



TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS KEGAGALAN WATERWALL TUBE PADA BOILER SUBCRITICAL KAPASITAS PEMBANGKIT 625 MW

ZHULKIVLY THEODORICK RUMAHORBO
NRP. 02111540000111

DOSEN PEMBIMBING
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

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



TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISIS KEGAGALAN WATERWALL TUBE
PADA BOILER SUBCRITICAL KAPASITAS
PEMBANGKIT 625 MW**

ZHULKIVLY THEODORICK RUMAHORBO
NRP. 02111540000111

DOSEN PEMBIMBING
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

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



FINAL PROJECT - TM184835

FAILURE ANALYSIS OF WATERWALL TUBE SUBCRITICAL BOILER 625 MW

ZHULKIVLY THEODORICK RUMAHORBO
NRP. 02111540000111

SUPERVISOR
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL AND SYSTEM ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020

**ANALISIS KEGAGALAN WATERWALL TUBE PADA
BOILER SUBCRITICAL KAPASITAS PEMBANGKIT 625
MW**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :
Zhulkivly Theodorick Rumahorbo
NRP. 02111540000111

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Suwarno ST., MSc., Ph.D.
NIP. 198005202005011003
2. Dr. Eng. Sutikno, ST, MT.
NIP. 197407032000031001
3. Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA
NIP. 196308151989032001
4. Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA
NIP. 195012111985121001



AGUSTUS, 2020

vi

ANALISIS KEGAGALAN WATERWALL TUBE PADA BOILER SUBCRITICAL KAPASITAS PEMBANGKIT 625 MW

Nama Mahasiswa : Zhulkivly T Rumahorbo
NRP : 0211540000111
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., MSc., PhD.

ABSTRAK

Waterwall tube merupakan komponen boiler yang berfungsi sebagai tempat perubahan fase air menjadi steam. Fluida yang mengalir didalam waterwall tube pada boiler tipe subcritical memiliki fasa campuran. Waterwall tube didesain untuk dapat beroperasi dibawah tekan uap jenuh dari air. Kegagalan pada waterwall tube dapat mengakibatkan kerugian yang sangat besar karena membuat sistem harus shutdown. Shutdown sistem dilakukan untuk mencegah kerusakan pada komponen lainnya. oleh karena itu perlu dilakukan analisis kegagalan terhadap waterwall tube untuk menghindari terjadinya jenis kegagalan yang serupa.

Tahap pengambilan data pada penelitian analisis kegagalan ini terdiri dari pengambilan data desain dan operasional boiler. Kemudian dilakukan pengamatan makroskopis untuk mengamati bentuk dan penampakan kerusakan secara kasatmata. Pengujian metalografi dilakukan untuk melihat perubahan pada mikrostruktur; Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen; Pengujian spektrometer untuk melihat komposisi kimia spesimen; Pengujian tarik untuk melihat nilai kekuatan spesimen; Pengujian SEM-EDS dilakukan untuk melihat lapisan oksida dan unsur yang terkandung pada spesimen; dan pengujian X-RD untuk melihat senyawa yang terdapat pada produk korosi permukaan luar tube.

Kerusakan waterwall tube terjadi di tiga titik sisi kanan (right) boiler dengan kode 3-R, 2-R dan 1-R. Bentuk kegagalan

pada tube 3-R berupa thick edged dan fish mouth rupture. Terdapat microfissure (intergranular crack) pada batas butir mikrostruktur tube 3-R. Intergranular crack tersebut terbentuk akibat berdifusinya gelembung metana hasil reaksi dari hydrogen dengan carbon dari baja carbon. Reaksi tersebut terjadi karena rusaknya lapisan pelindung dinding dalam tube akibat terjadinya penurunan kualitas dari air boiler seperti penurunan pH dan kandungan sodium yang melebihi batas yang diperbolehkan. Penurunan nilai kekerasan pada tube 3-R juga menjadi indikasi bahwa terjadi pelunakan pada tube 3-R. Bentuk kegagalan pada tube 2-R berupa thin-lipped dan terdapat pengurangan ketebalan tube pada sisi kegagalan. Erosi yang terjadi pada tube 2-R merupakan akibat dari semburan steam dan air dari kegagalan tube 3-R. Titik 1-R dan 2-R berada pada satu line tube, sehingga ketika terjadi erosi yang berakibat pada rusaknya tube 2-R maka flow rate pada tube tersebut akan berkurang. Berkurangnya flowrate pada tube tersebut mengakibatkan terjadinya overheating, sehingga terjadi kegagalan pada titik 1-R. Hal ini didukung oleh data metalografi yang menunjukkan terjadi deformasi dan adanya void pada mikrostruktur tube 1-R.

Kata Kunci: *Analisis kegagalan, Subcritical, Waterwall Tube, Overheating, Hydrogen Damage, Erosi.*

FAILURE ANALYSIS OF WATERWALL TUBE SUBCRITICAL BOILER 625 MW

Name : Zhulkivly T Rumahorbo
NRP : 0211540000111
Department : Mechanical Engineering
Supervisor : Suwarno, ST., MSc., PhD.

ABSTRACT

Waterwall tube is a component of a boiler that functions as to change the phase of water into steam. The fluid that flows in the waterwall tube of the subcritical boiler has a mixed phase. The waterwall tube is designed to operate under the pressure of saturated pressure of the steam. Failure of the waterwall tube can result in huge losses because it makes the system shutdown. A system shutdown is performed to prevent damage to other components. So it is necessary to analyze the failure of the waterwall tube to avoid the occurrence of a similar type of failure.

Analysis is started by collecting operation process data like material specification, preliminary design, and media operation. Research methodology is determined baseed on fishbone diagram to know the possible cause of damage. Macroscopic observation to see the shape and appearance of outer and inner surface of the failure. chemical testing to determine change in the chemical composition at each point of specimen. Metalographic testing to analyze the microstructure. The hardness testing to determine the resistance of a material to deformation by pressure or scratch. Observation of oxidation scale in inner surface using SEM-EDS method, whille the observation of corrosion product in outer surface using X-RD method. In addition tensile testing to analysis the strength of the specimen.

Waterwall tube damage occurred at three points on the right side of the boiler with codes 3-R, 2-R, and 1-R. The shape of failure on the 3-R tube was thick edged and fish mouth rupture. There is a microfissure (intergranular crack) at the grain

*boundaries of the 3-R tube microstructure. The intergranular crack is formed due to diffuse bubbles of methane as a result of the reaction of hydrogen with carbon from carbon steel. This reaction occurs due to damage to the protective wall layer in the tube due to a decrease in the quality of boiler water such as a decrease in pH and sodium content that exceeds the allowable limits. A decrease in the hardness value on the 3-R tube is also an indication that there is softening on the 3-R tube. The failure form on the 2-R tube was thin-lipped and there was a reduction in tube thickness on the failure side. The erosion that occurs in the 2-R tube is the result of steam and water bursts from the failure of the 3-R tube. Points 1-R and 2-R are on one line tube so that when erosion occurs which results in damage to the 2-R tube, the flow rate on the tube will decrease. The reduced flow rate in the tube resulted in overheating, failing point 1-R. This is supported by metallographic data that shows deformation and voids in the 1-R tube microstructure.***Keywords:** Failure analysis, Subcritical, Waterwall Tube, Overheating, Hydrogen Damage, Erosion.

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat dan kasihnya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini. Penulis berharap dengan adanya laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, meskipun laporan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna.

Keberhasilan penulis dalam menulis laporan ini tidak lepas dari dukungan dari berbagai pihak. Secara khusus penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Terkasihi dan teristimewa Bapak, Mama, Oppung, adik-adik Serta seluruh keluarga yang senantiasa memberikan doa dan dukungan sehingga penulisan laporan tugas akhir ini dapat berjalan dengan baik.
2. Bapak Suwarno, ST., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing. Terima kasih untuk waktu, kritik, saran serta motivasinya hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Dr. Eng. Sutikno, ST, MT., Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA, Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA dan Indra Sidharta, ST., M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan sarannya demi kesempurnaan tugas akhir ini.
4. Kawan seperkopian mas Safaat, Bagong, Faizal, Sodiq, dan Ijaz terima kasih dukungan serta rasa perjuangan bersama dalam menyelesaikan tugas akhir pada masa pandemik ini.
5. Teman-teman TIKUNGAN SIMANU, terima kasih telah menjadi tempat bernaung selama tahun-tahun terakhir di kampus perjuangan.
6. Rekan-rekan SEJENAK CANGKRUK, terima kasih untuk dinamika kehidupan tak ternilai yang kita jalani bersama.

7. Rekan-rekan HMM angkatan M58 terima kasih untuk setiap dukungan kalian.
8. Teman-teman M58 terima kasih telah menemani perjuangan penulis di kampus perjuangan.
9. Keluarga Besar ABISS atas cerita dan pengalamannya kepada penulis.
10. Terima kasih Wifi L. Pasaribu untuk waktu dan sarannya
11. Sri Ramayani Sinaga terima kasih untuk doa dan menjadi motivasi bagi penulis.
12. Semua pihak yang membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, namun belum saya cantumkan diatas, saya mengucapkan terima kasih atas semua bantuannya

DAFTAR ISI

ABSTRAK	viii
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
Latar Belakang	1
Rumusan Masalah	5
Tujuan Penelitian.....	5
Batasan Masalah.....	5
Manfaat Penelitian.....	5
BAB II DASAR TEORI.....	7
2.1 <i>Subcritical Boiler</i>	7
3.5 Waterwall Tube Boiler	8
2.3 ASTM A210 Grade A-1	9
2.4 <i>Hydrogen damage</i>	9
4.4.1 <i>High Temperature Hydrogen Attack (HTHA)</i>	13
4.4.2 <i>Low Temperature Hydrogen Damage</i>	13
2.5 <i>Creep</i>	16
2.6 <i>Short Term Overheating</i>	17
2.7 Penelitian Terdahulu.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	22

3.2	Langkah – Langkah penelitian	23
3.3	Peralatan Penelitian	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		33
4.1	Kode dan Lokasi Tube.....	33
4.2	Data Operasi Boiler dan Spesifikasi <i>tube</i>	34
4.2.1	Data Operasi Boiler PLTU PT.X.....	34
4.3	<i>Cause and Effect Diagram</i> atau <i>Fishbone Diagram</i>	37
4.4	Data Pengujian <i>Waterwall tube</i> Kode 1-R	38
4.4.1	Pengamatan Makro.....	38
4.4.2	Pengujian Spektrometer.....	40
4.4.3	Pengujian Metalografi	41
4.4.4	Pengujian Kekerasan	42
4.4.5	Pengujian Tarik	44
4.4.6	Pengujian X-RD	44
4.5	Data Pengujian <i>Waterwall Tube</i> kode 2-R.	45
4.5.1	Pengamatan Makro.....	45
4.5.2	Pengujian Metalografi	46
4.5.3	Pengujian Kekerasan	48
4.5.4	Pengujian SEM.....	49
4.6	Data Pengujian <i>Waterwall Tube</i> kode 3-R.	50
4.6.1	Pengamatan Makro.....	50
4.6.2	Pengujian Spektrometer.....	51
4.6.3	Pengujian Metalografi	53
4.6.4	Pengujian Kekerasan	54

4.6.5	Pengujian SEM-EDS	56
4.7	Pembahasan	57
4.7.1	Analisis Hasil Pengujian Kode 1-R	57
4.7.2	Analisis Hasil Pengujian Kode 2-R	58
4.7.3	Analisis Hasil Pengujian Kode 3-R	58
4.7.4	Mekanisme Kegagalan <i>Waterwall Tube</i>	59
	BAB V KESIMPULAN	62
	Daftar Pustaka	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kapasitas Terpasang Pembangkit Listrik Indonesia serta Persentase Pasokan Listrik Berdasarkan Sumber energinya Pada Tahun 2019 [13].....	1
Gambar 1. 2 Siklus feedwater pada boiler subcritical 625 MW....	3
Gambar 1. 3 Grafik Damage Mechanism Boiler dari Tahun 2011-2019 Pada PLTU Banten Suralaya Unit 8 [10]	4
Gambar 2. 1 T-S Diagram Pada Daerah Fluida Kerja yang Berbeda.....	7
Gambar 2. 2 Waterwall tube pembangkit listrik tenaga uap pada daerah Sootblower.....	8
Gambar 2. 3 Discontinuous intergranular microcracks karena terbentuk nya metana pada batas butir [17].....	11
Gambar 2. 4 Tube yang mengalami kegagalan akibat Hydrogen Damage [17]	12
Gambar 2. 5 Struktur mikro pada material yang terkena HTHA tampak mengalami dekarburisasi [14].....	13
Gambar 2. 6 Bentuk Hydrogen Blisters pada vessel [20]	14
Gambar 2. 7 Bentuk kegagalan hydrogen induced cracking [20]	14
Gambar 2. 8 Sketsa Bentuk Kegagalan pada Sulphide Stress Cracking [20].....	15
Gambar 2. 9 Sketsa Bentuk Kegagalan pada Stress-Oriented Hydrogen-Induced Cracking [20].....	15
Gambar 2. 10 kurva creep pada temperatur tinggi [16].....	16
Gambar 2. 11 Mekanisme grain boundary sliding [16]	17
Gambar 2. 12 Nilai yield strees baja karbon dengan fungsi temperatur [17]	18
Gambar 2. 13 Bentuk kegagalan dengan mekanisme short term overheating pada tube [17]	19

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	23
Gambar 3. 2 Bentuk Spesimen Uji Tarik Standar ASTM 370	27
Gambar 3. 3 Mesin Metkon Grip 300-1V Grinder & Polisher..	28
Gambar 3. 4 Mesin Micro Vickers Hardness	29
Gambar 3. 5 Mesin Olympus Stereo Microscope	30
 Gambar 4. 1 Ilustrasi titik kegagalan tube pada sisi kanan (Bukit/Right)	34
Gambar 4. 2 Fishbone diagram dari analisis kegagalan waterwall tube pada boiler PLTU PT.X.....	38
Gambar 4. 3 Potongan tube 1-R yang mengalami kegagalan	38
Gambar 4. 4 Titik Pengukuran ketebalan pada Tube 1-R Potongan B	39
Gambar 4. 5 Struktur mikro 1-R; a) Titik pengamatan, b) titik 1, c) titik 2, d) titik 3 dan e) titik 4 pembesaran 100 X.....	42
Gambar 4. 6 Titik pengujian kekerasan tube 1-R Potongan D....	43
Gambar 4. 7 Potongan tube 2-R (a) bentuk kegagalan, (b) Titik Pengukuran ketebalan dan lokasi terak okside pada tube 2-R potongan 2	45
Gambar 4. 8 Grafik hasil pengujian X-RD pada produk korosi tube 1-R	45
Gambar 4. 9 Struktur mikro 2-R a) titik pengamatan, b) titik 1, c) titik 2, d) titik 3 dan e) titik 4, perbesaran 50X.	47
Gambar 4. 10 Area uji kekerasan tube 2-R; a) Potongan 1 dan b) Potongan 2	48
Gambar 4. 11 Titik pengujian SEM pada tube 2-R Potongan 1 ..	49
Gambar 4. 12 Hasil pengujian SEM pada Tube 2-R; a) Titik 1 pembesaran 1000X, b) titik 2 pembesaran 500X	49
Gambar 4. 13 Potongan tube 3-R (a) bentuk kegagalan, (b) terak pada permukaan dalam tube 3-R	50

Gambar 4. 14 Titik Pengukuran ketebalan pada Tube 3-R	
Potongan 2	51
Gambar 4. 15 Struktur mikro 3-R a) titik pengamatan, b) titik 1,	
c) titik 2, d) titik 3, e) titik 4 dan f) titik 5 perbesaran 50X.	54
Gambar 4. 16 Area uji kekerasan tube 3-R (a) potongan 1, dan (b)	
potongan 2	54
Gambar 4. 17 Titik pengujian SEM pada tube 3-R Potongan 2 ..	56
Gambar 4. 18 Hasil pengujian SEM pada Tube 3-R; a) Titik 1	
pembesaran 500X dan b) titik 2 pembesaran 500X.....	56
Gambar 4. 19 Hasil pengujian SEM-EDS pada lapisan oxide	
permukaan dalam Spesimen 3-R	57
Gambar 4. 20 Ilustrasi kegagalan tube 3-R dan 2-R	59

