*.

Sistem udara pembakaran yang terdapat di CFB boiler disuplai dari dua aliran utama yaitu udara primer dan udara sekunder dan dibantu oleh udara dari *fluidizing air blower*. Kurang lebih terdapat 60% udara pembakaran berasal dari *primary air fan*, 36% dari *secondary air fan*, dan sisanya berasal dari *fluidizing air blower*. Untuk menghisap *flue gas* serta *fly ash* dari ruang bahan bakar menggunakan *Induced draft Fan (I.D. Fan)* yang juga berfungsi untuk menghembuskan sisa-sisa hasil pembakaran menuju *stack* untuk dibuang. Hasil *performance test* temperatur *flue gas* pada tube-tube dapat dilihat pada table 2.3.

Tabel 2. 3 Temperatur Flue Gas hasil performance test pada tahun 2017

<i>Flue Gas</i>	Temperatur (°C)
<i>Input Heat Recovery Area</i>	869,20
<i>Output Finishing Superheater</i>	575,70
<i>Output Primary Superheater</i>	508,30
<i>Output Waterwall Tube</i>	350,00
<i>Output Economizer</i>	328,10
<i>Output Air Preheater</i>	202,30
<i>Output ESP</i>	187,10

2.4 Pengaruh Kondisi Operasi Kerja terhadap Material

Kondisi operasi kerja sangat berpengaruh terhadap sifat material. Kondisi ekstrim dengan temperature tinggi dan tekanan tinggi serta dipengaruhi dengan inspeksi dan maintenance yang kurang dapat menjadi salah satu penyebab kegagalan pada material. Berikut factor-faktor yang menjadi salah satu penyebab kegagalan pada material:

2.4.1 Allowable Stress

Proses desain komponen yang menggunakan acuan mengenai *allowable stress* pada temperature tinggi, biasanya dipakai dalam analisis pengaruh temperature terhadap sifat-sifat material yang actual. Dalam hal ini perlu diketahui pengaruh kondisi operasi berupa tekanan (*internal pressure*) terhadap komponen dimana pada steam pipe, dinding material dapat mengalami tekanan yang berbeda-beda yang menimbulkan tegangan – *hoop stress*. Perhitungan *hoop stress* (σ_h). Berdasarkan tekanan, dapat dirumuskan melalui persamaan

$$\sigma_h = P r / t \quad (1)$$

Dimana:

P = tekanan

R = radius pipa

T = ketebalan dinding

2.5 Fenomena Creep Temperatur Tinggi

Salah satu factor penting dalam menentukan integritas komponen dalam suatu sistem pada aplikasi temperature tinggi adalah perilaku *creep*. Pada proses termal, suatu material yang mengalami deformasi secara lambat dan kontinu dalam fungsi

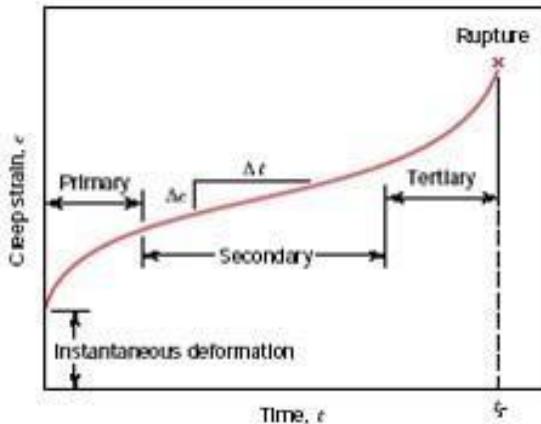
waktu dengan beban atau tegangan konstan, hingga patah, maka perilaku tersebut dinamakan *creep*. Pengaruh temperature pada material logam didasarkan pada T_m , yaitu temperature lebur absolut, dimana ketika diekspos pada rentang $0,3 - 0,6 T_m$ tersebut atau di atasnya, proses *creep* akan terjadi, Sehingga, material yang dioperasikan dalam jangka waktu yang lama dan mendekati temperature leburnya cenderung mengalami *creep*.

Akibat deformasi tersebut, suatu material dapat mengalami perubahan bentuk ataupun perpatahan yang tidak diinginkan, *Creep* dapat terjadi pada suatu cacat/retak yang telah ada, dan dengan adanya konsentrasi tegangan mempercepat perambatan retak yang berakhir pada kegagalan. Perilaku *creep* suatu material dapat diketahui melalui pengujian terhadap suatu specimen yang diberikan pembebanan atau tegangan konstan yang menghasilkan besaran regangan dalam fungsi waktu. Bentuk kurva yang dihasilkan memiliki karakteristik. Kurva *creep* terdiri dari fase-fase yang menunjukkan perilaku material pada kondisi temperature tinggi, yaitu:

- fase *primary*, dimana regangan meningkat dengan laju yang lambat,
- fase *secondary (steady state)*, dimana regangan bergerak dengan laju konstan,
- fase *tertiary*, regangan bergerak dengan laju dipercepat hingga akhirnya patah,
- *rupture ductility*, regangan saat patah

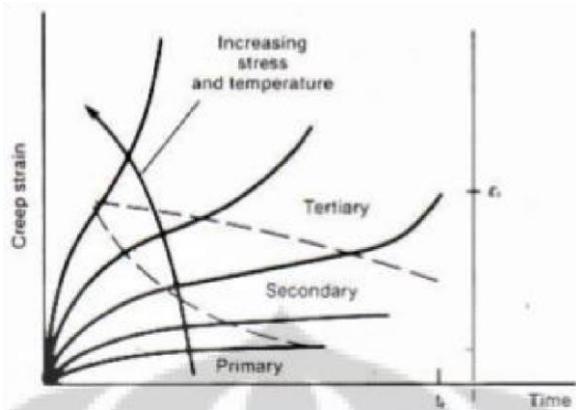
Penjelasan mengenai fase-fase dari *creep* merupakan fenomena mekanis material yang umumnya terjadi apabila diberikan pembebanan, dimana terjadi pengerasan regang pada fase *primary*, dilanjutkan dengan pelunakan pada fase *secondary (steady-state)*, seperti proses *recovery*, *recrystallization*, *strain softening*, dan penuaan presipitasi. Kemudian mulai timbulnya cacat pada fase *tertiary*, seperti *cavity*, *cracking*, dan juga *necking*. Dalam hal ini,

factor pada fase *primary*, cenderung untuk menurunkan laju *creep*, sementara fase lain cenderung menaikkan. Interaksi kesetimbangan diantara fase-fase tersebut akan menentukan bentuk kurva *creep*, dan demikian dapat diketahui karakteristik material pada temperature tinggi. Kurva *creep* dapat dilihat pada gambar 2.7



Gambar 2. 7 Kurva Creep (Neves & Cypriano, 2002)

Pada prinsipnya semakin tinggi kekuatan *creep* suatu material, maka semakin rendah keuletannya, Material yang ulet atau *ductile* memiliki daerah *secondary* yang lebih lebar pada kurva *creep*, dan waktu perpatahan lebih pendek. Sementara material getas atau *brittle* yang didefinisikan dengan kekuatan *creep* tinggi, laju creep pada daerah *secondary* yang lebih sempit, dan perpatahan yang terjadi seketika dengan keuletan rendah. Gambar 2.8. memperlihatkan bentuk kurva *creep* yang dipengaruhi jenis material, temperature, dan tegangan.



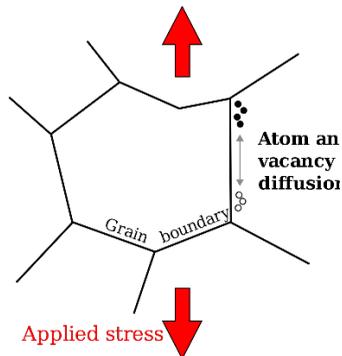
Gambar 2. 8 Ilustrasi kurva creep berdasarkan perbedaan material dengan parameter temperature dan juga. (Neves & Cypriano, 2002)

Dari Gambar 2.8, diperlihatkan pengaruh perubahan temperature dan tegangan, Kenaikan temperature dan tegangan memperpendek fase *primary* dari kurva *creep*, serta menghilangkan fase *secondary*, yang berarti laju *creep* terus meningkat sejak awal hingga patah. Sebaliknya, penurunan temperature dan tegangan menghasilkan kurva dengan semua fase yang ada, dan total elongasi yang terjadi menjadi lebih kecil.

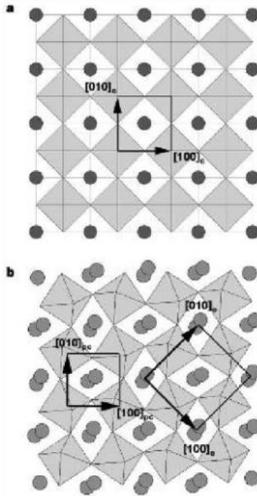
Laju *creep* didefinisikan dalam fungsi tegangan (σ), dan temperature (T). Menurut persamaan Arrhenius, melalui pengujian pembebanan ataupun tegangan yang konstan. Persamaan juga mencakup juga aktivasi energy (Q) yang didapat berdasarkan teori laju reaksi kimia dengan perumusan:

$$\dot{\epsilon} = S \sigma^n \exp\left(\frac{Q}{R}T\right) \quad (2)$$

Karakterisasi *creep* dapat didefinisikan sebagai mekanisme deformasi ataupun komponen regangan. Dalam mekanisme deformasi, proses *creep* yang terjadi pada logam merupakan hasil dari pergerakan dislokasi. Namun berbeda pada kondisi biasa, dimana pergerakan dislokasi tidak tergantung terhadap waktu dan akan terhambat dengan kehadiran partikel endapan ataupun lainnya. Pergerakan dislokasi pada *creep* tidak terhalan oleh adanya presipitat. Pada kondisi *steady state*, terjadi kesetimbangan antara *strain hardening* dan *recovery* dimana interaksi dislokasi terjadi. Mekanisme terjadinya *creep* ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10



Gambar 2. 9 Diffusional Creep. (Neves & Cypriano, 2002)



Gambar 2. 10 Dislocation Creep. (Neves & Cypriano, 2002)

Perkembangan material dengan ketahanan *creep* umumnya dilihat pada efisiensi termal yang terjadi pada proses, dimana efisiensi tinggi dapat dicapai dengan menaikkan temperature dan tekanan operasi, sehingga diperlukan material yang memiliki ketahanan *creep* pada temperature yang lebih tinggi. Pemakaian material dengan grade yang lebih tinggi dapat memiliki ketahanan *creep* yang lebih baik pada temperature yang lebih tinggi.

2.6 Kegagalan Material Boiler

Dalam mempelajari penyebab kegagalan suatu material, diperlukan pemahaman tentang proses hingga terjadinya perpatahan. Secara umum proses terjadinya perpatahan diakibatkan oleh adanya aplikasi tegangan yang tinggi. Namun, perpatahan *intergranular* juga dapat terjadi akibat tegangan rendah pada temperature tinggi.