DAFTAR TABEL

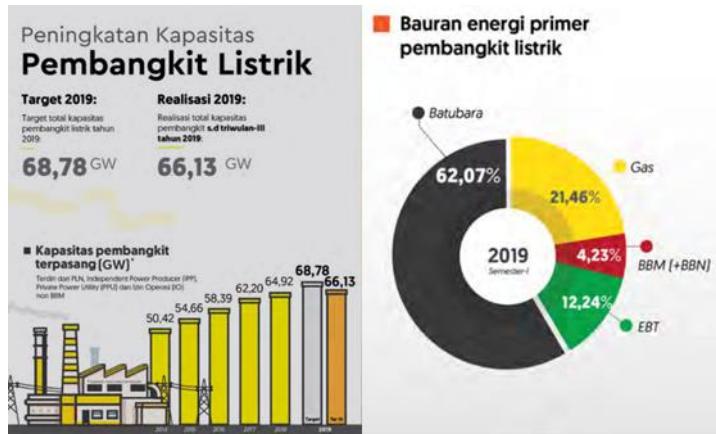
Tabel 2. 1 Komposisi kimia baja karbon ASTM 210 Grade A-1..9	
Tabel 2. 2 Mekanisme kerusakan akibat hidrogen pada logam yang rentan.	10
Tabel 4. 1 Daftar Waterwall tube dan pengujian yang dilakukan.	33
Tabel 4. 2 Data desain operasi boiler dan spesifikasi waterwall tube.	35
Tabel 4. 3 Jenis, parameter dan kualitas air pada sistem pembangkit (data juli 2019)	36
Tabel 4. 4 Hasil pengukuran ketebalan pada tube 1-R.	40
Tabel 4. 5 Perbandingan komposisi kimia spesimen 1-R dengan standar ASTM A 210 A1.....	40
Tabel 4. 6 Nilai kekerasan spesimen 1-R potongan D	43
Tabel 4. 7 Hasil uji tarik pada sample tube 1-R.	44
Tabel 4. 8 Ketebalan waterwall tube kode 2-R dalam mm.	46
Tabel 4. 9 Nilai kekerasan tube 2-R	48
Tabel 4. 10 Hasil pengukuran ketebalan pada tube 3-R	51
Tabel 4. 11 Perbandingan komposisi kimia spesimen 3-R dengan standar ASTM A 210 A1.....	51
Tabel 4. 12 Nilai kekerasan tube 3-R	55
Tabel 4. 13 Unsur penyusun oksida pada permukaan dalam spesimen 3-R	57

BAB I

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kapasitas terpasang pembangkit listrik hingga tahun 2019 mencapai 66,13 GW atau meningkat sebesar 1,21 GW dari tahun 2018. Kapasitas terpasang pembangkit listrik pada tahun 2018 berasal dari bahan bakar fosil yaitu batubara (62,07 %), Gas (21,46%), BBM (4,23%), serta Energi Baru Terbarukan (12,24%) seperti pada gambar 1.1 Batubara adalah salah satu sumber energi yang paling banyak digunakan untuk membangkitkan listrik di Indonesia. Pembangkit listrik yang memanfaat batubara sebagai sumber energi utamanya disebut sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). PLTU akan memanfaatkan energi kalor dari hasil pembakaran batubara untuk menghasilkan uap air bertekanan. Uap Bertekanan tersebut nantinya akan memutar turbin uap yang dipasang seporos dengan generator. Sehingga generator akan mengubah putaran turbin uap tersebut menjadi energi listrik.



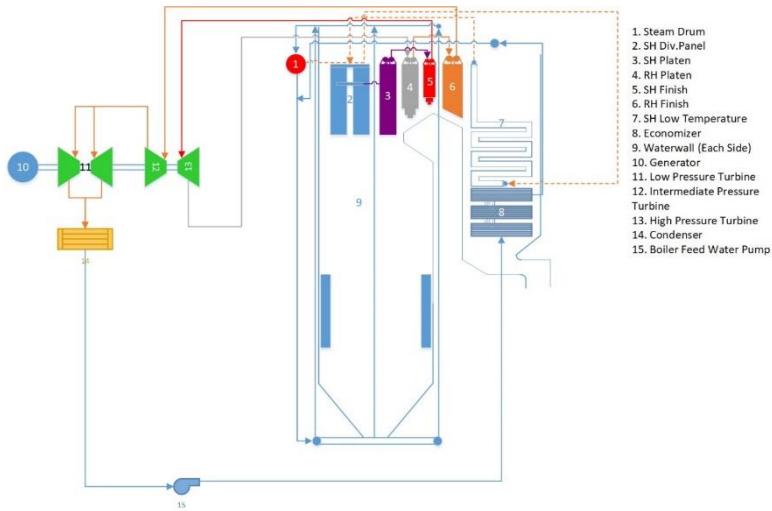
Gambar 1. 1 Kapasitas Terpasang Pembangkit Listrik Indonesia serta Persentase Pasokan Listrik Berdasarkan Sumber energinya Pada Tahun 2019 [13]

Pemenuhan kapasitas pembangkit listrik hingga tahun 2018 didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap. PLTU PT. X merupakan salah satu PLTU yang berkontribusi dalam pemenuhan kapasitas tersebut. PLTU PT.X pertama kali beroperasi pada 22 Agustus 2011. PLTU PT. X terletak di Desa Suralaya Kecamatan Pulo Merak, Kotamadya Cilegon Propinsi Banten. PLTU PT. X secara geografis treletak pada $5^{\circ}45'14''$ Lintang Selatan dan $106^{\circ}2'32''$ Bujur Timur. Kapasitas daya yang terpasang pada PLTU PT. X adalah 625 MW. PLTU PT. X menggunakan batubara dengan kalori rendah/*low rank coal* (LRC) 3900-4500 Kcal/Kg (*LHV/Low Heating Value*) dengan konsumsi rata-rata 8000 ton/hari pada *maximum capacity rate* 625 MWe.

Proses produksi listrik menggunakan 4 sistem utama yaitu boiler, turbin uap, generator dan kondensor. Boiler adalah salah satu alat penukar panas. Boiler berfungsi mengubah air menjadi uap air bertekanan. Boiler memanfaatkan kalor yang dihasilkan oleh pembakaran batubara. Kalor tersebut kemudian ditransfer ke air melalui pipa-pipa besi yang ada disetiap dinding boiler. Sehingga secara garis besar boiler memiliki 2 (dua) Komponen utama, yaitu ruang bakar furnace yang berfungsi sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas pembakaran dan alat penguapan yang terdiri dari pipa-pipa penguap *riser tube/waterwall tube* yang mengubah energi panas tersebut menjadi energi potensial uap. Boiler dilengkapi dengan komponen lain seperti: *Economizer*, *Superheater*, *Reheater* dan *Air pre-heater*, Untuk memaksimalkan penyerapan panas dan meningkatkan effisiensi didalam boiler.

Boiler di PLTU PT. X seperti pada gambar 1.2 diproduksi oleh *Shanghai Boiler Works, Ltd* dengan tipe *Sub-critical Pressure Intermediate Single Reheat Control Reirculation Boiler, Four Corner Tangential Combustion, Positive Pressure Direct-Fired*

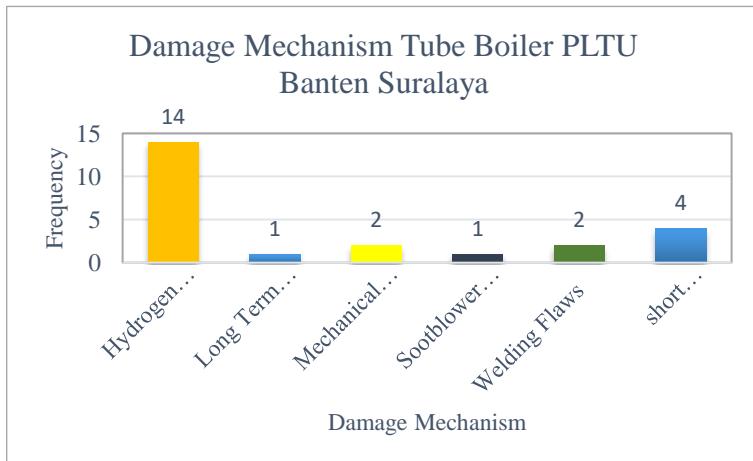
Pulverized System, Single Furnace, II Type Arrangement in Open Air, Solid Ash Extraction, All Steel Structure, and Balanced Draft.



Gambar 1. 2 Siklus feedwater pada boiler subcritical 625 MW

Pengoperasian boiler memerlukan pengamatan terhadap parameter operasi setiap saat agar menjamin boiler beroperasi dengan baik. Selain itu pengamatan parameter operasi juga berguna untuk menjaga performance dan keandalan dari *tube-tube* boiler. Parameter yang perlu diamati dari proses pembakaran adalah nilai kalori batubara, aliran, tekanan serta suhu udara pembakaran. Kenaikan tekanan dan suhu yang tidak terkendali dapat mengakibatkan kerusakan pada *tube-tube* boiler. Kenaikan tekanan dan suhu yang tidak terkendali dapat diakibatkan oleh tidak terkendalinya volume air pada boiler. Kelebihan air didalam boiler dapat mengakibatkan *carry over* pada steam sehingga merusak sudu-sudu turbin. Kekurangan air didalam boiler dapat mengakibatkan *overheating* karena tube akan menerima beban kalor lebih besar. Parameter lain yang perlu dijaga adalah kualitas air yang masuk kedalam boiler. Kandungan kontaminan pada air

yang masuk kedalam boiler dapat merusak dan mengurangi *lifetime* dari *tube* boiler. Output pembakaran berupa *fly ash* juga dijaga agar kandungannya tidak mengakibatkan kegagalan pada boiler. Main steam yang dihasilkan oleh boiler dijaga untuk memastikan kesesuaian dengan kebutuhan beban pembangkit.



Gambar 1. 3 Grafik Damage Mechanism Boiler dari Tahun 2011-2019 Pada PLTU Banten Suralaya Unit 8 [10]

PLTU Banten Suralaya Unit 8 telah beroperasi selama kurang lebih 8 tahun. Gambar 1.3 menunjukkan jenis mekanisme kerusakan pada *tube* boiler PLTU PT. X. Mekanisme kerusakan berupa *hydrogen damage* merupakan mekanisme kerusakan yang paling sering terjadi yaitu 14 kali dalam kurun waktu 8 tahun. Kegagalan *tube* boiler dapat mengakibatkan kerugian yang besar, yaitu berupa kehilangan produksi dan biaya *maintenance* yang tinggi untuk melakukan *retubing*. Dampak lain yang diakibatkan dari kebocoran *tube* boiler adalah penurunan kinerja unit baik pada penilaian EAF (Equivalent Availability Factor) dan menaikkan EFOR (Equivalent Force Outage Rate). Total loses time produksi tahun 2017-2019 yang disebabkan dari boiler bocor mencapai 1164 jam dengan kesempatan kehilangan produksi mencapai

687.156.550 Kwh. Dari permasahan yang besar ini maka perlu dilakukan penelitian dan identifikasi penyebab kerusakan tube boiler pada area *waterwall tube*.

Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Apakah yang menjadi penyebab kegagalan dari tube waterwall pada boiler subcritical 625 MW?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan terjadinya kegagalan dari tube waterwall pada boiler subcritical 625 MW?

Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui penyebab kegagalan dari tube waterwall pada boiler subcritical 625 MW.
2. Mengetahui Mmekanisme terjadinya kegagalan dari tube waterwall pada boiler subcritical 625 MW.

Batasan Masalah

Untuk dapat menyelesaikan permasalahan yang muncul dalam penelitian ini dan mencapai tujuan yang diinginkan, maka diperlukan batasan masalah dalam penelitian ini, antara lain:

1. Desain awal yang digunakan pada tube waterwall sudah sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.
2. Komponen memiliki komposisi kimia yang homogen dan tidak memiliki cacat awal.

Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik untuk berbagai kalangan. Adapun manfaat yang bisa diberikan yaitu sebagai berikut:

1. Bagi industri pembangkit listrik khususnya PLTU PT.X, dengan adanya penelitian ini diharapkan hasilnya dapat digunakan sebagai acuan atau pertimbangan dalam

pengoperasian dan perawatan untuk menghindari jenis kegagalan yang sama.

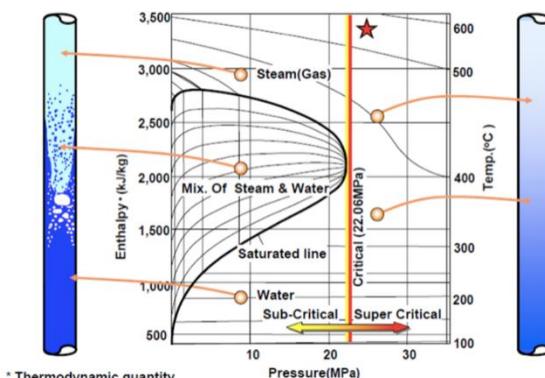
2. Bagi kalangan akademis khususnya mahasiswa dengan adanya penelitian ini diharapkan mahasiswa dapat mengaplikasikan dan memahami ilmu yang telah didapat untuk memecahkan masalah kegagalan pada komponen tersebut.
3. Terjalinnya hubungan serta kerja sama yang baik antara institusi pendidikan dengan instansi perusahaan.

BAB II

DASAR TEORI

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan uap air bertekanan untuk menghasilkan listrik. Uap air bertekanan tersebut dihasilkan oleh boiler dan akan memutar turbin uap. Turbin uap dipasang seporos dengan generator sehingga generator dapat menghasilkan listrik. Suhu dan tekanan dari uap air tersebut akan berkurang setelah memutar turbin uap. Uap tersebut kemudian didinginkan dan diubah menjadi air didalam kondensor menggunakan air laut. Selanjutnya air tersebut akan diubah menjadi uap bertekanan didalam boiler. Sumber kalor yang digunakan untuk menghasilkan uap bersumber dari batubara. Batubara menjadi bahan bakar utama PLTU karena harga yang bervariasi dan ketersiaanya yang melimpah saat ini.

2.1 Subcritical Boiler



Gambar 2. 1 T-S Diagram Pada Daerah Fluida Kerja yang Berbeda

Boiler dibedakan menjadi 3 tipe berdasarkan dari fase fluida kerjanya. Subcritical boiler adalah boiler dengan fluida kerja (air atau uap air) yang beroperasi dibawah critical point yaitu 647 K (374 0C) dan 22.06 Mpa (3200 psia). Sehingga fase yang terbentuk pada boiler berupa campuran air atau uap air (gambar 2.1). Boiler dengan tipe boiler subcritical membutuhkan steam drum untuk memisahkan kedua fase fluida kerja tersebut.

3.5 Waterwall Tube Boiler

Boiler disusun oleh pipa-pipa (Waterwall tube) yang berdiameter rata-rata 50-60 mm. Waterwall tube tersebut memiliki desain material dan bentuk khusus yang tahan terhadap perbedaan temperatur ekstrim antara ruang bahan bakar dengan fluida kerja (air atau uap Air). Material Waterwall tube juga harus memiliki sifat konduktor panas yang baik sehingga perpindahan panas dari ruang bakar menjadi efektif dan. Waterwall tube memiliki kontur ulir dibagian dalamnya agar tercipta aliran yang turbulen untuk meningkatkan efisiensi perpindahan energi panas dari ruang bakar ke fluida kerja semakin efisien.



Gambar 2. 2 Waterwall tube pembangkit listrik tenaga uap pada daerah Sootblower

2.3 ASTM A210 Grade A-1

Material ASTM A210 grade A-1 adalah baja karbon yang biasa digunakan untuk tube boiler. Nilai kekerasan maksimum menurut standard sebesar 143 HB. Komposisi standard ASTM A210 grade A-1 didefinisikan menurut tabel dibawah.

Tabel 2. 1 Komposisi kimia baja karbon ASTM 210 Grade A-1

Unsur	Komposisi
<i>Carbon</i>	0,27 % max
<i>Manganese</i>	0,93 % max
<i>Phosphorus</i>	0,035 % max
<i>Sulfur</i>	0,035 % max
<i>Silicon</i>	0,1 % min

Dengan nilai komposisi maksimum karbon 0.27%, material ASTM A210 bisa dikategorikan sebagai baja karbon rendah (*low carbon steel*). Fasa-fasa yang terbentuk dapat ditunjukkan melalui diagram Fe-Fe₃C. Fasa-fasa yang terbentuk pada baja karbon dengan kadar karbon antara 0.2-0.27% pada temperatur kamar adalah *Pearlite* dan *Ferrite*.

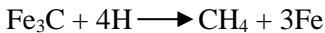
2.4 Hydrogen damage

Hidrogen menjadi salah satu penyebab kegagalan pada berbagai logam. Kerusakan akibat hidrogen dapat terjadi selama proses produksi, penggunaan serta proses perbaikan pada logam tersebut. Kerusakan akibat hidrogen dapat terjadi dalam beberapa bentuk tergantung pada jenis interaksi material dengan hidrogen tersebut. Jenis interaksi antara hidrogen dengan logam dapat berupa pembentukan larutan padat hidrogen dalam logam, hidrogen molekuler serta produk gas dari reaksi antara hidrogen dengan paduan atau elemen pengotor pada logam.