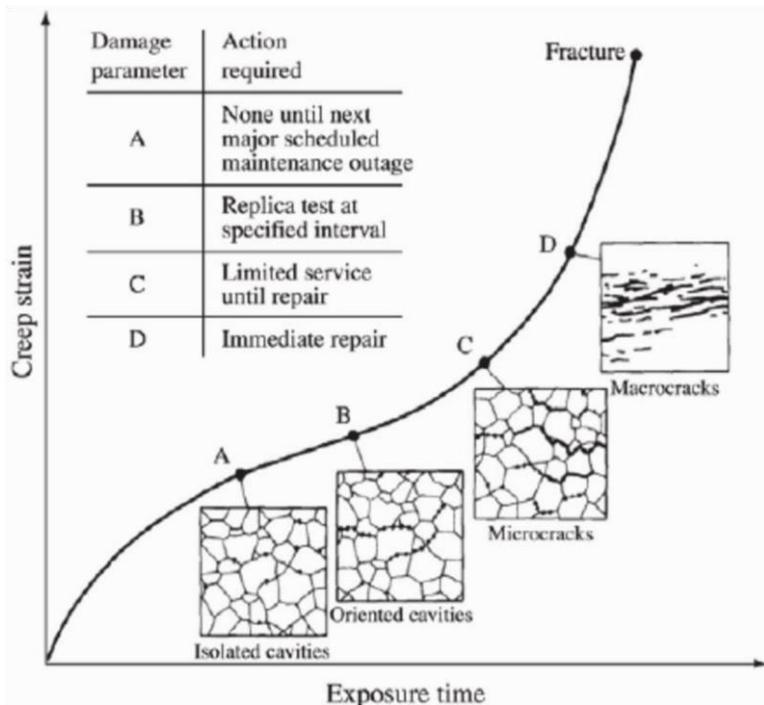
Permasalahan yang sering terjadi pada *steam boiler* adalah *creep*, dan juga oksidasi pada temperature tinggi, disamping permasalahan lainnya. Pada *steam pipe*, dimana mempunyai

bentuk berupa pipa dengan panjang tertentu dapat memiliki konsentrasi tegangan yang dapat menyebabkan *creep*. Walaupun tidak memiliki sambungan (*joint* ataupun *weld*), konsentrasi tegangan dapat juga terjadi pada daerah sepanjang *seam weld* (untuk jenis *seam weld-roll pipe*). Kriteria desain suatu *steam pipe* untuk ketahanan *creep* selalu ditentukan pada saat produksi.

Rupture Ductility dapat menjadi ukuran kekuatan *creep* suatu material, yang disebut *rupture life*. *Rupture life* juga dipengaruhi oleh kemampuan material dalam menjaga efisiensi termal, dalam arti proses perpindahan panas tidak mengalami hambatan akibat pengaruh lingkungan ataupun kondisi operasional. Terhambatnya perpindahan panas yang diakibatkan proses oksidasi pada material logam, dapat menaikkan temperature permukaan yang melebihi batas kemampuan *creep* dimana menyebabkan perpatahan.

Pada prinsipnya, logam akan kehilangan keuletan selama beroperasi pada temperature tinggi. Hal ini ditunjukkan dari fungsi temperature dan laju regangan dimana adanya daerah kritis untuk terjadinya penggetasan. Pada laju regangan tetap, nilai keuletan akan menurun dengan emningkatnya temperature, yang dapat disebabkan oleh pengaruh nukelasi retak pada batas butir (*intergranular crack*) selama proses deformasi.

Seperti dijelaskan sebelumnya, cacat berupa *cavities* yang terdapat pada material sering menjadi indicator dalam menentukan perilaku *creep* suatu material, terutama baja. Menurut *Neubauer* dan *Wedel*, proses evolusi *cavities* dalam perilaku *creep* terjadi dalam empat tahap seperti ditunjukkan pada gambar 2.11. Berdasarkan kurva tersebutm dapat diprediksi waktu terjadinya perpatahan serta tindakan yang harus dilakukan sebelum terjadinya perpataham.



Gambar 2. 11 Perilaku creep material baja berdasarkan evolusi cavities (Neves & Cypriano, 2002)

2.7 Mekanisme Kegagalan pada *Water-Wall Tube*

Water wall tube merupakan sebuah komponen pada boiler yang terdapat di *furnace*, yang memiliki fungsi untuk membawa air pada water tube boiler hingga menjadi uap jenuh kemudian ditampung di steam drum. Pada awalnya, air dialirkan ke *economizer* kemudian ditampung di *steam drum* dalam bentuk liquid. Setelah itu, air yang masih berbentuk liquid dialirkan melalui *down pipe* menuju *water wall tube* untuk dipanaskan hingga menjadi steam dan di tampung di steam drum. Berdasarkan fungsinya, water wall tube memiliki peran sebagai *evaporator* pada boiler. Dikarenakan

kondisi temperatur yang ekstrim, *water wall tube* sering mengalami kegagalan, Kegagalan pada *water wall tube* pun sering mengalami kegagalan. Menurut Rogers, dilaporannya yang berjudul “*Boiler Tube Failure, Prevention and Control.*” pada tahun 2006, mengklasifikasikan mekanisme kegagalan material boiler dalam:

1. *Water/gas-side corrosion*

Water/gas-side corrosion, yaitu proses korosi yang terjadi pada dinding tube bagian dalam yang dipengaruhi karena adanya air atau uap yang ada ditepi tube. Jenis korosi yang terjadi dapat berupa: *caustic corrosion*, disebabkan karena adanya deposit akibat *heat flux*, kerusakan akibat hidrogen, *pitting*, disebabkan karena adanya konsentrasi oksigen dan kontak dengan air .

2. *Fire-side corrosion*

Fire-side corrosion, yaitu proses korosi yang terjadi pada dinding luar tube. Masalah yang timbul dipengaruhi oleh:

1. Hasil pembakaran batu bara tidak sepenuhnya terbakar.
2. Oksidasi yang cepat akibat *overheating*.
3. Terdapat garam cair atau *slag*.

Fire-side corrosion, pada umumnya terjadi pada dinding *tube* yang terpapar langsung dengan hasil pembakaran batu bara sehingga menimbulkan terbentuknya lapisan-lapisan tebal berbentuk *scale* yang akan menyebabkan retakan (*crack*). Reaksi langsung pada *waterwall tube* dengan gas yang mengandung Fe, akan menyebabkan kondisi reduksi pada material *waterwall tube*. Kondisi reduksi ini memiliki dua efek utama pada korosi. Pertama, titik leleh dari setiap *slag* yang diendapkan akan menurun dan meningkatkan kemampuan untuk melarutkan lapisan oksida Kedua, senyawa sulfur gas yang stabil pada kondisi ini memiliki

sifat yang lebih korosif jika dibandingkan dengan senyawa gas yang dihasilkan pada material yang tidak memiliki *scale*.

Overheating yang terjadi dapat dikaitkan dengan desain boiler yang tidak sesuai ketika masalah *slagging* dialami. Perubahan parameter seperti laju umpan batubara untuk mencapai temperature uap yang diinginkan dapat menyebabkan *overheating*. *Overheating* menyebabkan percepatan reaksi oksidasi baik dari permukaan api dan permukaan *steamside* dari *tube* yang akan menyebabkan *scale* yang tebal, keras. Di atas 570°C , (FeO) yang sangat tidak protektif dapat dibentuk pada besi yang mengarah pada timbulnya oksidasi cepat.

3. *Fatigue*

Fatigue atau kelelahan adalah bentuk kegagalan yang terjadi karena beban dinamik yang berfluktuasi dibawah *yield strength* dalam waktu yang cukup lama dan berulang ulang. Fatigue menjadi 90% penyebab kegagalan pemakaian. Mekanisme dari permulaan retak umumnya dimulai dari *crack initiation* yang terjadi di permukaan material yang lemah atau daerah dimana terjadi konsentrasi tegangan di permukaan seperti goresan, lubang, ataupun *notch* akibat dari pembebanan berulang. Selanjutnya adalah penyebaran retak yang berkembang menjadi *microcracks*. Perambatan atau perpaduan dari *microcracks* ini kemudian membentuk *macrocracks* yang akan berujung pada terjadinya *failure*. Maka setelah itu, material akan mengalami apa yang dinamakan pepatahan. Pepatahan terjadi ketika material telah mengalami siklus tegangan dan regangan yang menghasilkan kerusakan permanen.

2.8 Overheating

Apabila air dipanaskan di dalam tube dengan *flux* panas yang aliran panasnya merata (*uniform*) disepanjang tube di bawah kondisi yang menghasilkan keseimbangan dinamis. Maka semua

titik disepanjang tube akan berhubungan langsung dengan fluida air dingin, fluida air mendidih, fluida uap kualitas rendah dan uap pada *waterwall*. Gradien temperatur antara dinding tube dan fluida di dalam tube memberikan gaya untuk menghasilkan perpindahan panas pada setiap titik. Pada unit pembangkit listrik tenaga uap telah direncanakan agar keseimbangan (*balance*) panas yang masuk dari hasil pembakaran dengan uap *waterwall*. Di dalam dapur temperatur gas panas cukup tinggi, panas tersebut diserap oleh dinding dapur dan uap di dalam tube *waterwall* (pada daerah laluan konveksi) sehingga temperatur turun. Flux panas pada kondisi *steady state* adalah ditunjukkan dengan persamaan.

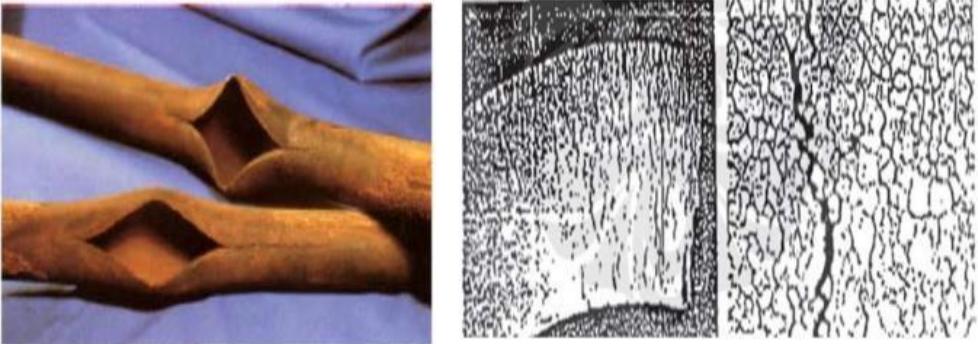
Pada kondisi terjadinya perbedaan temperatur yang besar antara dinding tube dan fluida, secara teoritis tube akan pecah karena terjadi melting pada material tube, walaupun kenyataannya tube akan pecah apabila material tube kehilangan kekuatannya, karena itu perlu diperhitungkan kemampuan material tube menerima panas yang tinggi. Pada *waterwall* temperatur operasinya di atas temperatur uap masuk ke dalam tube, perpindahan panasnya diatur dengan aliran fluida dibagian inlet dan outlet. Walaupun demikian *flux* panas yang tinggi dapat menyebabkan temperatur dinding

Tube pecah karena *overheating* dapat terjadi dalam waktu beberapa menit (*short term overheating*) atau dapat juga terjadi dengan waktu yang lama (*long term overheating*). Ditinjau dari permukaan pecahnya, pecah karena *overheating* dapat dibagi dua yaitu *thick lip rupture* dan *thin lip rupture*.

2.8.1 Thick lip rupture

Pecah *thick lip rupture* ditandai dengan permukaan pecahnya yang tebal, sedikit liat dan terjadi *swelling* atau menggelembung. Pecahnya yang normal terjadi dibagian yang sejajar dengan sumbu *axis* atau pada sisi *longitudinal*, dikenal dengan pecah *fishmouth* seperti ditunjukkan pada gambar 2.12. Struktur mikro permukaan pecah menunjukkan terjadi *creep*, *cavitas*, pemisahan batas butir

dan terjadinya retak *intergranular* pada bagian dalam dan luar diameter atau *oxide penetration* pada batas butir. Karbida pada baja *ferrite* adalah seluruhnya *spheroidized* seperti ditunjukkan pada gambar 2.12. Pecah *thick lip* disebabkan oleh *overheating* dalam waktu lama (*long term overheating*) pada temperatur di atas temperatur aman dari material tube.