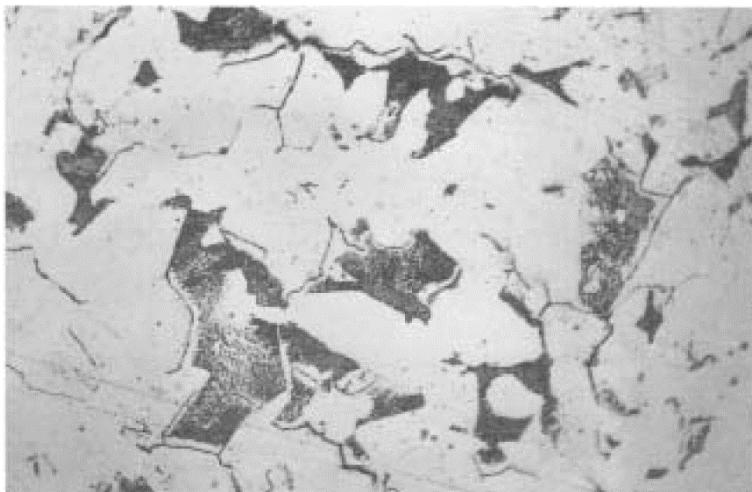
Tabel 2. 2 Mekanisme kerusakan akibat hidrogen pada logam yang rentan.

Mekanisme Kegagalan	Jenis Logam	Keterangan
<i>Hydrogen embrittlement</i>	<i>High-strength steels and heavily cold-worked low-carbon steels</i>	Terjadi bila logam diberi tegangan berkelajutan.
<i>Hydrogen-Induced Blistering</i>	<i>Low-strength steels</i>	Terjadi pada suhu kamar. Hidrogen berbentuk gas yang bergelembung
<i>Cracking From Precipitation of Internal Hydrogen</i>	<i>Heavy steel sections</i>	Disebabkan oleh paparan suhu tinggi lalu didinginkan cepat
<i>Hydrogen Attack</i>	Baja carbon dan tembaga	Reaksi kimia yang irreversibel antara hidrogen dengan paduan membentuk kantong gas bertekanan
<i>Cracking from Hydride Formation</i>	Titanium, Tantalum, Zirconium, Uranium, dan Thorium	Hidrida brittle terbentuk pada daerah yang memiliki <i>stress</i> paling tinggi

Hydrogen damage terjadi ketika reaksi korosi menghasilkan atom hidrogen didalam logam. Ketika atom hidrogen bergerak bebas, maka atom tersebut akan berdifusi dengan karbon pada baja karbon. Difusi tersebut terjadi pada batas butir membentuk methana:



Metana yang terbentuk relatif besar dan sulit untuk berdifusi dengan tube. Sehingga terjadi penumpukan tekanan didalam tube yang mengakibatkan meningkatnya *intergranular* strain. Untuk mengurangi stress yang terjadi maka batas butirnya akan membesar serta mengakibatkan terbentuknya *crack*. Pada pengamatan mikro struktur akan tampak discontinuous *intergranular microcracks* (gambar 2.3). *Microcracks* kemudian akan terakumulasi hingga tube tidak mampu menahan tekanan operasi boiler sehingga terjadi kerusakan (gambar 2.4).



Gambar 2. 3 Discontinuous intergranular microcracks karena terbentuk nya metana pada batas butir [17]

Penyebab utama terjadinya hydrogen damage adalah karena tidak terkontrolnya parameter komposisi kimia dari air yang masuk kedalam boiler. Hal-hal yang mempengaruhi parameter tersebut dapat terjadi akibat bocornya kondensor atau adanya kontaminan yang tidak diharapkan didalam *feedwater*. Faktor lain yang dapat mempengaruhi terjadinya *hydrogen damage* adalah kalori dari batubara yang digunakan. Semakin besar nilai kalori batubara

maka heat flux akan semakin besar. Hal ini akan menambah kemungkinan terjadinya hydrogen damage.

Indikasi yang digunakan untuk memutuskan bahwa material terkena *hydrogen damage* adalah dengan adanya *discontinuous intergranular microcracks (Microfissures)*, *Decarburisasi*, terdapat deposit korosi, pengurangan ketebalan serta *oxide filled hydrogen damage crack*.

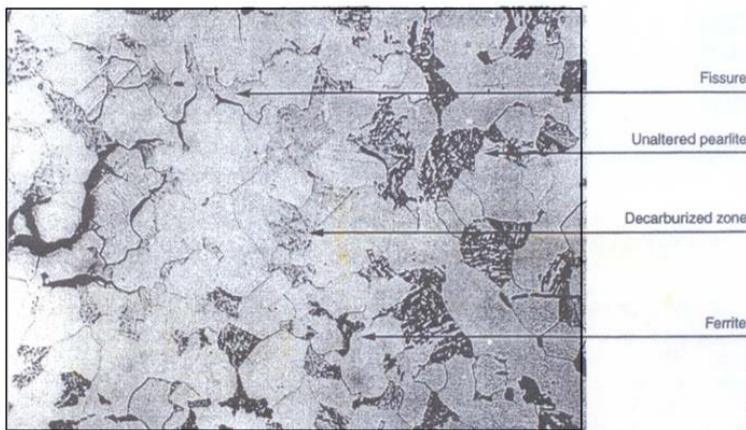


Gambar 2. 4 Tube yang mengalami kegagalan akibat Hydrogen Damage [17]

Hydrogen damage dapat dibagi menjadi 2 kategori berdasarkan temperatur operasional pada lokasi terjadinya kegagalan.

4.4.1 High Temperature Hydrogen Attack (HTHA)

High temperature hydrogen attack adalah mekanisme kagaganan *intergranular* yang dapat terjadi pada peralatan ditemperatur operasional lebih dari 204°C dan dalam kondisi kering. Kerusakan yang diakibatkan oleh *high temperature hydrogen attack* dapat berupa dekarburisasi permukaan pada diameter dalam, *embrittlement material*, kehilangan sifat mekanis, dan keretakan. *high temperature hydrogen attack* adalah kegagalan dalam fungsi waktu, artinya semakin lama suatu peralatan terkena suhu diatas batas resistansi dan berinteraksi dengan hidrogen maka kerusakan akan semakin menumpuk dan semakin tinggi suhu naik diatas batas resistansi maka akan semakin cepat kerusakan terjadi.



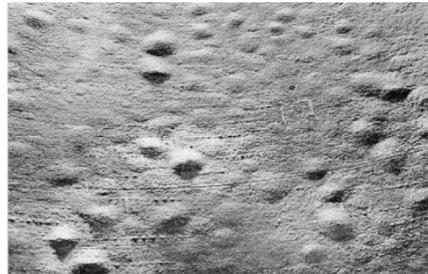
Gambar 2. 5 Struktur mikro pada material yang terkena HTHA tampak mengalami dekarburisasi [14]

4.4.2 Low Temperature Hydrogen Damage

Low temperatute hydrogen damage sering juga disebut sebagai *wet H₂S damage* dapat dibagi menjadi beberapa kategori yaitu *hydrogen blistering*, *hydrogen induced cracking*, *Stress oriented hydrogen induced cracking*, dan *sulphide stress cracking*. Atom hidrogen yang mengakibatkan kegagalan pada mekanisme

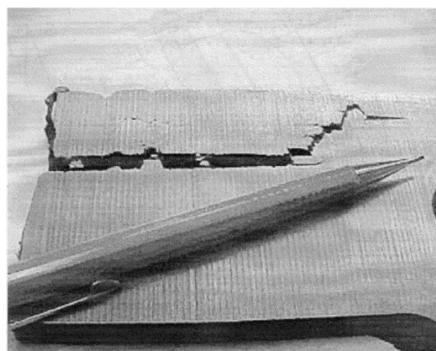
kegagalan ini berasal dari asam sulfida yang terdapat pada lingkungan material.

Pada kasus *hydrogen blistering*, atom hidrogen bergabung pada celah-celah baja sehingga membentuk molekul hidrogen. Reaksi yang terjadi disertai dengan meningkatnya *internal stress* secara signifikan. Pada beberapa kasus *stress* yang terjadi cukup untuk memicu terbentuknya *internal crack* yang pararel dengan permukaan sehingga terbentuk lepuhan (*blistering*).



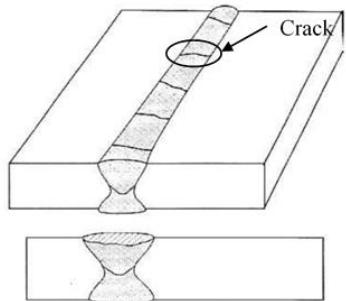
Gambar 2. 6 Bentuk Hydrogen Blisters pada vessel [20]

Pada kasus *hydrogen induced cracking*, *blisters* kecil terbentuk secara paralel dengan permukaan. *Blisters* kecil yang berdekatan pada penampang yang sama akan memicu terbentuknya retakan.



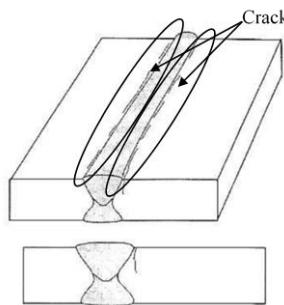
Gambar 2. 7 Bentuk kegagalan *hydrogen induced cracking* [20]

Sulphide Stress Cracking adalah terjadinya *crack* pada logam yang dihasilkan oleh kombinasi antara *tensile stress* dan korosi akibat adanya air dan hidrogen sulfida. *Sulphide stress cracking* sangat sering terjadi pada besi paduan karena kemampuan slip yang terbatas terutama pada struktur BCC.



Gambar 2. 8 Sketsa Bentuk Kegagalan pada Sulphide Stress Cracking [20]

Stress-Oriented Hydrogen-Induced Cracking adalah kegagalan lanjutan dari *hydrogen induced cracking* atau *sulphide stress cracking* yang dekat pada permukaan lalu merambat kedalam material. *Crack* merambat secara paralel dengan lasan karena adanya tegangan sisa yang berdekatan dengan lasan.

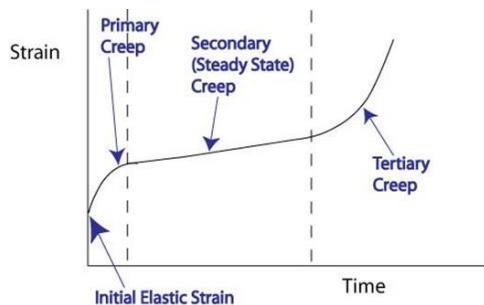


Gambar 2. 9 Sketsa Bentuk Kegagalan pada Stress-Oriented Hydrogen-Induced Cracking [20]

Low temperature hydrogen damage dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti, tingkat keasaman lingkungan material. mekanisme ini terjadi pada tingkat pH dibawah 4 dengan adanya H₂S. mekanisme ini juga dapat terjadi pada kondisi basa apabila terdapat sianida dan H₂S pada lingkungan logam. Konsentrasi H₂S juga berpengaruh pada terjadinya mekanisme ini. 50 ppm H₂S adalah konsentrasi minimum agar terjadi mekanisme ini. Temperatur operasional kegagalan ini dalam rentang suhu ruangan hingga 150°C kecuali pada *sulphide stress cracking* dalam rentang suhu ruangan hingga 80°C.

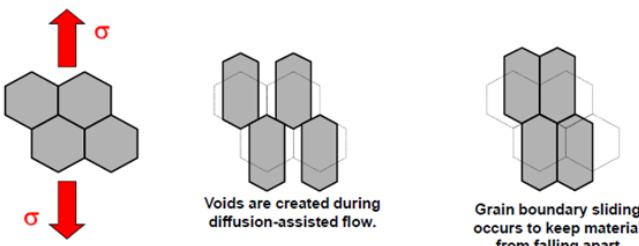
2.5 Creep

Creep adalah perubahan geometri dari logam atau paduan secara permanen ketika diberikan tegangan. Mekanisme kegagalan ini biasanya terjadi pada diatas temperatur *recrystallization*. *Creep Strain* dapat mengakibatkan perubahan dimensi yang sangat besar sehingga material tidak dapat digunakan lagi. Secara umum proses *creep* terbagi menjadi 3 tahapan (gambar 2.10). Tahap I adalah tahap *primary creep* atau *transient creep*, tahap II adalah tahap *secondary creep* atau *steady state creep*, dan tahap III adalah tahap *creep tersier* dan pada akhirnya material patah/putus (*fracture*).



Gambar 2. 10 kurva creep pada temperatur tinggi [16]

Pada saat *creep* terjadi grain boundary sliding, yaitu pergeseran batas butir yang terjadi bersamaan dengan mekanisme *Nabarro-Herring (NH)* ataupun *Coble Creep* yang mana pada batas butir terdapat kekosongan (*vacancies*) (gambar 2.12). Pergeseran batas butir juga dianggap sebagai mekanisme yang memungkinkan material untuk memanjang tanpa adanya perubahan ukuran butir selama *superplastic forming*.

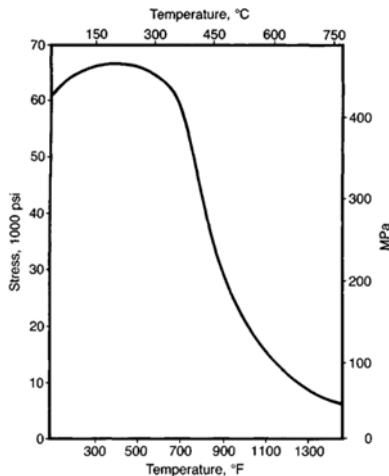


Gambar 2. 11 Mekanisme grain boundary sliding [16]

2.6 Short Term Overheating

Short term overheating terjadi ketika suhu *tube* naik diatas batas design pada waktu yang singkat. Kegagalan dengan mekanisme ini terjadi dalam waktu singkat dikarenakan bergantung pada durasi kenaikan temperaturnya. *Short term overheating* juga sering terjadi akibat dari terganggunya pengoperasian boiler. Gangguan tersebut dapat berupa kurangnya debit *feedwater* yang mengalir didalam *waterwall tube* pada waktu tertentu. Sehingga *waterwall tube* menerima panas yang berlebihan. Kegagalan juga mungkin terjadi karena ada perubahan dari pengoperasian boiler untuk periode waktu tertentu. Sehingga untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan diperlukan data pengoperasian boiler sebelum mengalami kegagalan.

Short term overheating sering kali tidak berhubungan dengan fluida kerja sehingga untuk menganalisa mekanisme kegagalan ini dapat difokuskan pada prosedur operasi dan desain sistem. Hal-hal yang perlu diketahui adalah waktu terjadinya kegagalan, metode pembersihan yang dilakukan, keadaan *tube* ketika mengalami kegagalan, kegagalan sebelum kegagalan ini terjadi, dan level dari *feed water*. Indikasi bahwa *waterwall tube* mengalami *short term overheating* adalah *tube* mengalami deformasi plastis, *internal deposit* tidak terlalu signifikan, tidak terlalu banyak produk *magnetite* serta bentuk pecahnya seperti mulut ikan (gambar 2.14)



Gambar 2. 12 Nilai *yield stresses* baja karbon dengan fungsi temperatur [17]

Gambar 2. 13 Menunjukkan bahwa kenaikan temperatur akan mengurangi kekuatan baja karbon. Sehingga dari grafik tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa ketika suhu meningkat ke level yang sangat tinggi kegagalan akan terjadi dengan sangat cepat karena keuatannya berkurang secara signifikan. Kekuatan baja

karbon berkurang secara signifikan dalam waktu yang singkat membuat baja karbon tidak mampu menahan tekanan pada *tube* sehingga mengakibatkan kegagalan (gambar 2.14).



Gambar 2. 13 Bentuk kegagalan dengan mekanisme short term overheating pada tube [17]

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai kegagalan pada waterwall tube telah banyak dilakukan sebelumnya. Penelitian-penelitian tersebut dapat dijadikan acuan dalam pengambilan data dan juga menjadi dasar teori dalam menemukan penyebab serta mekanisme kegagalan pada penelitian pipa waterwall tube ini. Berikut merupakan penelitian terdahulu yang dapat dijadikan acuan.

1. Haezer, Eben. “Analisis Kegagalan Riser Wall Tube nomor 3 ASTM A210 grade A-1 Pada Boiler PLTU Unit 2 PT X”

Penelitian ini menganalisis kegagalan pada riser wall tube nomor 3 dengan material ASTM 210 grade A-1 pada boiler PLTU. Kegagalan riser wall tube diakibatkan oleh erosi yang dipicu oleh bocornya tube no 2 yang berisi uap panas dengan tekanan 195.31 Atm dan temperatur 3930C sehingga material menjadi lunak dan

mudah mengalami penipisan. Analisa dilakukan dengan pengamatan visual, pengujian komposisi kimia, pengamatan fractography dengan SEM, pengamatan mikroskopis, analisa produk korosi menggunakan XRD serta pengujian kekerasan pada beberapa bagian pipa.

Pengamatan struktur mikro yang dilakukan menunjukkan bahwa terjadi pertambahan ukuran batas butir secara horizontal. Hasil-hasil pengamatan dan pengujian menunjukkan adanya penipisan pipa dari permukaan luar akibat serangan dari kebocoran riser wall tube nomor 2 yang berisi uap dengan tekanan 195.31 atm dan temperatur 393°C ditambah fasa Fe8N yang terbentuk pada tube akibat emisi pembakaran batubara. Ilustrasi awal mula terjadi kebocoran.