Gambar 2. 12 Pecah thick lip dan struktur mikro permukaan akibat overheating. (Lobbey & Al-Otobi, 2008)

Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya peningkatan temperature melebihi kondisi *design (overheating)* adalah:

1. Terjadinya *blocking* pada laluan gas panas
Terjadinya flux panas diakibatkan karena terjadinya bagian tertentu yang terbloking pada laluan konveksi sehingga akan meningkatkan aliran gas panas pada daerah tertentu saja. Kecepatan gas panas yang tinggi akan memperbesar koefisien heat transfer (h_o) di bagian sisi uap dan akan meningkatkan temperatur material.
2. Faktor dalam kerak
Kerak atau scale deposit dari bagian air (*water side*) dapat meningkatkan konduktivitas termal baja sampai 5%. Hal ini

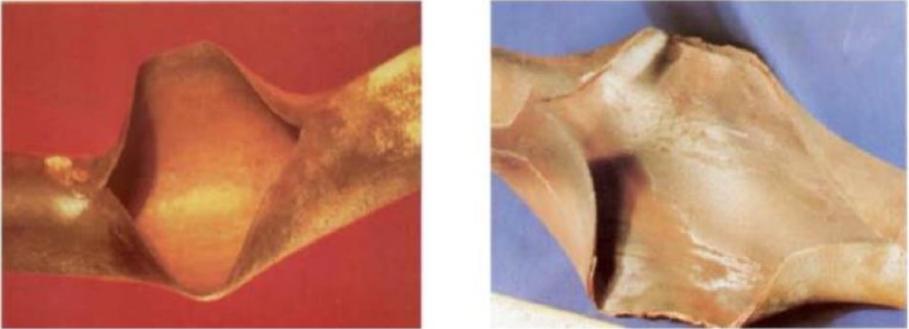
akan mengurangi perpindahan panas dari gas panas ke fluida.

3. Terjadinya pengurangan supply uap
Kondisi ini apabila terjadi penyumbatan aliran uap karena adanya internal kerak pada tube, hal ini disertai terbentuknya lapisan uap yang tipis (*vapor film*) yang konduktivitas panasnya rendah. Sewaktu aliran *flux* panas yang besar melalui daerah yang lapisan uapnya tipis akan mengakibatkan temperatur dinding tube tinggi sekali (*terjadi overheating*).
4. Faktor *burner adjustment*
Ketidak sempurnaan bahan bakar gas atau oksigen yang didistribusikan tidak sesuai dengan *burner*, pengaruhnya akan meningkatkan *flux* panas.
5. Faktor aliran uap yang tidak sempurna

Pada awal perencanaan harus diperhitungkan kondisi aliran uap yang tidak seimbang dari tube ke tube, faktor ini harus diperhitungkan dalam merencanakan temperatur material tube.

2.8.2 Thin lip rupture

Kegagalan yang disebabkan oleh *short term overheating* terjadi diatas temperatur aman material tube dan disertai *swelling* di dekat daerah pecah



Gambar 2. 13 Kegagalan thin lip rupture. (Lobbyy & Al-Otabi, 2008)

Pada gambar 2.13, menunjukkan uap keluar dengan kecepatan tinggi melalui permukaan pecah akan menimbulkan gaya reaksi pada tube berupa pembengkokan secara lateral, semakin tinggi temperatur dan tidak uniform overheating maka pembengkokan lateral semakin besar.

Pecah *thin lip* dapat ditunjukkan dengan penipisan dinding tube yang disebabkan oleh tegangan luluh (*yielding*) di daerah pecah, kadang-kadang permukaan pecahnya menjadi tajam seperti pada gambar 2.13, penipisan juga terjadi di daerah *swelling* dekat daerah pecah. Faktor penyebab *short term overheating* dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Terjadinya *blocking* di dalam tube superheater karena terkumpulnya kondensat pada laluan uap.
2. Pada pipa air kebocoran halus tidak dapat dideteksi di dalam dapur. Kebocoran yang besar diketahui dengan berkurangnya aliran fluida yang terjadi dibawah kondisi normal, disertai flux panas yang tinggi menyebabkan temperatur material naik dengan cepat.

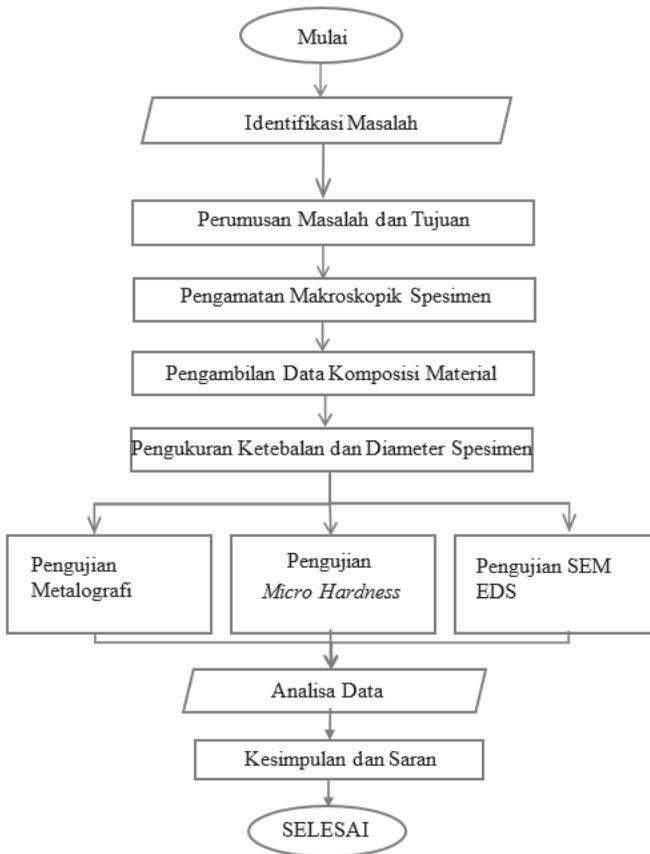
Penipisan dinding tube adalah salah satu karakteristik dari kegagalan *short term overheating*, namun tidak selalu kegagalan tersebut mengakibatkan penipisan dinding (Lobbey & Al-Otobi, 2008).

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Terdapat beberapa tahapan penelitian yang digambarkan dengan diagram alir penelitian:



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.2. Prinsip Kegagalan

Kegagalan adalah suatu kondisi dimana komponen dari suatu sistem mesin yang tidak berjalan sesuai dengan fungsinya. Pada situasi umumnya, suatu komponen yang sudah mengalami kegagalan, masih dapat beroperasi tetapi tidak berfungsi sesuai semestinya, dan dapat menyebabkan kerusakan serius atau tidak aman untuk digunakan.

Dalam mencari mekanisme kegagalan, terdapat beberapa kategori yang diperlukan untuk mengetahui penyebab kegagalan pada *waterwall tube*. Walaupun tiap kasus kegagalan mempunyai karakteristik yang berbeda namun secara umum langkah investigasi yang dilakukan seragam. Terdapat aspek-aspek yang menjadi tinjauan seseorang untuk melakukan penelitian untuk mencapai hasil maksimal yang ditunjukkan pada tabel 3.1:

Tabel 3. 1 Tabel prinsip kegagalan

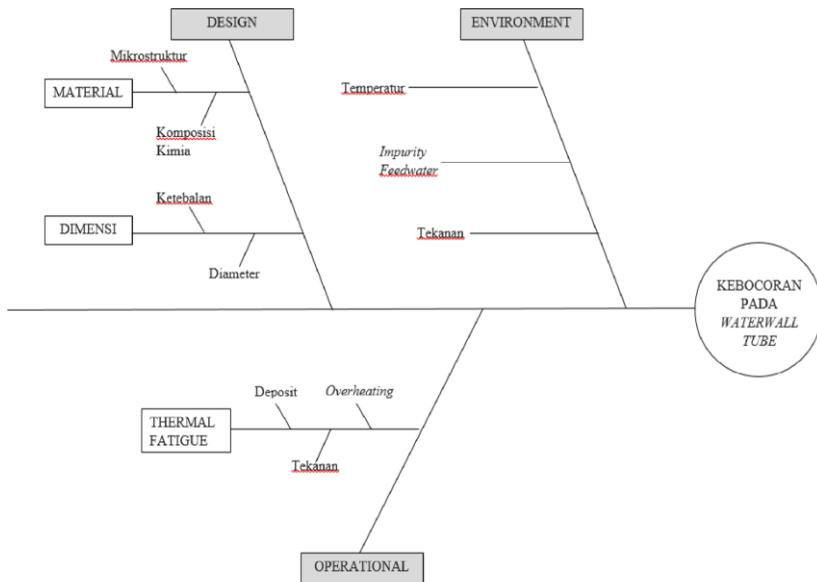
DESIGN		
MATERIAL		
	Notasi	Uraian
1	Mikrostruktur	Terdapat <i>pearlite</i> yang sudah mengalami degradasi sehingga membentuk <i>spherodized cementite</i> pada material yang terletak dekat dengan <i>crack</i>
		Pada bagian belakang tube yang mengalami patahan, struktur <i>pearlite</i> sudah mengalami degradasi tahap awal
2	Komposisi Kimia	Kandungan komposisi karbon tidak sesuai dengan standard Steel Grade GB 5310 20 MnG dan ASTM A192
DIMENSI		

1	Diameter	Material mengalami peningkatan nilai diameter vertikal dan bersifat variatif di sepanjang tube yang terjadi <i>crack</i>
2	Ketebalan	Material mengalami penipisan di sepanjang tube yang terjadi <i>crack</i>
OPERATIONAL		
THERMAL FATIGUE		
1	Deposit	Terdapat serbuk deposit dominan magnetite
2	Tekanan	Tube yang mengalami <i>crack</i> mengalami perubahan tekanan
3	<i>Overheating</i>	Tube mengalami peningkatan temperatur yang melebihi spesifikasi awal hingga menyebabkan patah berbentuk <i>thin lip rupture</i>
ENVIRONMENT		
1	Temperature	Lingkungan kerja tube memiliki temperatur yang sangat tinggi, sehingga jika tidak dilakukan maintenance secara teliti dan berkala, dapat menyebabkan tube mengalami <i>crack</i>
2	Komposisi <i>Feedwater</i>	Kandungan kimia pada feedwater dapat menyebabkan reaksi kimia dengan dinding waterwall dikarenakan temperatur kerja tube yang tinggi
3	Tekanan	Tube yang mengalami <i>crack</i> mengalami perubahan tekanan

3.3. Fishbone Diagram

Fishbone diagram adalah salah satu metode untuk menganalisa sebab dan akibat dari suatu permasalahan yang menyebabkan kegagalan pada suatu sistem. Terdapat beberapa kategori untuk

mengetahui suatu permasalahan dalam industri manufaktur, yaitu mesin, metode, material, *man power/mind power*, *measurement*, dan *Mileu / Mother Nature* yang biasa disebut Kategori 6M. Pada penelitian analisis kegagalan *waterwall tube* pada *circulating fluidized bed boiler* digunakan *fishbone diagram* untuk mengidentifikasi dan mengorganisasi penyebab-penyebab dari permasalahan yang ada seperti pada gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Fishbone diagram untuk kebocoran pada waterwall tube

3.4 Peralatan Penelitian

Adapun peralatan-peralatan yang digunakan untuk menunjang penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kamera

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

2. Penggaris dan Jangka Sorong

Penggaris yang digunakan pada penelitian ini memiliki ketelitian 0,1 mm, sedangkan jangka sorong yang digunakan memiliki ketelitian 0,01 mm. Penggaris dan jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi panjang dan diameter dari material yang akan menjadi benda kerja serta mengukur dimensi lain yang dianggap perlu.

3. Mesin Potong Jigsaw

Merupakan mesin potong otomatis dengan merk CPSG model G7016 yang digunakan untuk memotong benda kerja sesuai dimensi yang diinginkan dan telah diukur sebelumnya. Cara kerjanya seperti gergaji besi yang biasa digunakan secara manual.

4. Perangkat Mounting

Proses ini menggunakan *polyester* dan katalis yang berguna untuk mempercepat proses pembekuan dari *polyester*. Serta diperlukan gelas ukur, pengaduk, wadah pengaduk, pipa PVC sebagai cetakan, plastisin, dan keramik untuk menunjang proses *mounting* spesimen benda kerja.