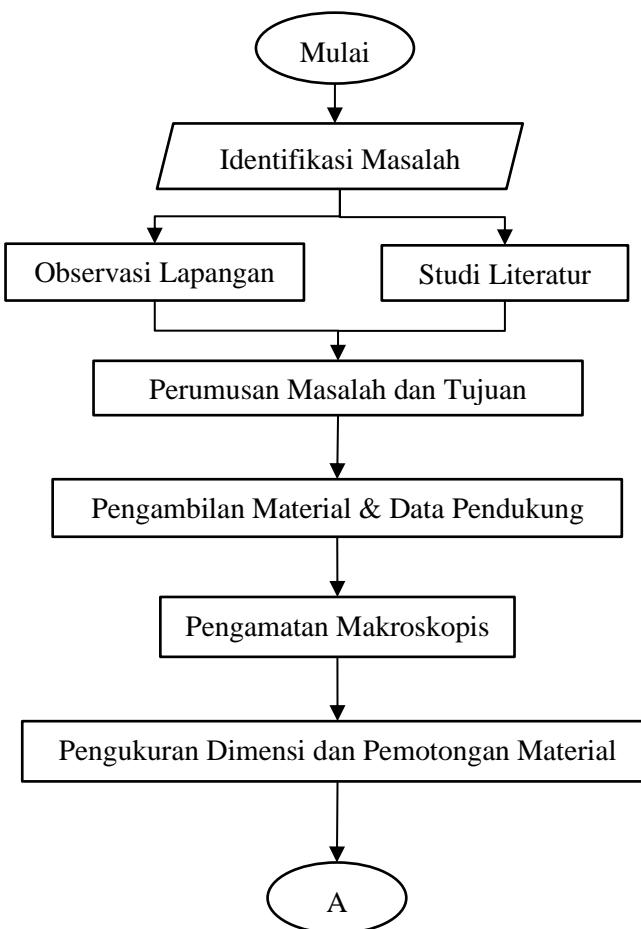
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

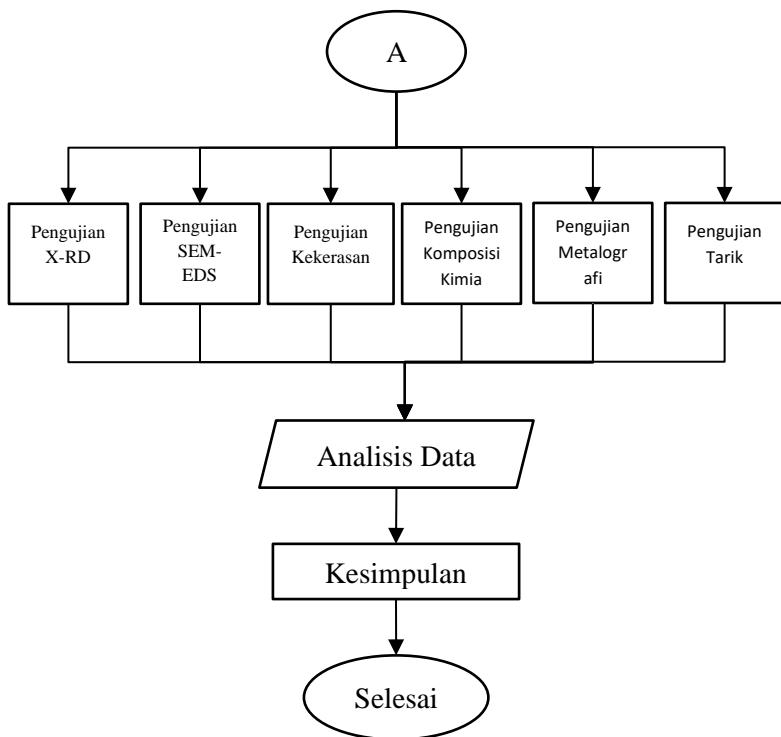
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini secara singkat dapat digambarkan melalui diagram penelitian. Berikut adalah skema diagram alir penelitian:





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Langkah – Langkah penelitian

Dalam melaksanakan analisis kegagalan pada tugas akhir ini diperlukan langkah-langkah penelitian agar analisis kegagalan dapat diselesaikan dengan baik. Langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah

Setelah material diterima lalu dilakukan identifikasi masalah melalui pengamatan bentuk kegagalan pada material

- tersebut. Kemudian dilakukan identifikasi kemungkinan penyebab kegagalan menggunakan *fishbone diagram*.
2. Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian
Perumusan masalah ini dilakukan untuk menentukan batasan masalah untuk memperjelas lingkup penelitian. Tujuan penelitian diperoleh sebagai jawaban dari rumusan masalah yang sudah ditentukan.
 3. Pengambilan Data Desain dan Operasional Boiler.
Pengambilan data desain dan operasional dilakukan untuk mendapatkan data awal dari kondisi aktual yang terjadi. Informasi yang akan digunakan dalam proses analisis adalah informasi mengenai komponen yang mengalami kegagalan dan sejarah perawatan pada komponen tersebut serta informasi mengenai terjadinya kegagalan.
 4. Pengamatan Makroskopis
Pengamatan Makroskopis dilakukan untuk mengetahui apakah ada perubahan geometri serta kecacatan yang terjadi pada material uji. Selain itu pengamatan makroskopis juga dilakukan untuk mencari informasi terkait korosi dan produk korosi yang ada pada material uji. Pengamatan makroskopis dilakukan dengan cara *visual inspection* serta didokumentasikan menggunakan kamera digital.
 5. Pemotongan dan Pengukuran Material
Pemotongan material dilakukan untuk mendapatkan spesimen memiliki ukuran yang sesuai dengan kebutuhan pengujian metalografi. Pemotongan material dilakukan menggunakan mesin gerinda potong. Pengukuran material dilakukan untuk mengetahui perubahan geometri material seperti penipisan atau penebalan dari spesifikasi material awal.
 6. Persiapan Spesimen
Persiapan Spesimen dilakukan dengan 3 (tiga) tahapan sebelum dilakukan pengujian, yaitu:
 - *Grinding*

Permukaan spesimen yang akan diuji dihaluskan pada mesin *grinding* menggunakan kertas gosok. Kertas gosok yang digunakan memiliki *grit* kekerasan yang berbeda-beda. Proses *grinding* dimulai dengan menggunakan kertas gosok yang memiliki *grit* paling kasar yaitu 80 sambil dialiri air. Kemudian kertas gosok diganti dengan *grit* yang lebih halus secara bertahap yaitu 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 2000, sampai 5000.

- *Polishing*

Permukaan spesimen dipoles dengan menggunakan *polisher Autosol* pada piringan berputar yang dilapisi dengan kain beludru. Sehingga didapatkan permukaan yang mengkilap seperti cermin. Untuk membersihkan spesimen dari sisa-sisa *polisher* maka spesimen dicuci dengan air lalu dikeringkan menggunakan *dryer*.

- *Etching*

Permukaan spesimen dicelupkan pada larutan kimia (*etching reagent*). Pada pengujian ini *etching reagent* yang digunakan adalah *nital*. *Nital* merupakan hasil pencampuran dari 100 ml Alkohol 96 % dengan 5 ml HNO_3 .

7. Pengujian Material

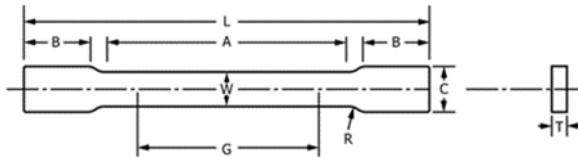
Spesimen yang sudah melewati tahap persiapan selanjutnya akan diuji dengan 4 (empat) metode pengujian. Metode pengujian spesimen tersebut adalah sebagai berikut:

- Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)
Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui komposisi, topografi, serta kristalografi dari permukaan material. Elektron berinteraksi dengan atom yang membentuk sampel dan menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang informasi diatas. SEM dapat menghasilkan gambar beresolusi tinggi dari permukaan spesimen.
- Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui ketahanan material terhadap deformasi akibat tekanan atau goresan. Pengujian ini juga dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan material setelah melalui proses perlakuan pada boiler pembangkit. Kemudian akan dilakukan perbandingan antara nilai kekerasan yang diperoleh tersebut dengan nilai kekerasan material dengan jenis material yang sama berdasarkan standar ASTM. Pengujian kekerasan menggunakan mesin uji dengan metode low-force hardness scale yaitu HV 0.5 dan 0.3 dengan besar gaya uji 4,903 N dan 2,942 N.

- Pengujian Komposisi Kimia
Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui adanya perubahan komposisi kimia spesimen uji serta produk korosi pada tube. Pengujian komposisi kimia pada spesimen uji dilakukan menggunakan spektrometer dengan cara menembakkan sinar-X ke titik yang akan diamati. Pengujian dengan menggunakan spektrometer akan mengeluarkan hasil berupa unsur-unsur yang terkandung pada spesimen secara kuantitatif.
Pengujian komposisi kima pada produk korosi dilakukan dengan menggunakan XRD atau X-Ray Powder Diffraction. Pengujian XRD akan mengeluarkan hasil gelombang setiap molekul-molekul penyusun produk korosi. Karena panjang gelombang setiap molekul penyusun berbeda maka komposisi kimia dari produk korosi akan diketahui.
- Uji Tarik
Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan data kekuatan material *tube*. Data yang diperoleh akan dibandingkan dengan standar kekuatan material *tube boiler* sesuai dengan standar ASTM A 210 grade A1. Pengujian tarik dilakukan pada suhu kamar dengan mengacu pada standar ASTM A370.

Gambar 3.2 menunjukkan bentuk spesimen uji tarik sesuai dengan standar A370



Gambar 3.2 Bentuk Spesimen Uji Tarik Standar ASTM 370

Keterangan

Gauge length (G) : 50.0 ± 0.10 mm

Width (W) : $40 + 3 - 6$ mm

Thickness (T) : Mengikuti ketebalan material

Radius of fillet (R) : 13 mm

Overall length (L) : 200 mm

Length of reduce section (A) : 60 mm

Length of grip section (B) : 50 mm

Width of grip section (C) : 50 mm

- Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari spesimen yang diuji. Pengujian ini menggunakan mikroskop optik yang sudah terhubung dengan kamera untuk pengambilan gambar struktur mikro spesimen.

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan penelitian digunakan untuk mendukung peneliti mengumpulkan dan mengolah data. Berikut adalah peralatan-peralatan yang digunakan untuk penelitian ini:

- Penggaris dan Jangka Sorong

Penggaris yang digunakan pada penelitian ini memiliki ketelitian 0,1 mm, sedangkan jangka sorong yang digunakan memiliki ketelitian 0,02 mm. Penggaris dan jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi panjang dan diameter dari material yang akan menjadi objek pada penelitian tugas akhir ini.

- Kamera digital

Kamera digital digunakan untuk mendokumentasikan hasil pengamatan secara makro pada material uji serta mendokumentasikan kegiatan penelitian tugas akhir ini.

- Mesin Pemotong Material

Spesimen uji dipotong dalam ukuran yang lebih kecil dengan menggunakan mesin metal *cut off saw*, tujuannya untuk mempermudah proses *grinding* dan *polishing* sebelum dilakukannya pengujian *hardness* dan *metallography*.

- Mesin *Grinding* dan *Polishing*



Gambar 3. 3 Mesin Metkon Gripo 300-IV Grinder & Polisher

Mesin *grinding* dan *polishing* digunakan untuk menghaluskan permukaan spesimen dan membuat permukaan spesimen menjadi datar dengan menggunakan kertas gosok. Penelitian ini menggunakan mesin *grinding* dan *polishing* Metkon Gripo 300-1V Grinder & Polisher seperti pada gambar 3.3. Hasil dari mesin *grinding* dan *polishing* adalah permukaan spesimen mengkilap dan tidak ada goresan bekas *grinding*.

- Larutan Nital

Larutan nital digunakan dalam proses etching untuk melihat struktur mikro pada mikroskop optik. Larutan nital dihasilkan dari pencamuran alkohol 96% sebanyak 100 ml dengan HNO₃ - Sebanyak 5 ml.

- Mesin Uji Kekerasan

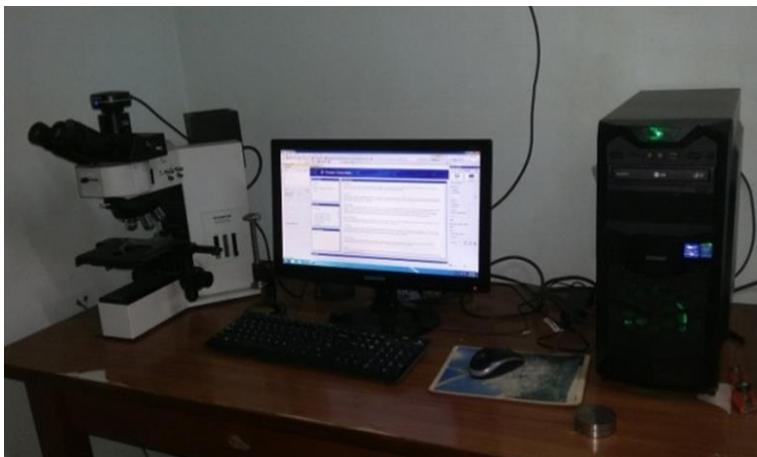


Gambar 3. 4 Mesin Micro Vickers Hardness

Uji kekerasan merupakan salah satu uji merusak material dimana material di uji dengan beban tertentu. Mesin uji kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan mesin Micro Vickers Hardness seperti pada gambar 3.4.

- Mikroskop Optik

Mikroskop merupakan salah satu instrumen optik yang digunakan untuk mendeteksi benda sangat kecil dan tidak terlihat langsung oleh mata. Mesin mikroskop yang digunakan dalam penelitian ini adalah Olympus Stereo Microscope seperti pada gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Mesin Olympus Stereo Microscope

- Spectrometer ARC-Met 800

Spektrometer digunakan untuk mengetahui kandungan kimia serta unsur-unsur yang terdapat pada material uji secara kuantitatif.

- Mesin Scanning Electron Microscope (SEM-EDS)

Mesin Scanning Electron Microscope (SEM) digunakan untuk mengetahui informasi kristalografi yang terdapat dalam material dengan pancaran tinggi elektron.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

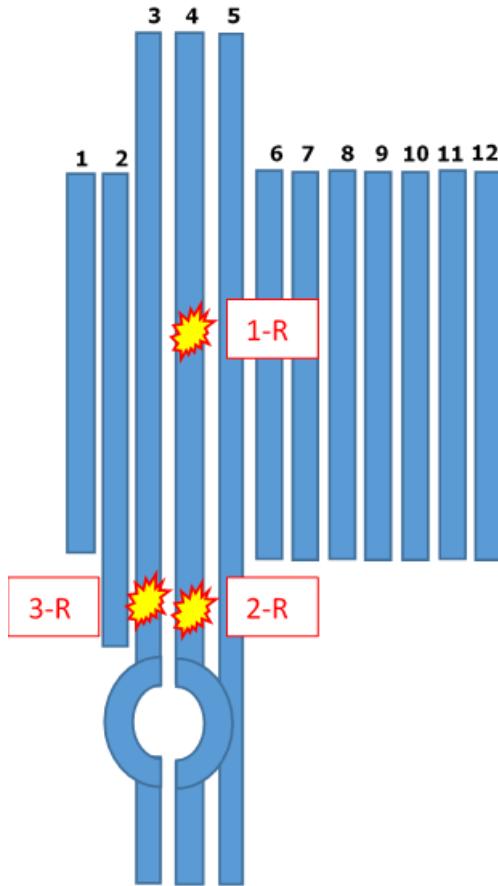
4.1 Kode dan Lokasi Tube

Komponen boiler yang mengalami kegagalan adalah *waterwall tube*. Boiler PT. X mengalami kegagalan pada *waterwall tube* sebanyak 24 kali sejak pertama kali beroperasi pada tahun 2011. Daftar *Waterwall tube* serta pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4. 1 Daftar *Waterwall tube* dan pengujian yang dilakukan.

No.	Pengujian	Kode Tube		
		1-R	2-R	3-R
1	Metalografi	1	2	2
2	Kekerasan	1	2	2
3	SEM	-	1	1
4	Spektrometer	1	-	1
5	X-RD	1	-	-
6	Tarik	2	-	-

Lokasi ketiga *waterwall tube* berdekatan dengan komponen *sootblower D17* pada boiler pada elevasi 40 meter. Angka pada nama *tube* artinya adalah nomor *tube* sedangkan huruf “R” berarti sisi kanan (*Right*).



Gambar 4. 1 Ilustrasi titik kegagalan tube pada sisi kanan (Bukit/Right)

4.2 Data Operasi Boiler dan Spesifikasi tube

4.2.1 Data Operasi Boiler PLTU PT.X

Boiler beroperasi secara kontinu menggunakan bahan bakar batubara kalori rendah antara 3900-4500 kCal/Kg. Jenis pembakaran pada boiler ini adalah *fire center*. Data

desain operasi boiler dan spesifikasi tube yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.2

Tabel 4. 2 Data desain operasi boiler dan spesifikasi *waterwall tube*.