5. Perangkat etching

Proses ini menggunakan larutan nital 2% yang terdiri dari 2 ml HNO_3 ditambah 98 ml etanol. Diperlukan gelas ukur, pipet, wadah kaca, *hair dryer*, dan aquades untuk menunjang proses etsa spesimen benda kerja.

6. Perangkat Grinding dan Polishing

Spesimen benda kerja menggunakan mesin Grinder Polisher Metkon GRIPO 300-IV dengan kertas amplas grit 80, 120, 240, 320, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, dan 2000. Sedangkan proses *polishing* menggunakan mesin yang sama seperti proses *grinding* dengan menggunakan kain beludru dan serbuk alumina yang dicampurkan dengan air.

7. Spectrometer ARC-Met 8000

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

8. Mikroskop Optis *digital olimpus BX60M*

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

3.5 Langkah Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah

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

2. Observasi Lapangan

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

3. Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses pencarian informasi terhadap buku dan jurnal yang terkait dengan kasus kegagalan serupa. Hal ini termasuk mengumpulkan materi kuliah pendukung untuk

digunakan sebagai referensi atau pustaka pada penelitian. Studi literatur dilakukan terus menerus hingga penelitian selesai.

4. Perumusan Masalah dan Tujuan

Setelah melakukan tahapan-tahapan diatas maka tube yang digunakan pada *Circulating fluidized Bed* Boiler ditetapkan sebagai objek penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk mencari penyebab dan mekanisme terjadinya kegagalan pada tube tersebut. Perumusan masalah disertai dengan penetapan Batasan masalah untuk memperjelas lingkup penelitian.

5. Pengambilan Data Operasional dan Material

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

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

6. Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan pada spesimen dengan tujuan untuk menemukan letak cacat yang terlihat tanpa alat bantu yang kemudian menggunakan bantuan kamera digital untuk mendapatkan bentuk dan penampakan kerusakan pada bagian

dalam dan luar tube. Kemudian spesimen dipotong ke dalam beberapa sampel. Dari hasil pengamatan visual akan didapat data berupa letak kerusakan pada spesimen, serta penipisan diameter yang terlihat secara kasat mata, selanjutnya akan di lakukan pengukuran dimensi secara terinci.

7. Pemotongan dan Pengukuran Dimensi

Pengukuran dimensi dilakukan untuk mengetahui ukuran serta penipisan yang terjadi pada spesimen secara akurat dan menyeluruh pada permukaan pipa. Pemotongan dilakukan dengan cara memotong spesimen menjadi beberapa bagian dengan gergaji tangan beberapa bagian spesimen. Kemudian potongan-potongan spesimen tersebut akan dilakukan pengukuran ketebalan dengan menggunakan jangka sorong dari sudut 00 hingga 3300. Dari data ini dapat diketahui daerah mana yang mempunyai penipisan diameter paling besar, dan dapat ditentukan bagian spesimen uji yang mendapatkan temperature yang paling tinggi saat pengoperasian.

8. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi bertujuan untuk mengetahui struktur mikro yang terdapat pada material.. Pengujian metalografi diawali dengan beberapa persiapan yang meliputi etching menggunakan *etchant* atau *etching reagent* yaitu larutan nital dengan konsentrasi 2%. Setelah itu sampel spesimen akan dilihat dengan mikroskop elektronik dengan perbesaran 100 hingga 500x untuk menganalisa mikro struktur. Hasil dari pengujian digunakan untuk menganalisa membandingkan struktur mikro pada beberapa titik di permukaan spesimen uji yang nantinya dapat diketahui pada titik mana yang paling besar perubahan struktur mikronya serta pengaruhnya terhadap temperature tube.

9. Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui komposisi dan informasi topografi, morfologi dan komposisi suatu material.

Topografi digunakan untuk menganalisa permukaan dan tekstur (kekerasan dan reflektivitas). Morfologi digunakan untuk menganalisa bentuk dan ukuran dari benda sampel. Dan pengujian komposisi suatu material digunakan untuk menganalisa komposisi dari permukaan benda secara kuantitatif dan kualitatif. Dari hasil ini didapatkan pengamatan dari lapisan oksida serta ketebalan dari lapisan di setiap titik benda uji yang nantinya di jadikan perbandingan dan hubunganya terhadap temperature tube.

10. Pengujian Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

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

11. Uji Kekerasan Mikro

Pengujian kekerasan dengan skala mikro dilakukan pada permukaan benda kerja. Setelah indentor dan benda kerja diatur posisinya , pembebanan di atur pada alat uji. Setelah itu barulah proses indentasi dapat berlangsung. Pengambilan data dilakukan pada titik yang berbeda guna untuk mengetahui kekerasan permukaan pada masing masing titik. Hasil uji ini dapat berupa tabel ataupun diagram. Hasil ini nantinya dapat menentukan daerah mana yang mempunyai penipisan ketebalan paling signifikan karena pengaruh oksidasi terhadap suhu tinggi.

BAB IV

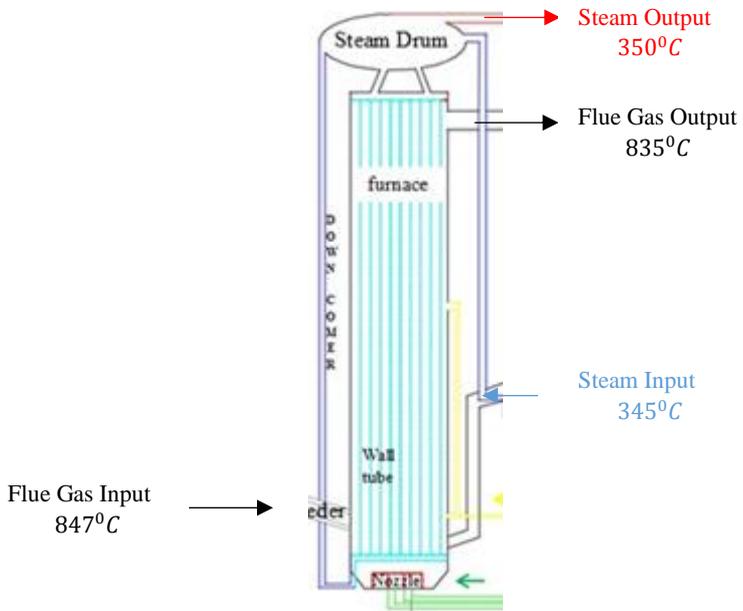
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Operasi Kerja *Waterwall*

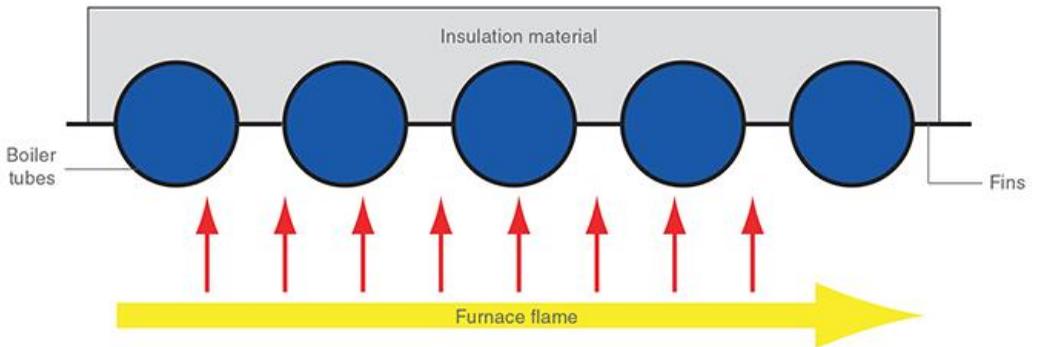
Kondisi operasi, meliputi semua data yang berkaitan dengan pengoperasian *tube* di dalam boiler, antara lain : temperature, tekanan, dan letak . Diketahui steam masuk dengan temperature 345°C dan keluar dengan temperature 350°C . Sedangkan temperature *flue gas* yang masuk sebesar 847°C dan keluar dengan temperature sebesar 835°C . Berikut tabel data operasional yang didapat dapat dilihat pada tabel 4.1 dan skema *waterwall* pada gambar 4.1.

Tabel 4. 1 Operasi kerja *waterwall*

Steam inlet temperature	345°C
Steam outlet temperature	350°C
Gas temperature at inlet	847.0°C
Gas temperature at outlet	835.0°C
Steam flow rate	$3,33\text{ m/s}^3$
Outer Diameter water wall tube	51 mm
Inner Diameter water wall tube	38 mm



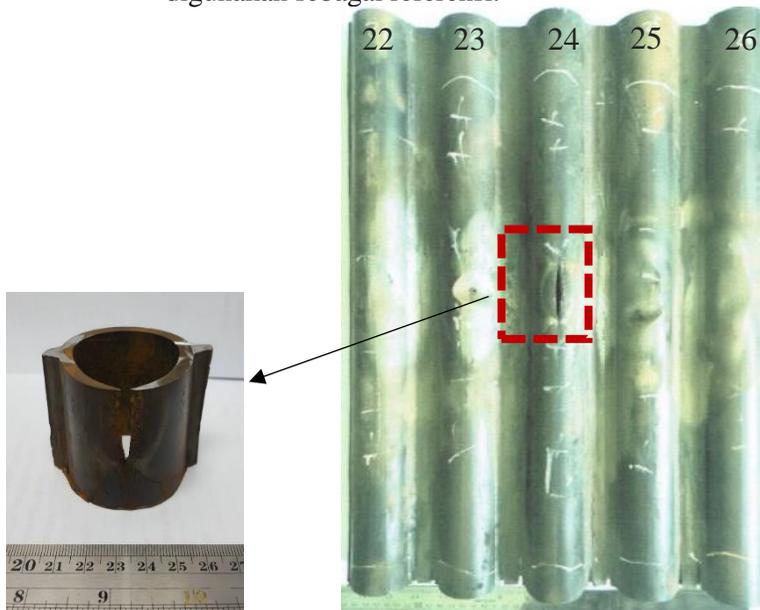
Gambar 4. 1 Skema Operasional Waterwall



Gambar 4. 2 Operasional Waterwall

4.2 Analisa Visual dan Pemotongan Spesimen *Waterwall* Tube

Pengamatan dilakukan dengan pengambilan 1 bagian yang terdapat *crack* (spesimen tube #24a), 3 bagian pada tube A (spesimen tube #24b, tube #24c, tube #24d) dan 3 bagian pula pada tube B (spesimen tube #24e, tube #24f, tube #24g) pada tube #24 yang mengalami perubahan bentuk disepanjang tube dan mengalami kebocoran. Diambil juga sampel tube yang tidak mengalami kegagalan yaitu pada bagian atas tube #22 yang digunakan sebagai referensi.