No	Production	Shanghai Boiler Works
1	<i>Type</i>	<i>Sub Critical Pressure, single Reheat, Pulverized Coal</i>
2	<i>Design Pressure (Drum)</i>	191.9 kg/cm ²
3	<i>Main Steam Flow Rate</i>	2,137 T/h
4	<i>Model</i>	SG-2129/14.3-M922
5	<i>Product Number</i>	922-1-8801
6	<i>Furnace Type</i>	<i>Membrane, gas-proof single</i>
7	<i>Furnace size (L,W,H)</i>	20320 mm X 19036 mm X 70587 mm
8	<i>Furnace volume</i>	22674 m ³
9	<i>Furnace Total hot area</i>	9830 m ²
10	<i>Furnace outlet temperatur (M BCR)</i>	1333/1028 °C
11	<i>Furnace design pressure</i>	+_- 5980 Pa
12	<i>Furnace instantaneous explosion pressure</i>	+_- 9980 Pa

13	<i>Burner Type</i>	<i>straight flow</i>
14	<i>Water wall design pressure</i>	19,81 Mpa
15	<i>Water wall cycle Mode</i>	<i>Control cycle</i>
16	<i>Mass velocity of waterwall (B-MCR)</i>	980 kg/s (2 pump)
17	<i>Tube type of waterwall</i>	<i>flat tube & ribbed tube</i>
18	<i>external diameter</i>	51 mm
19	<i>Bore diameter of waterwall</i>	5.7 mm (MWT) <i>minimum wall thickness</i>

4.2.2 Data Kualitas Air pada PLTU

Pengontrolan kualitas air yang digunakan dalam sistem pembangkit dilakukan agar potensi kegagalan material boiler dapat diminimalkan. Kualitas air pada sistem pembangkit dijaga dengan cara menguji kualitas air pada lima area kerja air. Jenis, parameter dan kualitas air dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Jenis, parameter dan kualitas air pada sistem pembangkit (data juli 2019)

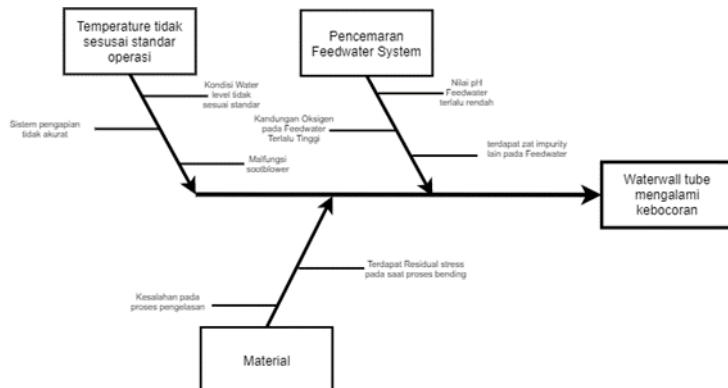
Jenis Air	Parameter	Batasan	Satuan	Rata-rata Juli
Air kondensor	pH Konduktifitas Silika (SiO_2) Sodium (Na^+) Klorida (Cl^-)	8.8-9.6 ≤ 10 ≤ 20 ≤ 5 ≤ 5	- $\mu\text{S}/\text{cm}$ $\mu\text{g}/\text{L}$ (ppb) $\mu\text{g}/\text{L}$ (ppb)	9,47 8,63 8 0 11,6

			$\mu\text{g/L}$ (ppb)	
Air Umpam	pH Konduktifitas Silika (SiO_2) Hydrazine (N_2H_4)	8.8-9.6 ≤ 10 ≤ 20 10-30	- $\mu\text{S/cm}$ $\mu\text{g/L}$ (ppb) $\mu\text{g/L}$ (ppb)	9,46 8,76 9 17
Air Boiler	pH Konduktifitas Silika (SiO_2) Sodium (Na^+) Klorida (Cl^-)	9,0- 10,0 ≤ 25 EPRI EPRI EPRI	- $\mu\text{S/cm}$ $\mu\text{g/L}$ (ppb) $\mu\text{g/L}$ (ppb) $\mu\text{g/L}$ (ppb)	9,39 10,61 44 13 132
<i>Steam Drum</i> (<i>Saturated Steam</i>)	pH Konduktifitas Silika (SiO_2) Sodium (Na^+)	- ≤ 10 ≤ 20 ≤ 10	- $\mu\text{S/cm}$ $\mu\text{g/L}$ (ppb) $\mu\text{g/L}$ (ppb)	9,48 8,77 8 0,08
<i>Stator Cooling System</i>	pH Konduktifitas	5,5-7,5 ≤ 2	- $\mu\text{S/cm}$	6,82 0,37

Berdasarkan hasil pengukuran kualitas air (tabel 4.3) dapat disimpulkan bahwa kualitas air masih dalam keadaan baik untuk kadar sodium dan nilai pH.

4.3 Cause and Effect Diagram atau Fishbone Diagram

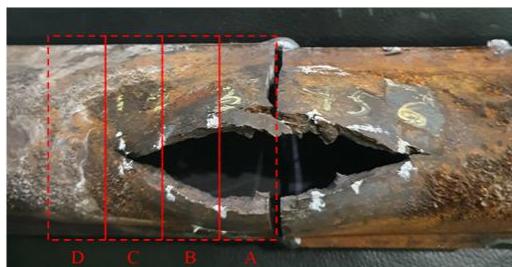
Cause and Effect Diagram (fishbone diagram) adalah salah satu metode yang digunakan untuk menentukan penyebab kegagalan. *Fishbone diagram* menguraikan hubungan antara dampak atau akibat sebuah permasalahan dengan berbagai penyebabnya. *Fishbone diagram* digunakan pada penelitian ini untuk mengidentifikasi penyebab kebocoran pada *waterwall tube* seperti ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Fishbone diagram dari analisis kegagalan *waterwall tube* pada boiler PLTU PT.X

4.4 Data Pengujian *Waterwall tube* Kode 1-R

4.4.1 Pengamatan Makro



Gambar 4. 3 Potongan tube 1-R yang mengalami kegagalan

Pengamatan makro pada *tube* 1-R dilakukan dengan mengumpulkan data pengukuran dimensi, ketebalan, perubahan warna, dan bentuk kegagalan yang terjadi tanpa menggunakan alat bantu. Hasil pengamatan makro digunakan untuk mengetahui keadaan fisik dari spesimen Gambar 4.3 menunjukkan bentuk kerusakan *waterwall tube* kode 1-R sisi bukit yang terdapat cacat pada pipanya. Potongan *waterwall tube* kode 1-R memiliki panjang 1108 mm, diameter luar 52,86 mm, diameter dalam 40,8 mm dan terdapat ulir di dalam tube. Di tengah tube terdapat cacat (*bulges*) yang bentuknya menyerupai mulut ikan (*fish mouth rupture*) dengan panjang 74,22 mm. Pada permukaan tube terdapat *slag* atau produk korosi berwarna cokelat.



Gambar 4. 4 Titik Pengukuran ketebalan pada Tube 1-R
Potongan B

Pengukuran ketebalan dilakukan untuk melihat perubahan dimensi pada spesimen. Area pengukuran ketebalan diberikan sumbu Θ^0 untuk mempermudah menentukan titik pengujian. Hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil pengukuran ketebalan pada tube 1-R.

Kode Tube	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1-R	6,7	5	-	5,9	5,9	6,4	6,5	6,5

Berdasarkan hasil pengukuran ketebalan spesimen tube 1-R dapat diketahui bahwa terjadi penurunan ketebalan pada area kegagalan. Ketebalan awal dari waterwall tube adalah 6,5 mm dengan *minimum wall thickness* sebesar 5,7 mm. Sehingga berdasarkan pengukuran ketebalan dapat diambil kesimpulan bahwa tube 1-R mengalami penurunan ketebalan hingga melebihi *minimum wall thicknessnya*. Bentuk kegagalan pada spesimen 1-R adalah *thick edged*. Pengamatan secara mikro diperlukan untuk dapat memastikan penyebab dan mekanisme kegagalan pada tube 1-R.

4.4.2 Pengujian Spektrometer

Pengujian spektrometer pada *tube* 1-R dilakukan dengan menggunakan spesimen 1-R Potongan C. Berikut ini adalah hasil uji spektrometer dari komposisi kimia spesimen 1-R Potongan C dibandingkan dengan standar ASTM A210 A1.

Tabel 4. 5 Perbandingan komposisi kimia spesimen 1-R dengan standar ASTM A 210 A1

Unsur	SA210 A1 (%)	Hasil Pengujian (%)
C	Max 0,27	0,14331
Si	Min 0,10	0,21122
Mn	Max 0,93	0,73882
P	Max 0,035	0,01321
S	Max 0,035	0,00505
Ni	-	0,11073
Cr	-	0,19713
Mo	-	0,05246
Cu	-	0,20324

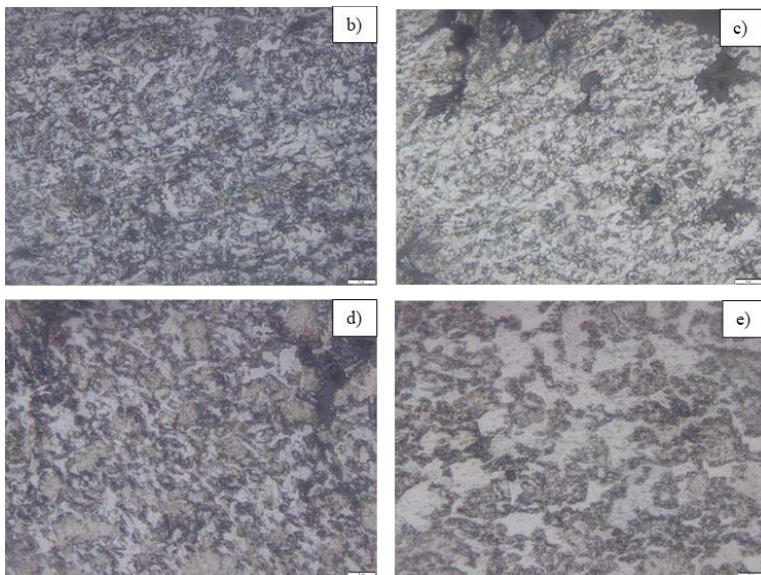
Co	-	0,01052
Al	-	0,04681
Pb	-	0,00254
W	-	0
Ti	-	0,00338
V	-	0,00298
Sn	-	0,01141
Nb	-	0,00244
B	-	0,00082
Ca	-	0,00174
As	-	0,00675
Sb	-	0,00784
Fe	Balance	6,8913

Komposisi kimia hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan standar ASTM A 210 A1. Berdasarkan perbandingan tersebut dapat dipastikan bahwa spesimen ASTM masih sesuai dengan standar ASTM A 210 A1.

4.4.3 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk mikro struktur dengan menggunakan mikroskop optik. Hasil pengamatan mikro struktur pada spesimen 1-R Potongan A dapat dilihat pada gambar 4.5.



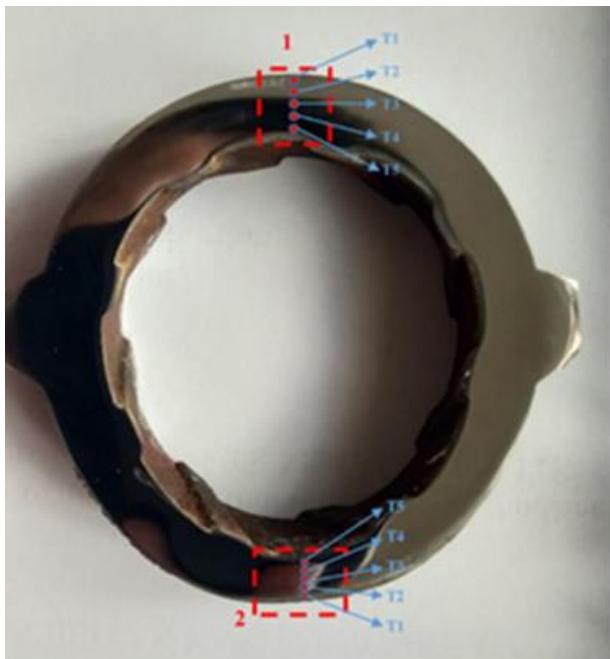


Gambar 4. 5 Struktur mikro 1-R; a) Titik pengamatan, b) titik 1, c) titik 2, d) titik 3 dan e) titik 4 pembesaran 100 X

Berdasarkan hasil pengujian metalografi spesimen 1-R dapat dilihat bahwa terdapat *microfissure* pada mikrostruktur tube 1-R. Secara umum mikrostruktur spesimen 1-R tersusun dari fasa ferite dan perlite. Mikrostruktur spesimen 1-R berbentuk acak dengan ukuran yang beragam.

4.4.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mendapatkan pemetaan kekerasan pada permukaan spesimen 1-R. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan indentasi vikers pada mesin mikro *hardness*. Pengujian kekerasan pada spesimen 1-R dilakukan dengan indentasi sebanyak 5 titik pada area dekat kerusakan (*fire side*) dan area tidak rusak (*wall side*).



Gambar 4. 6 Titik pengujian kekerasan tube 1-R Potongan D

Tabel 4. 6 Nilai kekerasan spesimen 1-R potongan D

Inden tor	Area Peng ujian	Nilai Kekerasan					Rata-rata
		Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
Hv 0.5	Area 1	214	195	204	207	213	206,6
	Area 2	171	171	186	189	193	182

Hasil pengujian kekerasan (tabel 4.6) menunjukkan rata-rata nilai kekerasan *tube* 1-R melebihi standar maksimum ASTM A 210

A1. Area 1 (*wallside*) menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan kekerasan pada area 2 (*fireside*).

4.4.5 Pengujian Tarik

Pengujian tarik pada *tube* 1-R dapat dilihat pada tabel 4.7. Berdasarkan hasil pengujian tarik tersebut diperoleh nilai *yield strength* pada *tube* 1-R cacat dan 1-R Cut yaitu 497,40 dan 491,56 nilai ini masih memenuhi standar material ASTM A210 GR A1. Nilai elongasi pada *tube* 1-R cacat dan 1-R Cut yaitu 24,82% dan 29,10. Nilai elongasi tersebut menjadi indikasi bahwa material 1-R mengalami penurunan sifat keuletan (penggetasan).

Tabel 4. 7 Hasil uji tarik pada sample tube 1-R.

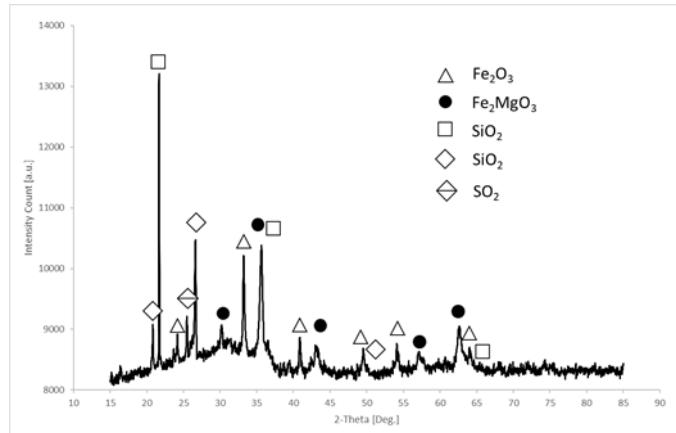
Kode Spesimen	Kode Tube	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation
(4)	1-R Cut #8	-	491,56	29,10
(A)	1-R Cacat #8	-	497,40	24,82

4.4.6 Pengujian X-RD

Pengujian X-RD dilakukan untuk menganalisis senyawa kimia penyusun produk korosi dari *tube* 1-R. Produk korosi yang diuji adalah produk korosi yang terdapat pada dinding luar *tube* 1-R. Hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 4.7.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut diketahui bahwa produk korosi mengandung senyawa *Hematite* (Fe₂O₃)

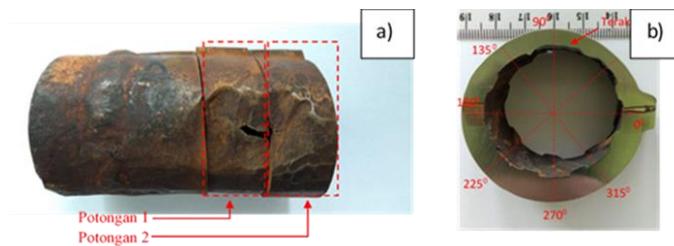
sebanyak 36%, *Magnesium Diferrate III* (Fe_2MgO_4) sebanyak 36%, *Cristobalite beta high* (O_2Si) sebanyak 11,4 %, *Quartz high* (O_2Si) sebanyak 13,9%, *Sulfur (IV) Oxide* (O_2S).



Gambar 4. 8 Grafik hasil pengujian X-RD pada produk korosi tube 1-R

4.5 Data Pengujian Waterwall Tube kode 2-R.

1.5.1 Pengamatan Makro



Gambar 4. 7 Potongan tube 2-R (a) bentuk kegagalan, (b) Titik Pengukuran ketebalan dan lokasi terak oksida pada tube 2-R potongan 2

Berdasarkan pengamatan makro *tube* 2-R (gambar 4.8) dapat dilihat bahwa pada permukaan luar *tube* mengalami deformasi pada area kegagalan. Pada dinding dalam *tube* 2-R terdapat terak berwarna hitam yang merupakan produk korosi akibat reaksi logam dengan *steam*. Berdasarkan pengukuran ketebalan diperoleh hasil sebagai berikut, Berdasarkan pengamatan makro *tube* 2-R (gambar 4.8) dapat dilihat bahwa pada permukaan luar *tube* mengalami deformasi pada area kegagalan. Pada dinding dalam *tube* 2-R terdapat terak berwarna hitam yang merupakan produk korosi akibat reaksi logam dengan *steam*. Berdasarkan pengukuran ketebalan diperoleh hasil sebagai berikut,

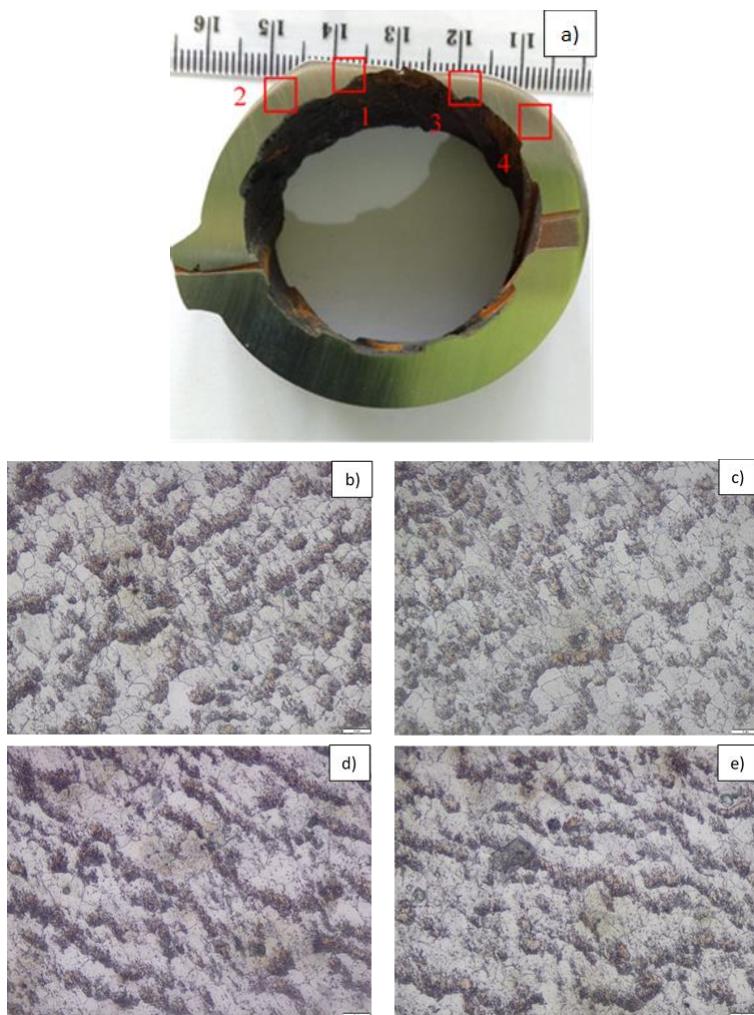
Tabel 4. 8 Ketebalan waterwall *tube* kode 2-R dalam mm.

Kode Tube	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
2-R	5,8	5	4,72	5,4	6,48	6,9	7	6,84

Berdasarkan pengukuran ketebalan diketahui bahwa area kegagalan (*fireside*) memiliki ketebalan lebih kecil dibandingkan area *wallside*. Ketebalan awal dari waterwall *tube* adalah 6,5 mm dengan *minimum wall thickness* sebesar 5,7 mm. Sehingga berdasarkan pengukuran ketebalan dapat diambil kesimpulan bahwa *tube* 2-R mengalami penurunan ketebalan hingga melebihi *minimum wall thicknessnya*. Terak hitam pada *tube* memiliki ketebalan 1,2 mm.

1.5.2 Pengujian Metalografi

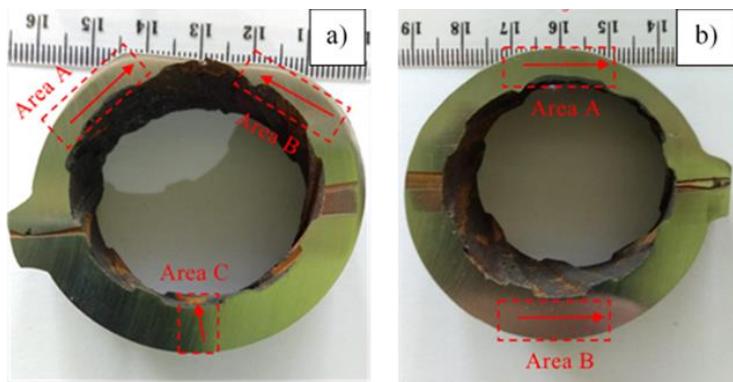
Berdasarkan hasil uji metalografi (gambar 4.9) dapat dilihat bahwa struktur mikro *tube* 2-R tersusun oleh *perlite* dan *ferrite*. Mikro struktur *tube* 2-R pada umumnya tidak terdapat anomali atau tidak terdapat indikasi kegagalan pada mikro struktur *tube* 2-R.



Gambar 4. 9 Struktur mikro 2-R a) titik pengamatan, b) titik 1, c) titik 2, d) titik 3 dan e) titik 4, perbesaran 50X.

1.5.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan pada tube 2-R dilakukan dengan indentasi sebanyak 7 titik pada 3 area. Area A dan B terletak bersebelahan dengan crack pada *fireside* sedangkan area C terletak pada *wallside* (gambar 4.10)



Gambar 4. 10 Area uji kekerasan tube 2-R;
a) Potongan 1 dan
b) Potongan 2

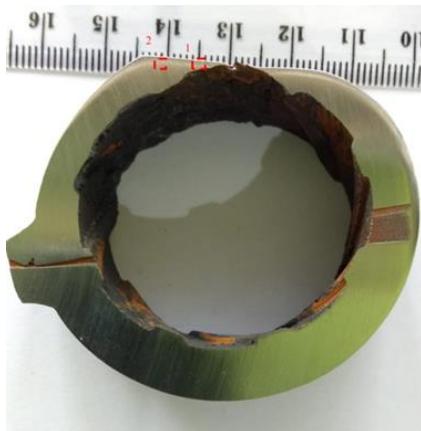
Tabel 4. 9 Nilai kekerasan tube 2-R

Titik Uji	Spesimen Uji				
	2-R Potongan 1			2-R Potongan 2	
	Area A	Area B	Area C	Area A	Area B
Titik 1	177	197	175	202	177
Titik 2	174	199	205	191	182
Titik 3	187	209	184	204	173
Titik 4	177	215	181	195	179
Titik 5	188	201	185	209	180
Titik 6	177	197	195	202	175
Titik 7	201	214	177	196	174
Rata-rata	183	204,6	186	199,9	177,1

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan *tube* 2-R (Tabel 4.10) diketahui bahwa nilai kekerasan pada area gagal (*fireside*)

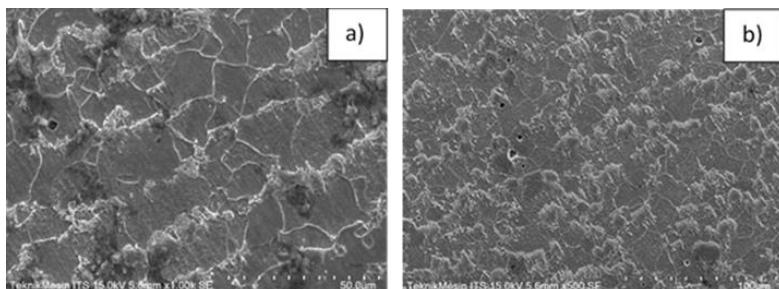
lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kekerasan pada area *wallside*. Nilai rata-rata kekerasan pada tube 2-R melebihi batas maksimal nilai kekerasan pada material ASTM A210 GR A1 yaitu max 150 Hv.

1.5.4 Pengujian SEM



Gambar 4. 11 Titik pengujian SEM pada tube 2-R Potongan 1

Pengujian SEM pada *tube* 2-R dilakukan pada 2 titik untuk melihat persebaran bentuk kerusakan secara mikro.

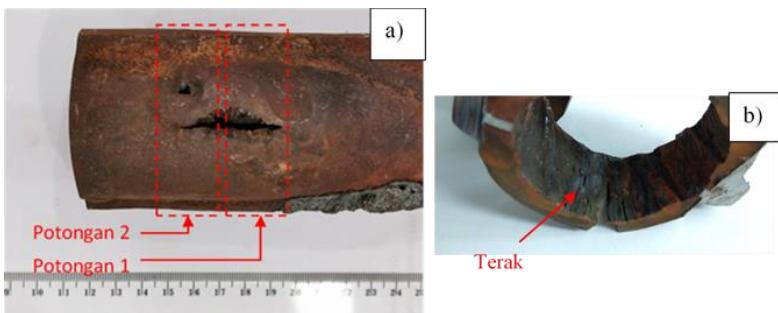


Gambar 4. 12 Hasil pengujian SEM pada Tube 2-R; a) Titik 1 pembesaran 1000X, b) titik 2 pembesaran 500X

Berdasarkan hasil pengujian SEM pada gambar 4.12, dapat diketahui bahwa tidak terjadi kerusakan secara mikro pada *tube* 2-R.

4.6 Data Pengujian Waterwall Tube kode 3-R.

4.6.1 Pengamatan Makro



Gambar 4. 13 Potongan *tube* 3-R (a) bentuk kegagalan, (b) terak pada permukaan dalam *tube* 3-R

Berdasarkan pengamatan makro (gambar 4.13a) dapat dilihat bahwa pecahan *tube* berbentuk *thick edged*. Terdapat deformasi plastik pada sekeliling pecahan. Pada dinding dalam terdapat terak berwarna hitam (gambar 4.13b). Hal ini terjadi dikarenakan terjadi korosi pada dinding dalam *tube*. Pengukuran ketebalan dilakukan untuk melihat perubahan dimensi pada spesimen. Area pengukuran ketebalan diberikan sumbu Θ^0 (gambar 4.14) untuk mempermudah menentukan titik pengujian. Hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.11.

Berdasarkan hasil pengukuran ketebalan diketahui bahwa daerah yang mengalami pecah memiliki ketebalan yang rendah. Hal ini dikarenakan permukaan dalam *tube* 3-R terkena korosi.



Gambar 4. 14 Titik Pengukuran ketebalan pada *Tube 3-R*
Potongan 2

Tabel 4. 10 Hasil pengukuran ketebalan pada *tube 3-R*

Kode Tube	0 ^o	45 ^o	90 ^o	135 ^o	180 ^o	225 ^o	270 ^o	315 ^o
3-R	6,6	4,78	5	5	6,24	6,8	7	6,84

4.6.2 Pengujian Spektrometer

Berikut ini adalah hasil uji spektrometer dari komposisi kimia *waterwall tube* kode 3-R dibandingkan dengan standar ASTM A210 A1.

Tabel 4. 11 Perbandingan komposisi kimia spesimen 3-R dengan standar ASTM A 210 A1

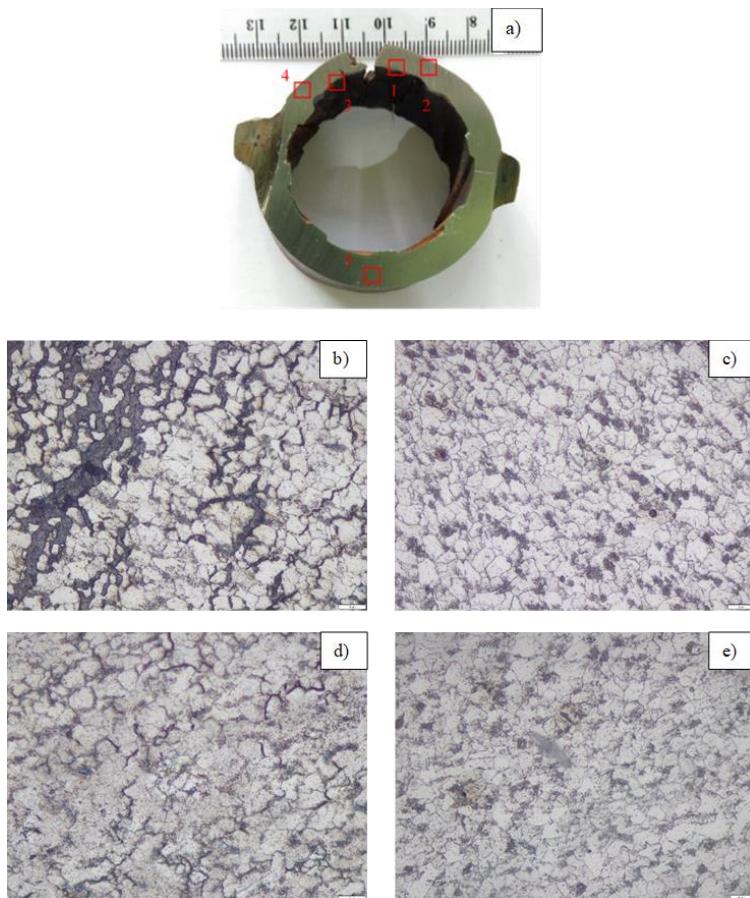
Unsur	SA210 A1 (%)	Hasil Pengujian (%)
C	Max 0,27	0,14905
Si	Min 0,10	0,20671

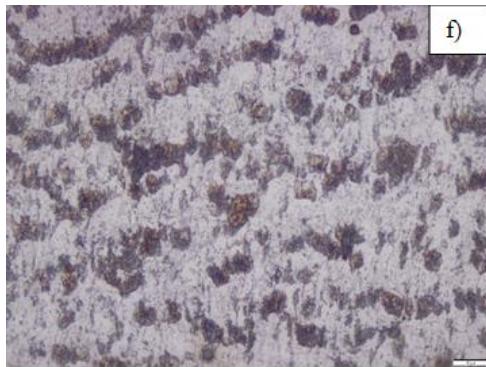
Mn	Max 0,93	0,73301
P	Max 0,035	0,01234
S	Max 0,035	0,00483
Ni	-	0,10912
Cr	-	0,19368
Mo	-	0,05124
Cu	-	0,19500
Co	-	0,01007
Al	-	0,04168
Pb	-	0,00131
W	-	0
Ti	-	0,00297
V	-	0,00135
Sn	-	0,00965
Nb	-	0,00029
B	-	0,00072
Ca	-	0,00163
As	-	0,00399
Sb	-	0,00763
Fe	Balance	7,0874

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia pada tabel 4.11, bahwa komposisi kimia dari sample 3-R tidak mengalami perubahan yang signifikan dari standar ASTM A 210 A1.

4.6.3 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk mikro struktur dengan menggunakan mikroskop optik. Potongan *tube* 3-R yang dijadikan spesimen uji metalografi adalah spesimen 3-R potongan 1 pada sisi dekat kerusakan dan 3-R potongan 2 pada sisi tidak rusak. Hasil pengamatan mikro struktur pada spesimen 3-R dapat dilihat gambar 4.15.

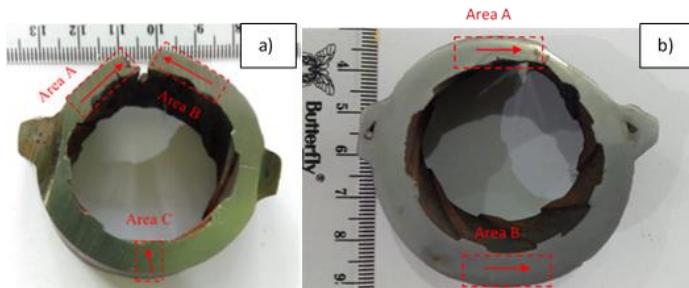




Gambar 4. 15 Struktur mikro 3-R a) titik pengamatan, b) titik 1, c) titik 2, d) titik 3, e) titik 4 dan f) titik 5 perbesaran 50X.

Berdasarkan hasil pengamatan mikro struktur pada gambar 4.15 dapat diketahui bahwa mikro struktur pada *tube* 3-R tersusun dari fasa *ferite* dan *perlite*. Kegagalan pada batas butir (*microfissuring*) terdapat di area dekat dengan kegagalan yaitu titik satu dan tiga pada potongan pertama dan titik empat pada potongan kedua. *Microfisuring* pada batas butir menjadi salah satu indikasi bahwa *tube* 3-R terkena *hydrogen damage*.