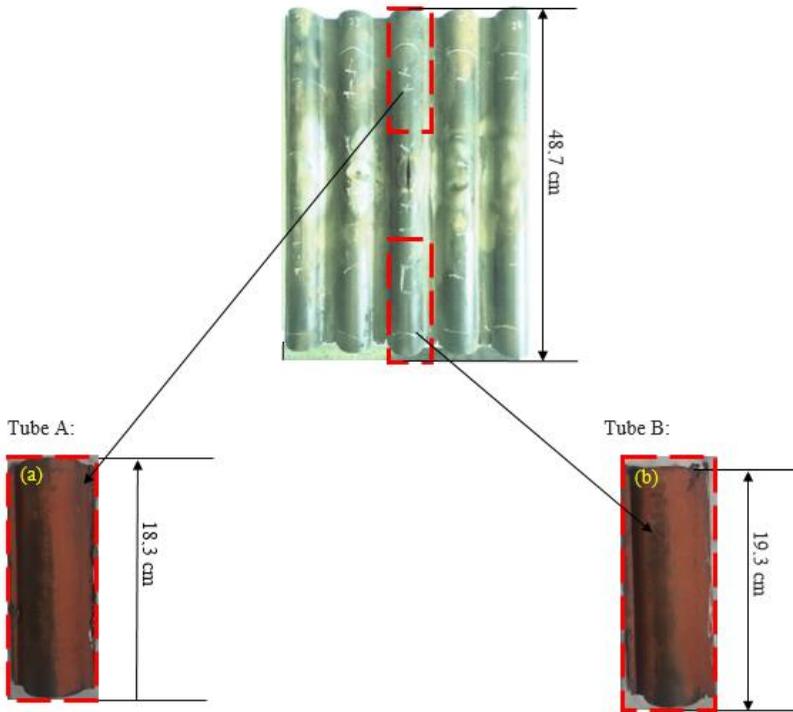
Gambar 4. 3 Crack pada tube 24 di waterwall



Gambar 4. 4 Perubahan bentuk tube pada waterwall tube 22 dengan tube 24 (a) tube #24 (b) tube #22

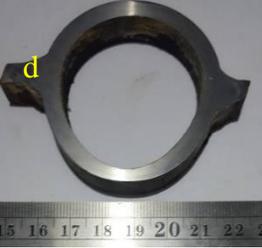
Dapat dilihat pada gambar 4.3 dan 4.4, merupakan spesimen *waterwall tube* yang mengalami *defect* berupa *crack* dan perubahan bentuk tube yang sangat terlihat. Selain mengalami perubahan bentuk, tube juga mengalami penipisan ketebalan pada bagian bawah.

Pada penelitian ini, dilakukan pemotongan pada tube #24 untuk pengambilan sample yang akan diteliti. Tube #24 akan dipotong menjadi 2 bagian yaitu bagian atas dan bagian bawah dan pada tiap bagian di ambil 3 bagian atas, tengah, dan bawah untuk mengetahui mekanisme terjadinya perubahan bentuk pada *waterwall tube*. Pemotongan *waterwall tube* dilakukan pada gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Pemotongan pada tube 24

c



f



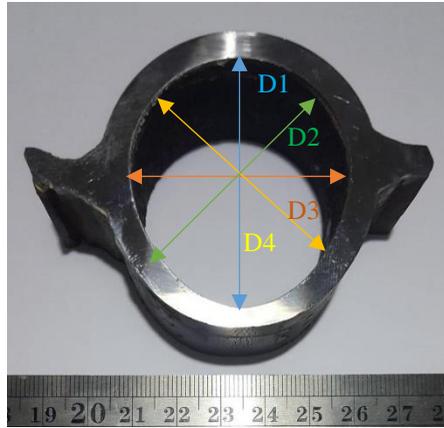
Gambar 4. 6 Pengambilan sampel pada waterwall tube (a) Tube #22 (b) Tube #24 yang mengalami crack (c) Tube #24a (d) Tube #24b (e) Tube #24c (f) Tube #24d (g) Tube #24e (h) Tube #24f

Gambar 4.6 merupakan pengambilan sample yang akan diteliti pada penelitian ini. Gambar a merupakan pengambilan spesimen pada tube #22 yang berfungsi sebagai referensi. Gambar b merupakan pengambilan spesimen pada tube #24 yang mengalami

defect berupa *crack*. Gambar c merupakan pengambilan spesimen pada tube #24 yang diambil pada tube A bagian atas. Gambar d merupakan pengambilan spesimen pada tube #24 yang diambil pada tube A bagian tengah. Gambar e merupakan pengambilan spesimen pada tube #24 yang diambil pada tube A bagian bawah. Gambar f merupakan pengambilan spesimen pada tube #24 yang diambil pada tube B bagian atas. Gambar g merupakan pengambilan spesimen pada tube #24 yang diambil pada tube B bagian tengah. Gambar h merupakan pengambilan spesimen pada tube #24 yang diambil pada tube B bagian bawah. Pengambilan spesimen pada tube #24 dilakukan sebagai objek penelitian untuk mengetahui mekanisme kegagalan pada *waterwall tube* berupa *crack* dan penipisan ketebalan pada tube.

4.3 Pengukuran Dimensi pada Spesimen *Waterwall Tube*

Pengukuran diameter pada tube dilakukan pada spesimen tube A dan tube B dimana tube A dan tube B merupakan bagian dari tube #24 yang mengalami perubahan bentuk dan mengalami *crack*. Pengukuran ketebalan pada tube dilakukan pada spesimen tube A dan tube B. Pengambilan data pada spesimen tube #22 berfungsi sebagai referensi terhadap spesimen tube #24a sampai tube #24f. Pembagian letak pengambilan data diameter dalam dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Pembagian letak pengambilan data diameter dalam pada tube 22 sampai tube 24f

Tabel 4. 2 Hasil pengukuran diameter dalam

Spesimen	Keterangan	Diameter Dalam (mm)			
		D1	D2	D3	D4
1	Tube 22	40,36	34,67	40	39,61
2	Tube 24	□	40,85	45,65	48,18
3	Tube 24a	44,82	42,36	39,78	41,18
4	Tube 24b	45,5	42	40,2	41,62
5	Tube 24c	46,36	43,26	40,6	43,74
6	Tube 24d	46,36	44,58	40	45,62
7	Tube 24e	46,58	46	40,32	46,62
8	Tube 24f	49,02	48,42	39,8	47

Dari hasil pengukuran diameter dalam pada tabel 4.2 yang dilakukan pada spesimen tube #24a sampai tube #24f, didapatkan nilai diameter dalam melebihi nilai diameter dalam referensi. Pada D1, D2, dan D4 didapatkan perbedaan nilai yang sangat signifikan

antara spesimen 1 yang memiliki fungsi sebagai referensi dengan spesimen tube #24a sampai tube #24f. Pembagian titik pengambilan ketebalan pada potongan spesimen tube #24a sampai tube #24f dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Pembagian titik pengambilan ketebalan potongan tube 24

Tabel 4. 3 Data ketebalan tube

Spesimen	Keterangan	Ketebalan (mm)							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
1	tube 22	5,55	5,51	5,63	5,42	5,36	5,49	5,56	5,57
2	tube 24	5,45	5,40	5,44	4,45	0	5,04	5,26	5,40
3	tube 24a	5,42	5,40	5,45	5,05	3,27	5,47	5,42	5,42
4	tube 24b	5,41	5,45	5,60	5,14	3,54	5,21	5,51	5,40
5	tube 24c	5,35	5,47	5,53	5,30	4,02	5,14	5,37	5,42
6	tube 24d	5,40	5,45	5,61	5,12	3,49	5,30	5,42	5,44
7	tube 24e	5,48	5,54	5,46	5,24	2,32	5,17	5,40	5,52

8	tube 24f	5,31	5,31	5,44	5,24	3,55	5,26	5,41	5,44
---	----------	------	------	------	------	------	------	------	------

Dari tabel 4.3, dapat diketahui bahwa terjadi penipisan ketebalan yang sangat signifikan pada titik T5, dimana titik tersebut adalah titik dimana terjadinya kebocoran dan penipisan ketebalan sedangkan pada titik yang lain masih mempunyai diameter yang cukup tebal. Kebocoran diindikasikan akibat dari *overheating*. Penipisan ketebalan terjadi karena adanya proses oksidasi internal pada diameter dalam tube.

4.4 Pengamatan Komposisi Kimia

Pengamatan komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan *spectrometer* pada tube #22 dan spesimen yang mengalami *crack* (tube #24a). Hasil dari pengujian yang ditampilkan pada tabel di bawah ini memuat komposisi standar baja menurut standar GB material 20G dan standard ASTM A192.

Tabel 4. 4 Komposisi kimia hasil pengujian

Grade	Chemical Composition %					
	C	Si	Mn	P max	S max	
ASTM A192	0,06	0,25	0,27			Standar
	-	max	-	0,035	0,035	
	0,18		0,63			
GB 5310 20 MnG	0,17 - 0,23	0,17- 0,37	0,7-1	0,025	0,015	Standar
GB 5310 25 MnG	0,22 - 0,27	0,17- 0,37	0,7-1	0,025	0,015	Standar
Spesimen1 (referensi)	0,24	0,27	0,85	0,013	0,007	OES

Spesimen 2 (<i>crack</i>)	0,15	0,25	0,76	0,016	0,01	OES
--------------------------------	------	------	------	-------	------	-----

Dari tabel 4.4, terlihat bahwa komposisi karbon pada spesimen tidak sesuai dengan standar yang dimaksudkan. Spesimen tube #24a yang mengalami kegagalan berupa *crack* memiliki komposisi kimia *carbon* (C) sebesar 0,15 dimana tidak sesuai dengan standar GB material 20G maupun ASTM A192.

4.5 Pengujian Metalografi

Analisa ini dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari spesimen *tube* dengan standar GB material 20, yang merupakan golongan dari *Low Carbon Steel* dengan komposisi maksimal karbon sebanyak 0,3%. Pengamatan dilakukan di 2 titik, yaitu titik 1 terletak di bagian belakang tube dan titik 2 yang terletak di bagian depan tube menghadap ke arah *furnace*. Spesimen yang dilakukan pengujian ialah spesimen tube #24a dimana spesimen adalah spesimen yang mengalami kegagalan *crack*. Spesimen tube #24b sampai spesimen tube #24f dimana spesimen ini berfungsi untuk mengetahui mekanisme penipisan pada tube serta mengetahui mekanisme kegagalan *crack* pada tube #24. Tube#22 juga disertakan dalam pengamatan yang berfungsi untuk menjadi referensi karena letaknya jauh dari kegagalan. Pengambilan data pengujian metalografi beserta pengamatannya dapat dilihat pada gambar 4.9 sampai 4.30.



Gambar 4. 9 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 22



Gambar 4. 10 Pengamatan spesimen tube 22 dengan perbesaran 50x



Gambar 4. 11 Spesimen tube 24a



Gambar 4. 12 Pengamatan spesimen tube 24a dengan perbesaran 20x



Gambar 4. 13 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24b



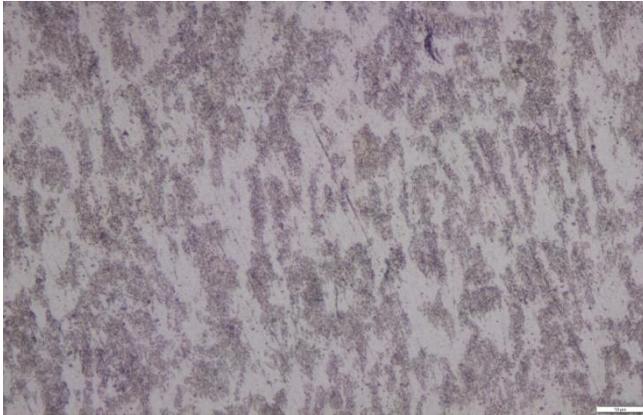
Gambar 4. 14 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24b di titik 1 dengan perbesaran 50x



Gambar 4. 15 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24b di titik 2 dengan perbesaran 50x



Gambar 4. 16 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24c



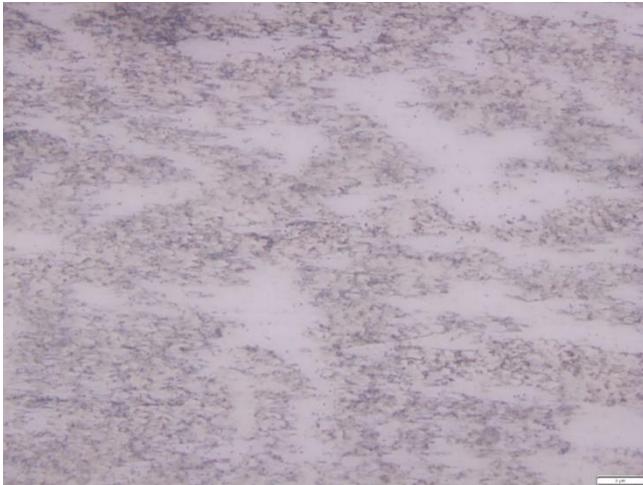
Gambar 4. 17 Pengujian metalografi pada spesimen tube 2c di titik 1 dengan perbesaran 50x



Gambar 4. 18 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24c di titik 2 dengan perbesaran 20x



Gambar 4. 19 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24d



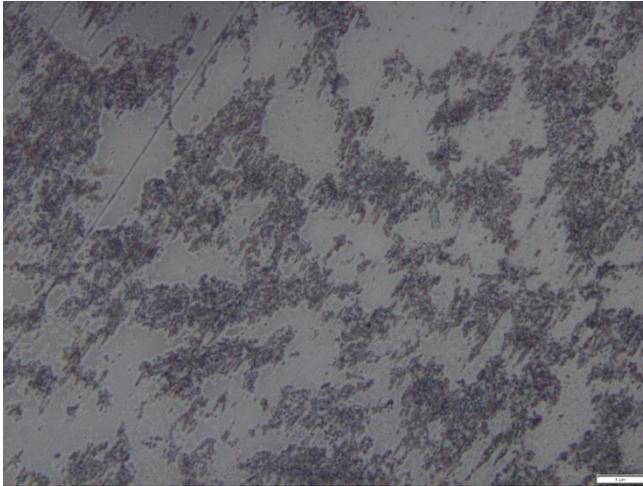
Gambar 4. 20 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24d di titik 1 dengan perbesaran 100x



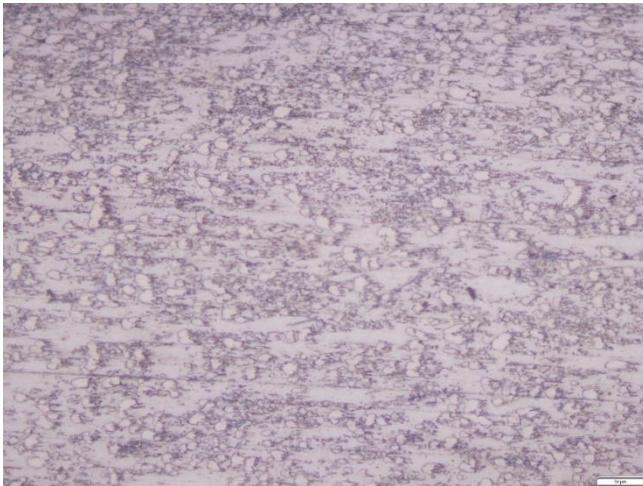
Gambar 4. 21 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24d di titik 2 dengan perbesaran 50x



Gambar 4. 22 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24e



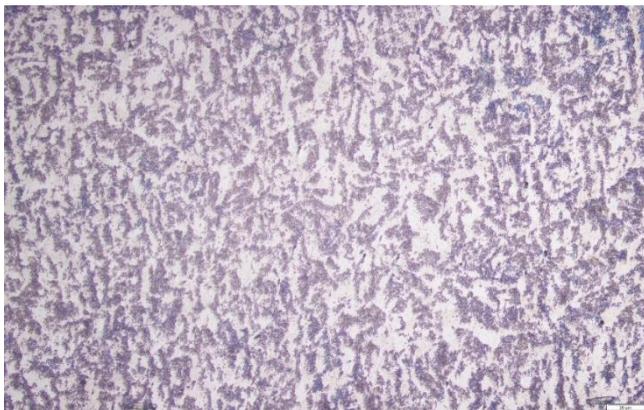
Gambar 4. 23 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24e di titik 1 dengan perbesaran 100x



Gambar 4. 24 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24e di titik 2 dengan perbesaran 50x



Gambar 4. 25 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24f



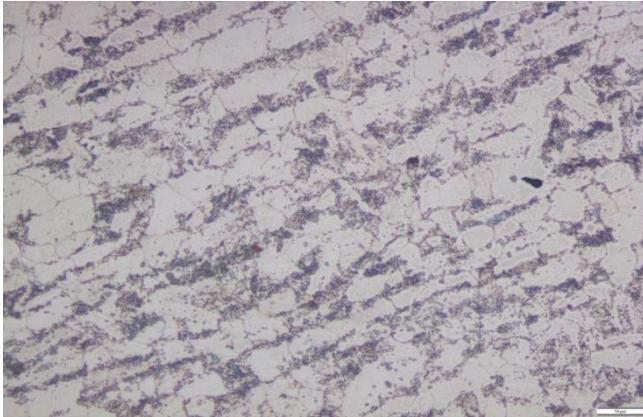
Gambar 4. 26 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24f di titik 1 dengan perbesaran 20x



Gambar 4. 27 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24f di titik 2 dengan perbesaran 100x



Gambar 4. 28 Titik pengujian metalografi pada spesimen tube 24g

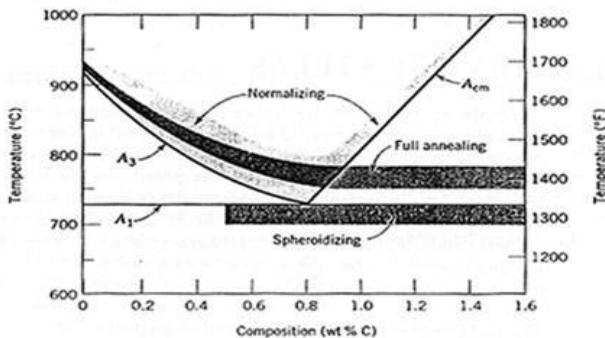


Gambar 4. 29 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24g di titik 1 dengan perbesaran 50x



Gambar 4. 30 Pengujian metalografi pada spesimen tube 24g di titik 2 dengan perbesaran 50x

Dari hasil pengamatan mikro yang didapat dari ke 8 spesimen, diketahui bahwa spesimen memiliki struktur *ferrite-pearlite*, dimana . area yang berwarna hitam menunjukkan area *pearlite* dan pada area yang berwarna putih menunjukkan area *ferrite*. Pada hasil pengamatan mikrostruktur tersebut dapat disimpulkan bahwa tube yang mengalami kerusakan tersebut telah kehilangan banyak area *pearlite*. Semakin tinggi kadar karbonnya semakin tinggi pula *pearlite* yang terkandung pada sebuah material. Pada titik 2, dimana titik 2 adalah bagian yang mengalami penipisan ketebalan yang sangat signifikan, dan terlihat bahwa *pearlite* sudah mengalami degradasi sehingga membentuk *spheroidized graphite*, dimana ini menunjukkan bahwa terjadinya *overheating* pada *waterwall* tube.



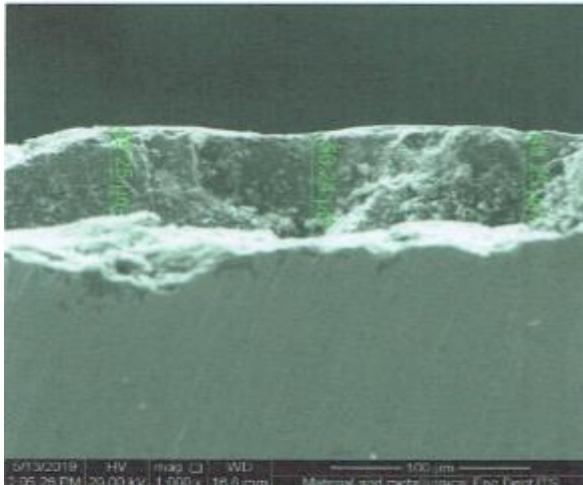
Gambar 4. 31 Spheroidizing pada diagram fasa Fe-Fe₃C

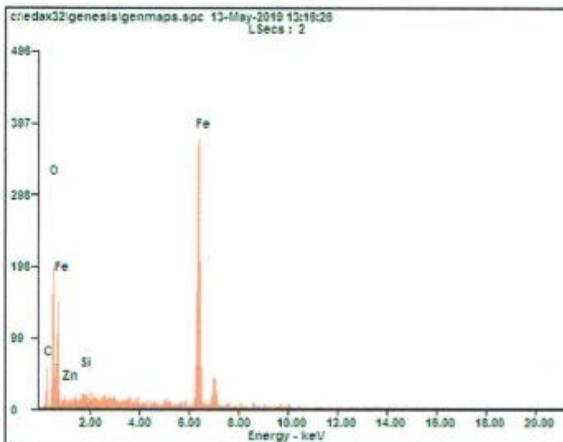
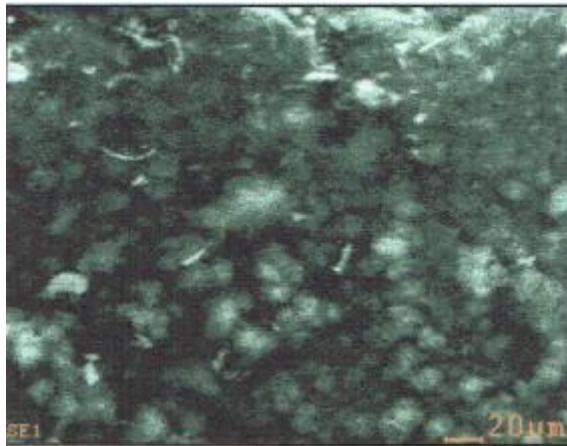
Pada gambar 4.31, menunjukkan temperature *spheroidizing* yang terjadi pada tube. Dimana tube #24 merupakan baja *hypoeutectoid* yang memiliki kadar karbon tidak lebih dari 0.8%. Pembentukan fase – fase pada baja, seperti *spheroidized graphite* diakibatkan perlakuan panas. Perlakuan panas yang berbeda menghasilkan fase baja yang berbeda. Pada dasarnya, *spheroid* dapat terbentuk ketika baja karbon dipanaskan sampai sekitar 700°C selama lebih dari 30 jam, namun pada kenyataannya

spheroid dapat terbentuk pula pada temperature yang lebih rendah akan tetapi, waktu yang dibutuhkan secara drastis meningkat. Ini menunjukkan peningkatan temperature pada titik T2 tube 24 sebesar 600°C - 650°C sehingga fasa *pearlite* sudah mengalami degradasi dan membentuk *spheroidized graphite*.

4.6 Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) dan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

Berdasarkan adanya penipisan ketebalan dari tube yang sangat signifikan, maka pengujian SEM dan EDS dilakukan untuk mengetahui bentuk morfologi serta unsur-unsur yang tergantung pada spesimen uji. Pengambilan dilakukan pada bagian belakang spesimen tube #24a pada saat kerak masih menempel.



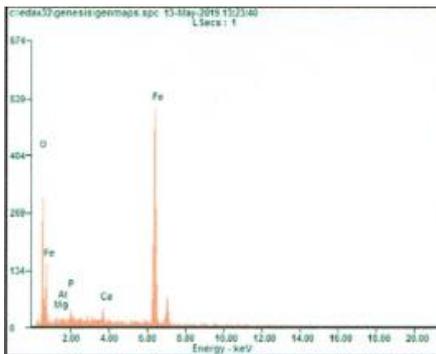
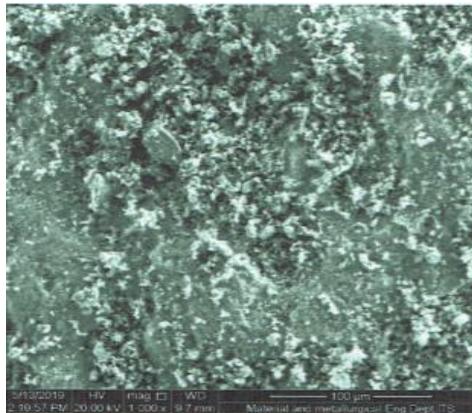


Element	Wt%	At%
CK	05.91	16.53
OK	17.81	37.38
ZnL	02.09	01.08
SiK	00.67	00.80
FeK	73.52	44.22
Matrix	Correction	ZAF

Gambar 4. 32 Hasil pengujian EDS pada serbuk kerak pada bagian belakang tube yang mengalami kegagalan

Hasil analisis EDS pada gambar 4.32 menunjukkan bahwa ketebalan lapisan oksida pada tube di daerah sekitar *crack* sebesar 49 – 56 μm. Pada tube juga terdapat kandungan C yang memiliki berat 05.91 % dan atomik sebesar 16.53%, kandungan O yang

memiliki berat 17.81%, dan atomic sebesar 37.38%, kandungan Zn yang memiliki berat sebesar 02.09%, dan atomic sebesar 01.08%, kandungan Si yang memiliki berat sebesar 00.67%, dan atomic sebesar 00.80%, dan kandungan Fe yang memiliki berat sebesar 73.52% dan atomic sebesar 44.22%. Dari data tersebut menunjukkan bahwa deposit mengandung lebih banyak Fe dan O daripada Si, C, dan Zn. Hal ini berarti terjadi proses korosi pada *waterwall tube*.