4.6.4 Pengujian Kekerasan



Gambar 4. 16 Area uji kekerasan tube 3-R (a) potongan 1, dan (b) potongan 2

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mendapatkan pemetaan kekerasan pada permukaan spesimen 3-R. Pengujian kekerasan dilakukan di sisi yang gagal pada potongan pertama dan di sisi yang tidak gagal pada potongan kedua. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan indentasi vikers pada mesin mikro *hardness*. Pengujian kekerasan pada spesimen 3-R potongan pertama dilakukan dengan indentasi sebanyak 7 titik pada dua area dekat kerusakan (*fire side*) dan area tidak rusak (*wall side*) (gambar 4.16a). Pengujian kekerasan pada spesimen 3-R potongan kedua dilakukan dengan indentasi sebanyak 7 titik pada area dekat kerusakan (*fire side*) dan area tidak rusak (*wall side*) (gambar 4.16b).

Tabel 4. 12 Nilai kekerasan *tube* 3-R

Titik Uji	Spesimen Uji				
	3-R Potongan 1			3-R Potongan 2	
	Area A	Area B	Area C	Area A	Area B
Titik 1	170	186	200	133	193
Titik 2	160	194	191	121	191
Titik 3	162	188	181	131	203
Titik 4	143	188	178	128	187
Titik 5	152	182	175	131	203
Titik 6	163	178	176	140	187
Titik 7	169	182	180	149	202
Rata-rata	159,9	185,4	183	133,3	195,1

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan pada tabel 4.12 dapat diketahui bahwa nilai kekerasan pada area *wall side* memiliki nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan area cacat (*fireside*). Nilai kekerasan pada area cacat tersebut menurun karena menurunnya kekuatan antar batas butir yang disebabkan oleh terciptanya gelembung metana pada batas butir akibat serangan hidrogen.

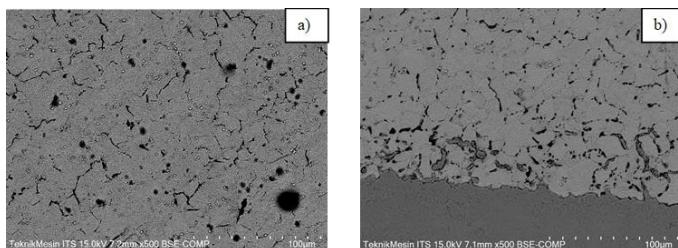
4.6.5 Pengujian SEM-EDS

Pengujian SEM pada *tube* 3-R dilakukan pada 2 titik untuk melihat persebaran bentuk kerusakan secara mikro.



Gambar 4. 17 Titik pengujian SEM pada tube 3-R
Potongan 2

Berdasarkan hasil pengujian SEM pada gambar 18-a dapat dilihat bahwa terdapat *microfissure* dan *carbide* yang tersebar pada fasa *ferite* dari mikro struktur *tube* 3-R. *Microfissure* yang terjadi merambat melalui batas butir atau disebut *intergranular growth*. Adanya *microfissure* pada batas butir membuktikan bahwa *tube* 3-R mengalami kegagalan akibat *hydrogen damage*.

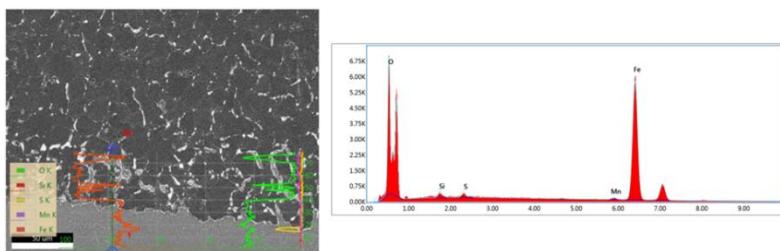


Gambar 4. 18 Hasil pengujian SEM pada Tube 3-R; a)
Titik 1 pembesaran 500X dan b) titik 2 pembesaran 500X

Tabel 4. 13 Unsur penyusun oksida pada permukaan dalam spesimen 3-R

Element	Weight %	Atomic %	Net Int
O K	13,97	35,8	195,99
Si K	0,86	1,25	12,62
S K	0,73	0,93	10,9
Mn K	0,93	0,7	5,38
Fe K	83,51	61,32	361,97

Dari hasil analisa SEM-EDS, unsur kimia yang terdapat pada lapisan oksida spesimen 3-R menunjukkan unsur yang didominasi oleh besi (Fe) dan juga oksigen (O). Unsur lain juga ditemukan dengan jumlah sedikit seperti silicon, sulfur dan mangan.



Gambar 4. 19 Hasil pengujian SEM-EDS pada lapisan oxide permukaan dalam Spesimen 3-R

4.7 Pembahasan

4.7.1 Analisis Hasil Pengujian Kode 1-R

Kegagalan yang terjadi pada *tube* dengan kode 1-R berbentuk *fish mouth rupture* dan *thick edged*. Pada dinding luar sisi *fireside* terdapat produk korosi berwarna cokelat. Pengujian spektrometer pada tube 1-R menyatakan bahwa komposisi kimia tube sesuai dengan ASTM A 210 Gr A1. Perubahan bentuk dan

adanya *void* pada mikrostruktur diketahui melalui pengujian metalografi. Hal tersebut menjadi indikasi bahwa tube terkena overheating. Nilai kekerasan pada tube 1-R setelah mengalami kegagalan melebihi batas maksimum yang diizinkan ASTM A 210 Gr A1. Pengujian kekerasan dilakukan pada kedua sisi *waterwall tube* dan diperoleh hasil bahwa *fireside* memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan sisi *wallside*. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa nilai *tensile strength tube* 1-R masih memenuhi standar namun nilai elongasi tube 1-R mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa tube 1-R kehilangan sifat keuletannya. Pengujian X-RD terhadap scale tube 1-R menunjukkan bahwa senyawa yang paling dominan pada scale tersebut adalah *Hematite* (Fe_2O_3) dan *Magnesium Differate* (Fe_2MgO_3) dengan persentase masing-masing sebesar 36%. Senyawa tersebut merupakan hasil reaksi dari *flue gas* dan baja karbon pada tube yang mempercepat terjadinya kegagalan.

4.7.2 Analisis Hasil Pengujian Kode 2-R

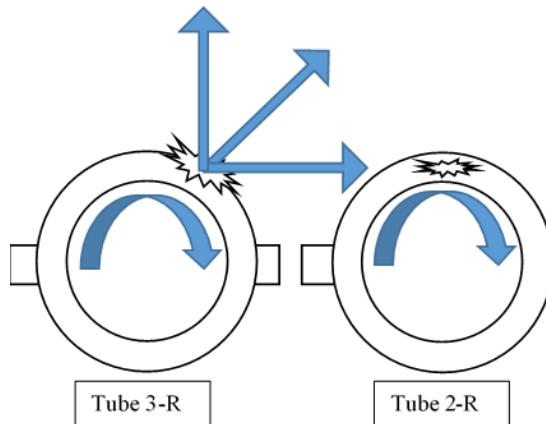
Kegagalan yang terjadi pada *tube* dengan kode 2-R berbentuk *thin lipped*. Pada permukaan luar sisi *fireside* tampak terjadi pengurangan ketebalan terutama di area kegagalan. Pengurangan ketebalan tersebut disebabkan oleh semburan steam dan air yang berasal dari kegagalan 3-R. Hal ini dapat dilihat dari letak bentuk kegagalan pada tube 3-R yang mengarah ke tube 2-R. Komposisi kimia pada tube kode 2-R diasumsikan sama dengan *tube* kode 1-R karena *tube* kode 2-R dan 1-R merupakan satu line tube. Pengujian metalografi dan SEM menunjukkan bahwa tidak terdapat indikasi kegagalan pada mikrostruktur *tube* 2-R. Pengujian kekerasan menunjukkan bahwa kekerasan *tube* kode 2-R melebihi standar ASTM A 210 gr A-1. Tidak ada perbedaan yang signifikan antara nilai kekerasan sisi *wallside* dengan sisi *fireside*.

4.7.3 Analisis Hasil Pengujian Kode 3-R

Kegagalan pada *tube* dengan kode 3-R berbentuk *fish mouth rupture* dan *thick edged*. Permukaan dinding luar tube mengalami

deformasi namun tidak terdapat produk korosi. Pada dinding permukaan dalam terdapat kerak okside berwarna hitam. Pengujian spektrometer pada tube 3-R menyatakan bahwa tube masih memenuhi standar ASTM A 210 Gr A1. Pengujian metalografi menunjukkan *microfissure* pada batas butir namun tidak disertai dengan perubahan bentuk mikrostruktur. Terbentuknya *microfissure* (*intergranular crack*) pada batas butir merupakan akibat dari berdifusinya gelembung methana hasil reaksi hidrogen dengan karbon pada baja karbon. Reaksi tersebut dapat terjadi akibat rusaknya lapisan pelindung (magnetit) pada dinding dalam tube serta adanya kontaminan pada air boiler berupa sodium. Nilai kekerasan pada area kegagalan *tube* (*fireside*) lebih rendah dibandingkan dengan nilai kekerasan pada *wallside*. Berdasarkan pengujian SEM-EDS dapat dilihat bentuk kerusakan secara mikro bahwa terdapat *microfissure* pada batas butir dan terbentuknya speroid karbida yang menjadi awal retakan. Unsur kimia yang terdapat pada terak okside permukaan dalam tube 3-R terdiri dari Fe, O, Si, S dan Mn dengan persentase dominan yaitu Fe dan O.

4.7.4 Mekanisme Kegagalan Waterwall Tube



Gambar 4. 20 Ilustrasi kegagalan tube 3-R dan 2-R

Berdasarkan data-data tersebut diatas diambil kesimpulan bahwa kegagalan dimulai dari tube kode 3-R. Tube Kode 3-R mengalami kegagalan akibat *hydrogen damage*. *Microfissure* yang terdapat pada batas butir merupakan akibat dari berdifusinya gelembung methana hasil reaksi antara *hydrogen* dengan karbon pada tube. Reaksi tersebut terjadi akibat rusaknya lapisan pelindung (*magnetite*) pada dinding dalam tube. Kerusakan tube 3-R ini mengakibatkan terjadinya erosi pada tube 2-R. Erosi tersebut terjadi terjadi dalam waktu yang lama sehingga mengakibatkan kebocoran pada tube 2-R. Kebocoran tersebut menyebabkan menurunnya *flowrate* pada tube 2-R sehingga terjadi *overheating* pada tube 1-R. *Overheating* tersebut diperparah oleh adanya *scale* pada permukaan luar *tube* 1-R.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil pengujian yang diadapatkan diatas maka dapat disusun kesimpulan sebagai berikut;

1. Jenis kegagalan yang terjadi pada *waterwall tube* nomor 1-R adalah *overheat*. Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk kegagalan berupa *thick edged* disertai dengan terjadinya deformasi mikrostruktur.
2. Jenis kegagalan yang terjadi pada *waterwall tube* nomor 3-R adalah *hydrogen damage*. Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk kegagalan berupa *thick edged* disertai dengan terjadinya deformasi pada area kegagalan.
3. Jenis kegagalan yang terjadi pada *waterwall tube* nomor 2-R adalah *Erosi*. Hal tersebut dibuktikan dengan bentuk kegagalan berupa *thin lipped* disertai dengan pengurangan ketebalan pada area kegagalan.
4. Mikrostruktur pada spesimen 1-R dan 3-R menunjukkan adanya *microfissure* pada batas butir.
5. Area kegagalan (*Fireide*) spesimen 1-R, 2-R dan 3-R memiliki nilai kegagalan lebih rendah dibandingkan nilai kekerasan pada area tidak gagal (*wallside*) hal ini dikarenakan terjadinya pelemahan antar batas butir.
6. Kekuatan pada spesimen 1-R mengalami penurunan hingga tidak memenuhi standar ASTM A210 Gr A1 hal ini terjadi akibat menurunnya kekuatan antar ikatan batas butir.
7. Komposisi kimia hasil pengujian spektrometer menunjukkan bahwa spesimen 1-R, 2-R dan 3-R masih memenuhi standar ASTM A210 gr A-1.

8. Pengujian SEM-EDS terhadap Oksida pada permukaan dalam tube 3-R menunjukkan bahwa oksida disusun oleh oksigen, silika, sulfur dan mangan. Sedangkan pengujian X-RD terhadap produk korosi yang ada pada permukaan luar tube 1-R menunjukkan bahwa produk korosi secara umum disusun oleh senyawa *Hematite* dan *Magnesium Differate*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Daftar Pustaka

- [1] Charlotte 1998. **Steam Generation.**: The Babcock & Wilcox Company.
- [2] 2002. **ASM Handbook Vol.9 Metallographic and Microstructure.** Material Park. Ohio : USA. ASM International.
- [3] 2002. **ASM Handbook Vol.11 Failure Analysis and Prevention.** Material Park. Ohio : ASM International.
- [4] 2002. **ASTM A 210/A 210 M Standard Specification for Seamless Medium- Carbon Steel Boiler and Super Heater Tubes.** West Conshohocken : ASTM International.
- [5] 2002. **ASTM E112 Standard Test Method For Determining Average Grain Size.** West Conshohocken : ASTM International.
- [6] Charlotte, 2013. **Boiler Tube Analysis.** : The Babcock & Wilcox Company.
- [7] 2013. **ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section I Part PG.** New York : The American Society of Mechanical Engineers.
- [8] 2013. **ASME Section II Part D Boiler & Pressure Vessel Code Section II Part D.** New York : The American Society of Mechanical Engineers.
- [9] Avner, Sidney H. 1974. **Introduction To Physical Metallurgy.** Singapore : McGraw-Hill Book Co.
- [10] Sidang, Agung. 2020. **Studi Analisis Kerusakan Tube Area Waterwall Boiler Akibat Hydrogen Damage Pada PLTU Batubara.** Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [11] Brooks, C. R dan A. Choudury. 2002. **Failure Analysis of Engineering Materials.** New York : McGraw-Hill.

- [12] Callister, William. 2007. **Material Science and Engineering An Introduction**. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- [13] ESDM Ministry.2019. **Indonesia Energy Outlook 2019**. Jakarta. Sekretariat Jendral Dewan Energi.
- [14] Mattew, Brent Saba. 2003. **Evaluation Of Mechanical Fitness For Service Of High Temperature Hydrogen Attacked Steel**. Louisiana State University.
- [15] Nishida, Shin-ichi. 1992. **Failure Analysis in Engineering Application**. Jordan Hill. Oxford : Butterworth- Heinemann Ltd.
- [16] Nitiswati, Sri, dkk. 2017. **Studi Komparasi Sifat Creep Tahap Sekunder pada Logam Las-lasan SA516 Gr.70**. Batan : Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir.
- [17] Port, Robert D dkk. 1991. **The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis**. New York : McGraw-Hill, Inc
- [18] Prakash, Banu. 2013. **Boiler Tube Failure**. New Delhi : Steag O&M Company.
- [19] Schweitzer, Philip A. 2003. **Metallic Materials Physical, Mechanical, and Corrosion Properties**. New York : Marcel Dekker, Inc.
- [20] Sharp, William. R., Dr. Roelf. Mostert. 2005. **Low Temperature Hydrogen Damage Assesment in the Gas and Refining Industries**. Bahrain
- [21] Teir, Sebastian dan Antto Kulla. 2002 **Steam/Water Circulation Design**. Helsinki : Energy Engineering & Environmental Publication
- [22] Woodruff, E. B., H. B. Lammers, dan T. F. Lammers. 2004. **Steam Plant Operation**. 8th Edition. New York : McGraw-Hill.