Element	WT%	At%
OK	19.14	44.21
MgK	00.91	01.39
AlK	00.76	01.04
PK	01.07	01.27
CaK	01.46	01.35
FeK	76.66	50.74
Matrix	Correction	ZAF

Gambar 4. 33 Hasil pengujian EDS pada deposit header *waterwall tube*

Hasil analisis EDS pada gambar 4.33 menunjukkan bahwa mikrostruktur deposit header berbentuk butiran kasar dan terdapat kandungan O yang memiliki berat 19.14 % dan atomik sebesar 44.21%, kandungan Mg yang memiliki berat 00.91%, dan atomik sebesar 01.39%, kandungan Al yang memiliki berat sebesar 00.76%, dan atomik sebesar 01.04%, kandungan P yang memiliki berat sebesar 01.07%, dan atomik sebesar 01.27%, dan kandungan Ca yang memiliki berat 01.46%, dan atomik sebesar 01.35% dan kandungan Fe yang memiliki berat sebesar 76.66% dan atomik sebesar 50.74%. Dari data tersebut menunjukkan bahwa deposit mengandung Fe dan O yang tinggi dimana hal ini menunjukkan bahwa terjadi proses korosi pada *waterwall tube* dan juga terdapat kandungan Ca. Unsur Ca sendiri termasuk ion yang mempercepat terjadinya reaksi yang membentuk lapisan oksida. Pada pengujian EDS deposit tube 24 ditemukan kandungan *zinc* (Zn) yang tidak sesuai dengan spesifikasi feedwater. Pengujian EDS pada deposit header tube terdapat kandungan mineral berupa *magnesium* (Mg), *manganese* (Mn) dan *calcium* (Ca). Unsur Ca sendiri termasuk ion yang mempercepat terjadinya reaksi yang membentuk lapisan oksida. Sedangkan pada spesifikasi air *waterwall tube* hanya terkandung *silicon dioxide* (SiO_2), *hydrazine* (N_2H_4), *oxygen* (O), *iron* (Fe), *copper* (Cu)

4.7 Pengujian Mikro Hardness

Pengujian dilakukan untuk mendapatkan pemetakan kekerasan dari tiap titik pada permukaan specimen. Pengambilan data kekerasan dilakukan pada tube #22 yang terletak jauh dari tube yang mengalami deformasi dan *crack* berfungsi sebagai perbandingan dan spesimen tube #24a yang merupakan daerah terdekat dengan bagian yang mengalami *crack*. Pengambilan data juga dilakukan pada bagian belakang tube #24 di daerah yang mengalami *crack* untuk mengetahui variasi perbedaan kekerasan pada tube yang mengalami *crack*. Pembagian titik untuk

pengambilan data uji kekerasan dapat dilihat pada gambar 4.34. Hasil dari pengujian mikrohardness dapat dilihat pada tabel 4.5





Gambar 4. 34 Pembagian titik pengambilan uji mikrohardness pada spesimen 1,2, dan bagian belakang tube yang mengalami crack

Tabel 4. 5 Hasil pengujian mikrohardness pada spesimen

	T1	T2
Standard ASTM A192	130 HV	130 HV
Spesimen 1	138 HV	138 HV
Bagian belakang tube yang mengalami <i>crack</i>	138 HV	-
Spesimen 2	-	133 HV

Dari hasil pengujian mikrohardness pada spesimen, didapati kekerasan yang berbeda-beda pada tiap titiknya. Terlihat bahwa baik dari tube #22 dan bagian belakang tube yang mengalami *crack* memiliki nilai kekerasan di atas dari standard ASTM A192. Ini menunjukkan bahwa pada tube #22 dan bagian belakang tube sudah mulai mengalami *overheating* awal pada temperature 400-550 °C sehingga menyebabkan pearlite mengalami degradasi tahap awal. Pada tube #24a, didapat nilai hardness sebesar 133 HV yang juga mengalami penurunan nilai kekerasan jika dibandingkan dengan referensi. Ini menunjukkan bahwa pada spesimen 2 sudah mengalami *overheating* pada temperature 600-650 °C sehingga menyebabkan perubahan fasa pada pearlite menjadi spherodized graphit, dimana material mengalami proses spheroidizing sehingga mengalami penurunan kekerasan

4.9 Pembahasan

Pada hasil uji eksperimen, benda yang mengalami kegagalan mendekati standar GB material 20G dan ASTM A192 dimana standar ini termasuk pada golongan baja karbon rendah. Baja karbon rendah sendiri memiliki keuletan yang tinggi, kekerasan yang rendah, mudah di las tapi memiliki sifat *machineability* yang rendah. Setelah mengetahui hasil spectrometer yang menunjukkan bahwa material tersebut adalah material dengan standar GB material 20G yang merupakan standar china.

Pada pengukuran dimensi, dapat dilihat bahwa pengukuran diameter dalam pada titik D1, D2 dan D4 pada tube #24 memiliki nilai yang berbeda jauh dengan nilai D1, D2, dan D4 pada tube #22. Pada pengukuran ketebalan, penipisan ketebalan terlihat pada titik T5, dimana pada tube #22 memiliki nilai ketebalan sebesar 5,36 mm dan pada specimen 2,3,4,5,6,7,8 memiliki nilai ketebalan sebesar 0; 3,27; 3,54; 4,02; 3,49; 2,32; dan 3,55. Dimana ini menunjukkan bahwa bentuk *waterwall tube* sudah mengalami perubahan secara signifikan. Selanjutnya dilakukan pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro yang terdapat pada material yang mengalami kerusakan. Pengujian metalografi yang dilakukan dibagi menjadi 7 bagian pada tiap-tiap specimen. Dapat dilihat pada pengujian metalografi, specimen-spesimen tersebut memiliki fasa *ferrite-pearlite*. Fasa *ferrite* ditunjukkan dengan warna yang lebih terang dan fasa *pearlite* ditunjukkan dengan warna yang lebih gelap dan lamelar. Pada hasil pengujian metalografi di titik 1, *pearlite* sudah mulai mengalami degradasi tahap awal. Ini menunjukkan bahwa pada titik 1, telah terjadi *overheating* pada temperatur sebesar 400-550 °C. Pada hasil pengujian metalografi di titik 2, *pearlite* sendiri sudah mengalami degradasi sehingga membentuk *spherodized graphite*. Ini menunjukkan pada titik 2, telah terjadi *overheating* temperatur sebesar 600-650 °C.

Pada pengujian hardness, dilakukan pengujian pada kedua titik. Titik 1 berada pada bagian belakang tube dan titik 2 terletak pada bagian yang mengalami *crack* dan penipisan ketebalan tube paling besar. Tube yang mengalami kegagalan memiliki nilai kekerasan sebesar 133 HV di titik dekat dengan daerah yang mengalami *crack*. Pada bagian belakang, tube yang mengalami kegagalan memiliki nilai kekerasan sebesar 138 HV. Pada spesimen yang tidak mengalami kegagalan memiliki nilai kekerasan sebesar 138 HV di kedua titik. Tube 24 yang menghadap ke *fireside* mengalami penurunan nilai kekerasan dibandingkan dengan bagian yang menghadap ke membrane dan referensi tube 22. Ini disebabkan karena pada tube 24 mengalami *spheroidizing* sehingga menyebabkan terjadinya penurunan kekerasan dan tube menjadi lebih *ductile*.

Pada pengujian EDS deposit tube 24 ditemukan kandungan *zinc* (Zn) yang tidak sesuai dengan spesifikasi *feedwater*. Pengujian EDS pada deposit header tube terdapat kandungan mineral berupa *magnesium* (Mg), dan *calcium* (Ca). Unsur Ca sendiri termasuk ion yang mempercepat terjadinya reaksi yang membentuk lapisan oksida. Sedangkan pada spesifikasi air *waterwall tube* hanya terkandung *silicon dioxide* (SiO_2), *hydrazine* (N_2H_4), *oxygen* (O), *iron* (Fe), *copper* (Cu)

Sehingga kegagalan pada *waterwall tube* diakibatkan oleh *short-term overheating* temperature sebesar 400-550 °C pada bagian belakang tube yang mengalami kegagalan dan peningkatan temperature sebesar 600-650 °C pada bagian *fireside*. Peningkatan temperature ini disebabkan oleh terbatasnya aliran *feedwater* yang terjadi akibat deposit pada *header waterwall tube* sehingga bagian dalam tube mengalami peningkatan temperature. Adanya *steam blanket* yang diakibatkan oleh aliran panas dan aliran fluida tidak seimbang. Dalam tabung *waterwall*, uap terbentuk sebagai gelembung diskrit yang kemudian gelembung tersapu oleh cairan yang bergerak, dan siklus itu berulang. Pada fluks panas yang terlalu tinggi atau aliran fluida yang terlalu rendah, pembentukan

steam blanket terlalu cepat untuk dihilangkan oleh fluida yang bergerak. *Steam* merupakan isolator yang sangat baik sehingga perpindahan panas pada *waterwall tube* tidak berjalan dengan baik dan menyebabkan peningkatan temperature pada tube yang kemudian dapat menyebabkan kegagalan. Dengan meningkatnya temperature pada bagian dalam tube, tekanan pada bagian dalam tube juga mengalami peningkatan. Tekanan yang tidak sesuai dengan design awal menyebabkan tube mengalami penipisan.

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dari analisa kegagalan *waterwall tube* pada *circulating fluidized bed* boiler yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan yang diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Penyebab terjadinya kegagalan pada *waterwall tube* adalah *short term overheating*. Peningkatan temperature ini diakibatkan oleh terbatasnya aliran *feedwater* yang disebabkan oleh penumpukan deposit header dan deposit pada tube.
2. Dari pengujian EDS, didapatkan kandungan-kandungan mineral pada deposit *header* tidak sesuai dengan design awal. Deposit pada *header* ini menyebabkan aliran *feedwater* sudah tidak sesuai dengan design awal sehingga menyebabkan peningkatan temperature pada tube.
3. Dari pengujian metalografi pada tube 24, terdapat perubahan fase pearlitic menjadi *spheroid graphite* dimana tidak ada void, ini menunjukkan bahwa tube tidak mengalami creep. Pada tube yang tidak mengalami kegagalan, mempunyai strutur mikro berupa pearlite dan ferrite. Ini menunjukkan bahwa tube mengalami *spheroidizing* sehingga kekerasan menurun dan tube menjadi lebih elastis.
4. Pada material yang mengalami kegagalan fase pearlite sudah terdegradasi menjadi fase *spheroidized graphite*, sehingga memiliki nilai kekerasan sebesar 133 HV, dimana kekerasan material sesuai standard ialah sebesar 130 HV.

Daftar Pustaka

1. Graham R. Lobbey, Waleed L. Al-Otaibi. 2008. **Diagnosing Boiler Tube Failures Related to Overheating**. Advanced Materials Research, Vol 41-42.
2. J. Paul Guyer. 2014. **An Introduction to Steam Boilers and Turbines for Power Plants 2nd edition**. New York : Continuing Education and Development, Inc.
3. J.J. Perdomo, T.D. Spry. 2005, **An Overheat Boiler Tube Failure**, Journal Failure Preventive.
4. K. Esaklul, **Volume 2**, Handbook of Case Histories in Failure Analysis, 1993
5. M. J. Esmacher. 1998. **Avoiding Potential Problems in Diagnosing Boiler Tube Failure Mechanisms**, International Water Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
6. Neves, Daniel Leite Cypriano dkk. 2002. **Stress and Integrity Analysis of Steam Superheater**. Brazil: Duque de Caxias
7. Parikshit Munda, Md Murtuja Husain, Rajinikanth V, Avijit Kumar Metya. 2018. Evolution of Microstructure During Short-Term Overheating Failure of a Boiler Water Wall Tube Made of Carbon Steel. **Journal of Failure Analysis and Prevention**. India
8. Patel Sunny Sanjay, Dr R. K. Mandloi. A Failure Analysis and Remaining Life Assessment of Boiler Water Wall Tube. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**. 2016.

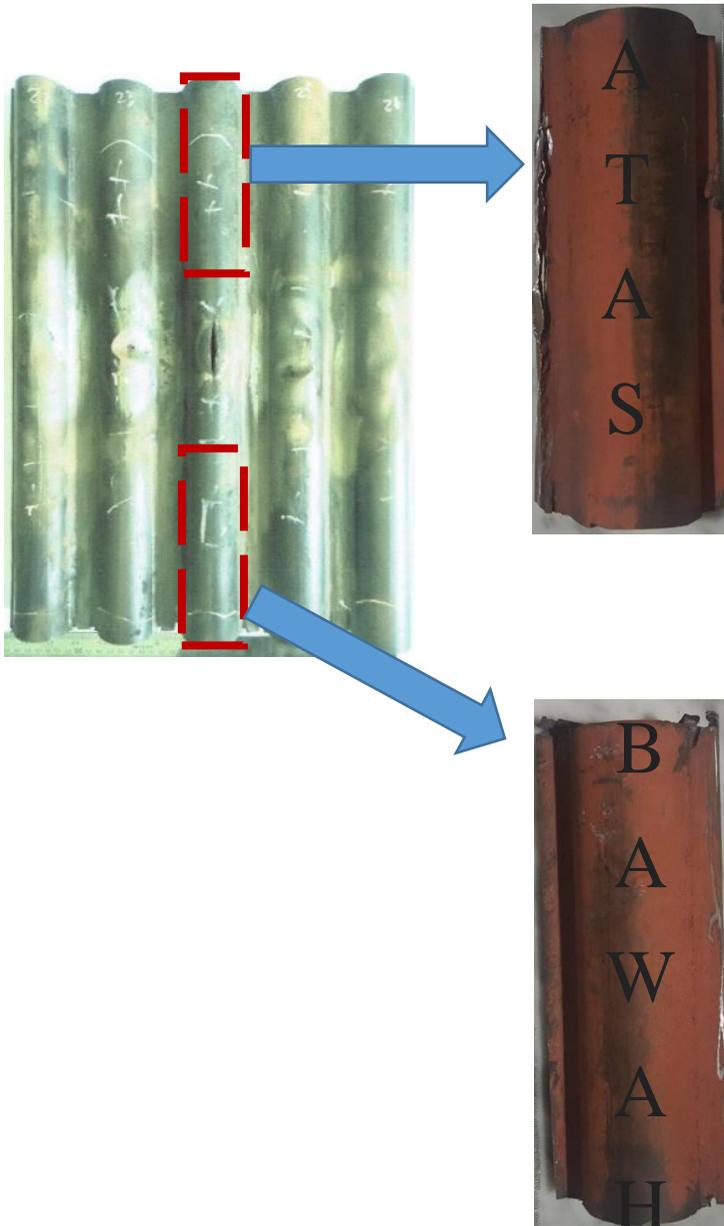
9. R. B. Dooley, W. P. McNaughton. 1996. **Boiler Tube Failures: Theory and Practice**, EPRI, Palo Alto, CA.
10. R. Khadem Hosseini, Sh. Yareiee. 2019. Failure Analysis of Boiler Tube at a Petrochemical Plant. **Engineering Failure Analysis**. Tehran, Iran
11. S.W.Liu, W.S. Wang, C.J. Liu. 2017. **Failure Analysis of the Boiler Water-Wall Tube**. Case Studies in Engineering Failure Analysis. Shanghai, China.
12. Sidney H Avner, **Second Edition** , Introduction To Physical Metallurgy. 1964.
13. U. K. Chatterjee. 2012. Microstructural Imprints In Failure Of Power Plant Boiler Tubes. **15th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering**. Military Technical College Kobry El-Kobbah, Cairo, Egypt.

LAMPIRAN

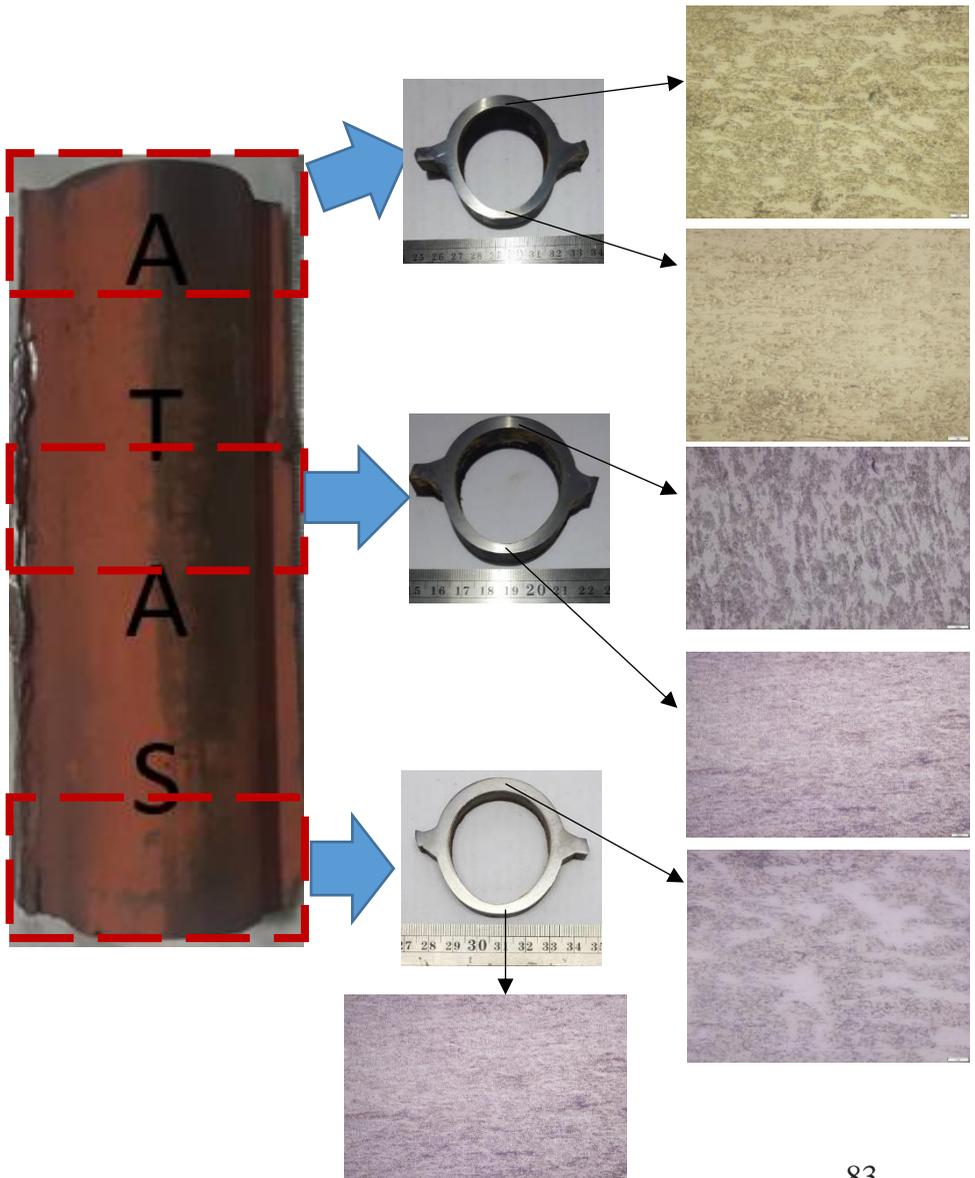
**LAMPIRAN A PEMBAGIAN SPESIMEN WATERWALL
TUBE**

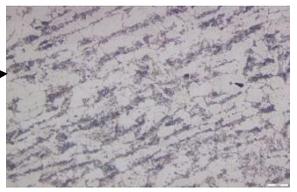
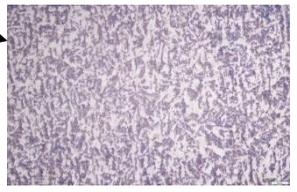
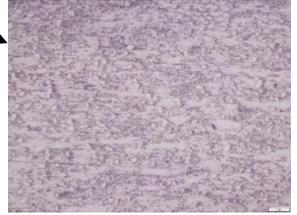
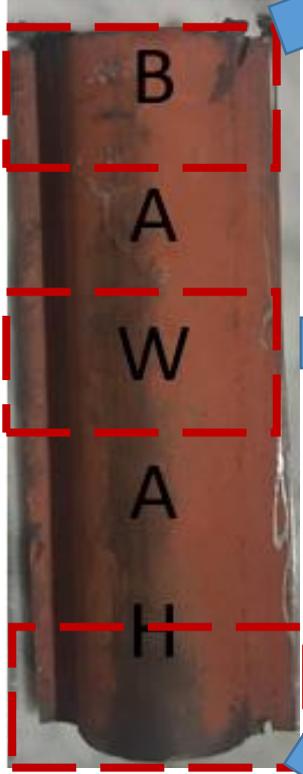
**LAMPIRAN B MIKROSTRUKTUR PADA SETIAP
BAGIAN TUBE**

LAMPIRAN A
PEMBAGIAN SPESIMEN WATERWALL TUBE



LAMPIRAN B
MIKROSTRUKTUR PADA SETIAP BAGIAN TUBE





BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Gregorius Romario Wicaksono Sinaga dilahirkan di Surabaya, 24 Juni 1994. Penulis merupakan anak dari Cornelius Togap Sinaga dan Runia Arif yang merupakan anak ke-2 dari 5 bersaudara. Pendidikan formal penulis dimulai di TK St. Karolus Surabaya (1999-2001). Kemudian berlanjut di SD Permata Bunda Depok (2001-2007). Setelah lulus pendidikan sekolah dasar, penulis melanjutkan sekolah di SMP Marsudirini Cawang, Jakarta Timur (2007-2010) dan dilanjutkan ke sekolah menengah atas di SMA Kolese Gonzaga, Pejaten, Jakarta Selatan (2010-2012). Kemudian penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Selama perkuliahan penulis tidak hanya duduk diam mendapatkan pendidikan formal di kelas, namun juga berusaha mengembangkan *softskill* dan *hardskill*. Menginjak tahun kedua dan ketiga perkuliahan, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan institut yaitu *Mechanical City* dan *Indonesia Energy Marathon Challenge* (IEMC). Pada saat penulis menginjak tahun ketiga perkuliahan, penulis turut aktif sebagai Dewan Presidium. Penulis juga sempat mengikuti program magang di PT PINDAD (Persero) pada tahun 2017.

Dengan diterbitkannya buku tugas akhir ini, penulis berharap akan dapat memberikan sumbangsih ilmu pengetahuan melalui media penelitian yang telah dilakukan. Info lebih lanjut terkait penelitian ini dapat menghubungi penulis melalui email gregorius.romario@outlook.com.