LAMPIRAN

Lampiran 1 : List Sample Tube (Oktober 2019)

No	Gambar	Kode	Keterangan dan Lokasi
1		A-1	Lokasi : Boiler Banten 1 Suralaya Sisi Boiler : Right/ bukit Elevasi : 40,800 sootblower D17 Nomor Pipa : 1 Sisi dalam tube: Berulir
2		AB-4	Lokasi : Boiler Banten 1 Suralaya Sisi Boiler : Right/ bukit Elevasi : 40,800 sootblower D17 Nomor Pipa : 4 Sisi dalam tube: Berulir
3		R-4 / Tube 4 Sisi Bukit atas	Lokasi : Boiler Banten 1 Suralaya Sisi Boiler : Bukit atas Elevasi : 40,800 sootblower D17 Nomor Pipa : 4 Sisi dalam tube: Berulir
4		R-4 cut / Tube 4 Sisi Bukit (cut)	Lokasi : Boiler Banten 1 Suralaya Sisi Boiler : Bukit Elevasi : 40,800 sootblower D17 Nomor Pipa : 4 Sisi dalam tube: Berulir
5		R-4-A / Tube 4 Sisi Bukit A (cut)	Lokasi : Boiler Banten 1 Suralaya Sisi Boiler : Bukit Elevasi : 40,800 sootblower D17 Nomor Pipa : 4 Sisi dalam tube: Berulir
6		R-4 Cacat / Tube 4 Sisi Bukit (Cacat)	Lokasi : Boiler Banten 1 Suralaya Sisi Boiler : Bukit Elevasi : 40,800 sootblower D17 Nomor Pipa : 4 Sisi dalam tube: Berulir

Lampiran 2 : Uji Spektrometer 3-R

Cont. Group:	LA STEEL					AN=119 TAN=53603	Common Group:		Tuesday, 16 June 2020 11:16							
PT. BARATA INDONESIA																
Sample No. [02] [BAJA TUBE 1 Ab-y] [FIRMAN]																
N=1	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr									
N=2	.15354	.20424	.72120	.01148	.00462	.10818	.19098									
Ave.	.14456	.20918	.74481	.01319	.00504	.11006	.19639									
	.14905	.20671	.73301	.01234R	.00483	.10912	.19368									
CV	4.2604	1.6896	2.2778	9.7858	6.1702	1.2221	1.9734									
	Mo	Cu	Co	Al	Pb	W	Ti									
N=1	.05055	.18831	.00932	.03889	.00029	.00000	.00285									
N=2	.05194	.20169	.01083	.04447	.00233	.00000	.00310									
Ave.	.05124	.19500	.01007R	.04168R	.00131R	.00000	.00297									
CV	1.9249	4.8517	10.585	9.4614	110.13	.00000	5.8956									
	V	Sn	Nb	B	Co	As	Sb									
N=1	.00074	.00846	.00000	.00066	.00143	.00015	.00780									
N=2	.00195	.01084	.00057	.00078	.00183	.00782	.00746									
Ave.	.00135R	.00965R	.00029R	.00072R	.00163R	.00399R	.00763									
CV	63.573	17.401	141.42	12.356	17.283	136.21	3.1336									
	Fe															
N=1	6.9849															
N=2	7.1898															
Ave.	7.0874															
CV	2.0442															
<i>Manager QC</i> <i>Dddy Irawan</i>					<i>Inspector</i> <i>Dudu</i> <i>Taufan Yudhistira</i>											

Lampiran 3 : Uji Spektrometer 1-R

Cont.	LA STEEL		AN=123 TAN=53607		Tuesday, 16 June 2020 11:20		
Group:	PT. BARATA INDONESIA			Common Group:			
	Sample No. [03] [R-4] [FIRMAN]			
N=1	C	.14822	.20880	.73767	.01312	.00491	.11105
N=2		.13840	.21364	.73997	.01330	.00520	.11041
Ave.		.14331	.21122	.73882	.01321	.00505	.11073
CV		4.8457	1.6201	.21989	.94887	4.0306	.41150
	Mo		Cu	Co	Al	Pb	W
N=1		.05223	.20482	.01013	.04553	.00244	.00000
N=2		.05270	.20165	.01090	.04810	.00263	.00000
Ave.		.05246	.20324	.01052	.04681	.00254	.00000
CV		.63314	1.1036	5.1422	3.8833	5.3429	.00000
	V		Sn	Nb	B	Co	As
N=1		.00251	.01123	.00176	.00081	.00160	.00720
N=2		.00345	.01158	.00311	.00083	.00187	.00630
Ave.		.00298R	.01141	.00244R	.00082	.00174R	.00675R
CV		22.210	2.1531	39.304	1.6956	11.199	9.4487
	Fe						
N=1		7.0257					
N=2		6.7569					
Ave.		6.8913					
CV		2.7582					
<i>Manager</i>		<i>Inspector</i>					
<i>D. Rulf</i>		<i>H. Jull</i>					
<i>Deddy Rawan</i>		<i>Taufan Yudhistira</i>					

Lampiran 4 : Data air PLTU PT. X

LAPORAN ANALISA AIR INTERNAL BULAN JULI 2019
PLTU UIP BANTEN 1 SURALAYA

Jenis Air	Parameter	Batasan	Satuan	1-Jul-19	2-Jul-19	3-Jul-19	4-Jul-19	5-Jul-19	6-Jul-19	7-Jul-19	8-Jul-19	9-Jul-19	10-Jul-19
CCR	Pressure steam	-	Mpa	15.77	16.23	15.97	15.91	15.92	15.26	13.65	15.78	15.83	15.62
	EPHU	Pesi	2287	2211	2315	2306	2308	2212	1979	2288	2296	2265	
	Bahan	-	MW	489	496	501	501	500	454	384	500	500	495
Condensate Water	pH	8.8-9.6	-	9.46	9.46	9.46	9.46	9.45	9.47	9.47	9.49	9.42	9.48
	Conductivity	≤10	µS/cm	8.87	8.16	8.15	8.01	8.07	8.68	9.28	8.27	8.21	8.75
	Silica (SiO ₂)	≤20	µg/L (mek)	7	8	6	5	9	9	9	8	8	10
Feed water	Sodium (Na ⁺)	≤5	µg/L (mek)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Chloride (Cl ⁻)	≤5	µg/L (mek)	17	7	10	14	16	17	16	17	12	12
	pH	8.8-9.6	-	9.48	9.47	9.47	9.46	9.46	9.47	9.48	9.47	9.46	9.48
Boiler Water	Conductivity	≤10	µS/cm	9.22	8.36	8.28	8.15	8.31	8.87	9.65	8.40	8.64	9.01
	Silica (SiO ₂)	≤20	µg/L (mek)	8	9	6	5	9	9	7	8	8	11
	Hydrazine (NH ₂ H)	10-30	µg/L (mek)	19	17	19	17	15	16	19	13	17	20
Steam drum water (saturated steam)	pH	9.0-10.0	-	9.38	9.39	9.39	9.41	9.39	9.30	9.38	9.37	9.33	9.44
	Conductivity	≤25	µS/cm	10.87	10.48	10.92	10.99	11.05	11.24	10.83	10.92	11.25	11.39
	Silica (SiO ₂)	EPHU	µg/L (mek)	46	47	43	37	43	42	45	42	40	42
Stator Cooling System	Sodium (Na ⁺)	EPHU	µg/L (mek)	15	15	16	17	18	16	15	17	15	15
	Chloride (Cl ⁻)	EPHU	µg/L (mek)	128	129	136	162	171	140	144	134	130	132
	pH	-	-	9.48	9.46	9.47	9.46	9.46	9.48	9.47	9.46	9.43	9.48
Condensate Water	Conductivity	≤10	µS/cm	9.16	8.43	8.31	8.12	8.21	8.83	9.89	8.38	8.53	8.96
	Silica (SiO ₂)	≤20	µg/L (mek)	9	9	6	5	9	8	6	7	7	10
	Sodium (Na ⁺)	≤10	µg/L (mek)	0.10	0.09	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.06	0.07	0.11
Feed water	pH	5.5-7.5	-	7.12	6.44	6.72	6.89	7.45	7.31	6.34	6.78	6.74	7.55
	Conductivity	≤2	µS/cm	0.38	0.37	0.35	0.37	0.44	0.40	0.29	0.40	0.33	0.42

Jenis Air	Parameter	Batasan	Satuan	11-Jul-19	12-Jul-19	13-Jul-19	14-Jul-19	15-Jul-19	16-Jul-19	17-Jul-19	18-Jul-19	19-Jul-19	20-Jul-19
CCR	Pressure steam	-	Mpa	15.70	11.46	15.38	14.97	15.17	15.41	14.87	15.77	15.20	15.35
	EPHU	Pesi	2277	1662	2230	2170	2199	2235	2156	2287	2203	2226	
	Bahan	-	MW	488	336	481	457	479	481	462	500	479	488
Condensate Water	pH	8.8-9.6	-	9.48	9.47	9.46	9.48	9.47	9.46	9.46	9.47	9.47	9.46
	Conductivity	≤10	µS/cm	9.01	9.42	7.82	8.50	8.25	8.72	8.53	8.87	8.95	8.16
	Silica (SiO ₂)	≤20	µg/L (mek)	8	9	9	8	9	8	8	9	10	9
Feed water	Sodium (Na ⁺)	≤5	µg/L (mek)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Chloride (Cl ⁻)	≤5	µg/L (mek)	11	12	17	7	8	7	12	5	9	6
	pH	8.8-9.6	-	9.48	9.48	9.47	9.48	9.45	9.47	9.33	9.48	9.48	9.47
Boiler Water	Conductivity	≤10	µS/cm	9.24	9.64	7.96	8.59	8.49	8.98	8.44	9.26	9.21	8.41
	Silica (SiO ₂)	≤20	µg/L (mek)	8	9	9	8	8	8	8	9	10	9
	Hydrazine (NH ₂ H)	10-30	µg/L (mek)	19	22	14	21	15	16	16	17	15	13
Steam drum water (saturated steam)	pH	-	-	9.50	9.48	9.47	9.47	9.47	9.47	9.47	9.48	9.48	9.47
	Conductivity	≤10	µS/cm	9.18	9.64	7.98	8.57	8.59	8.92	8.73	9.14	9.11	8.33
	Silica (SiO ₂)	≤20	µg/L (mek)	7	8	8	8	8	8	8	9	10	9
Stator Cooling System	Sodium (Na ⁺)	≤10	µg/L (mek)	0.06	0.07	0.06	0.12	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08
	Conductivity	≤2	µS/cm	0.40	0.29	0.41	0.32	0.35	0.33	0.38	0.35	0.46	0.30

Lampiran 5 : Hasil Uji Tarik



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
LABORATORIUM METALURGI
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FTI RS - ITS
Kampus ITS Keputh Sukolilo Surabaya 60111
Telp/fax: 031 591 5060 email: metalmesin@me.its.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN TESTING REPORT

Nomor Laporan Report Number	131/MS – MET/LP/VII/2020			Tanggal Date	7 Juli 2020		
Dibuat untuk Conducted for	Bpk. Suwarno, ST, MSc, Ph.D						
Material Material	Pipa Kode. 1, 3, 4, 5, 6, 8 Pipa Kode. A, B, C, D, E	Kode Material Material Code	Produk :				
Tempat Pengujian Place of testing	Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Mesin FTI – ITS						
Tanggal Pengujian Date of testing	Mulai Start	3 Juli 2020	Selesai Completion	7 Juli 2020			
Jenis Pengujian Type of test	Uji Tarik Material						
Peralatan Equipment	Mesin Uji Universal "WOLPERT" Kapasitas 300 kN						
HASIL_PENGUJIAN RESULT							

Kode. Spes.	Kode Tube	Nama Barang	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
1.	Pipa No. 1. R66 T3 #6	Pipa	-	470.59	23.92
3.	Pipa No. 3 R55 T1 #6		-	447.97	27.16
4.	Pipa No. 4 R-4 Cut #8		-	491.56	29.10
5.	Pipa No. 5 T22 New #6		-	502.70	32.22
6.	Pipa No. 9 T91 New #7		-	758.65	20.17
8.	Pipa No. 8 SA 210 Al New #7		-	524.77	35.84

Dikerjakan oleh Executed by	Disetujui oleh Approved by	Halaman Page
Bambang Sumantri, ST NIP 196102011981031004	Dr.Eng. SUTIKNO, ST, MT NIP. 197407032000031001	1 Dari -Of
		3



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
LABORATORIUM METALURGI
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FTIRS - ITS
Kampus ITS Kepulauan Sokoillo Surabaya 60111
Telp/fax: 031 591 5060 email: metalmesin@me.its.ac.id

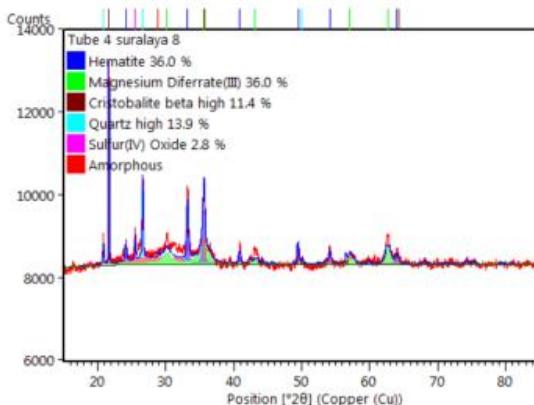
Kode. Spes.	Kode Tube	Nama Barang	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
A.	Pipa No. 4 R-4 Cacat #8	Pipa	-	497.40	24.82
B.	Pipa No. 2 R65 T10 #6		-	462.51	30.63
C.	Pipa No. 7 SA 210 A1 #7		-	509.15	31.39
D.	Pipa No. 4 R66 T10 #6		-	592.89	30.17
E.	F8.5 #8		-	458.07	30.33

Lampiran 6 : Hasil Uji X-RD

PT Multi Teknindo Infotronika

Hasil Pengukuran

Hasil pengukuran disajikan dengan menampilkan XRD pattern dari ketujuh sampel yang diukur, kemudian dilanjutkan dengan penjelasan mengenai XRD pattern tersebut. Berikut merupakan hasil pengukuran ketujuh sampel yang telah dilakukan.



Gambar (2). XRD pattern sampel Tube 4 suralaya 8

Tabel 3. Peak List sampel Tube 4 suralaya 8

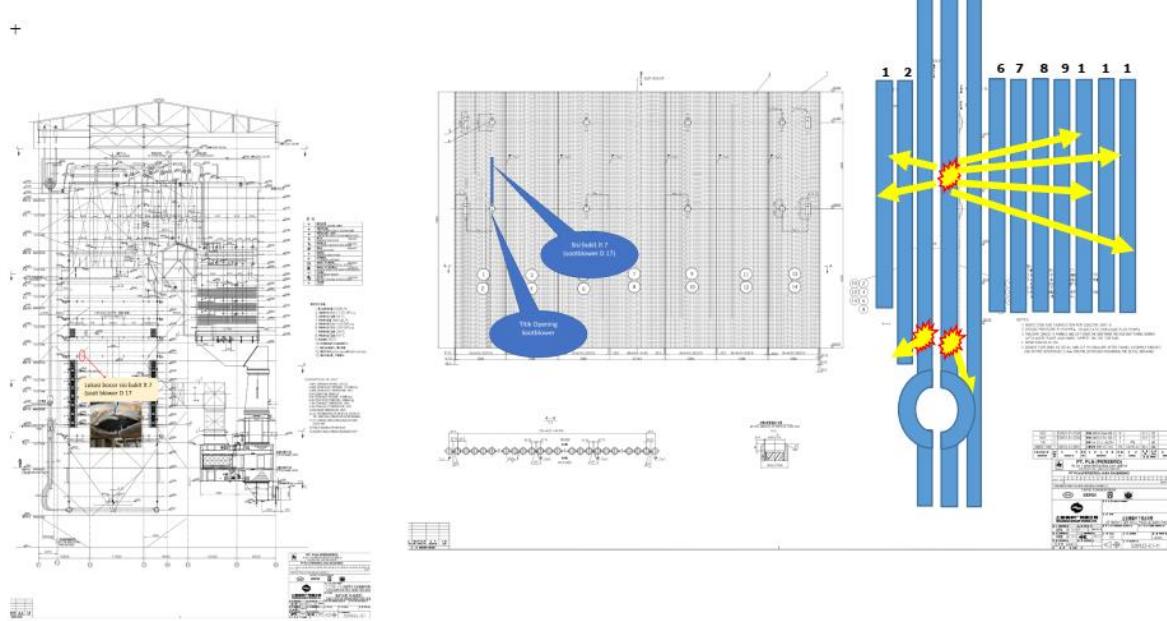
Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.8185	395.52	0.1230	4.26339	8.91
21.6640	4437.09	0.0663	4.09886	100.00
24.1396	345.76	0.2427	3.68382	7.79
25.4666	491.33	0.1093	3.49480	11.07
26.5982	1570.82	0.1349	3.34863	35.40
28.8406	99.96	10.9618	3.09317	2.25
30.1602	180.87	1.1362	2.96076	4.08
33.2084	1016.52	0.2397	2.69563	22.91
35.5288	489.24	1.1001	2.52471	11.03
35.5740	953.52	0.2391	2.52160	21.49
35.7559	588.22	0.0860	2.50920	13.26
40.8475	233.59	0.2378	2.20741	5.26
43.1851	93.35	1.0396	2.09318	2.10
49.4636	414.22	0.2362	1.84118	9.34

50.0775	123.67	0.2168	1.82004	2.79
54.1476	272.33	0.2358	1.69245	6.14
57.1233	161.95	0.8904	1.61115	3.65
62.7330	300.86	0.8077	1.47989	6.78
63.9076	204.60	0.2358	1.45549	4.61
63.9645	3.18	0.2843	1.45434	0.07
64.2613	115.06	0.1431	1.44833	2.59

Tabel 4. Pattern List sampel Tube 4 suralaya 8

Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
	98-002-2505	45	Hematite	0.000	0.287	Fe2 O3
	98-015-2468	42	Magnesium Diferrate(III)	0.000	0.280	Fe2 Mg1 O4
	98-007-7461	15	Cristobalite beta high	0.000	0.101	O2 Si1
*	98-004-2498	20	Quartz high	0.000	0.335	O2 Si1
	98-002-4645	16	Sulfur(IV) Oxide	0.000	0.149	O2 S1

Lampiran 8 : Lokasi Kegagalan





Gambar titik Kebocoran dan penggantian tube



Penulis bernama lengkap Zhulkvily Theodorick Rumahorbo, lahir di Dolok Sanggul, 12 Desember 1996. Merupakan anak pertama dari pasangan B. Rumahorbo dan A. Sagala. Penulis telah menempuh pendidikan formal pertama di TK. Bintang Timur Lubuk Pakam kemudian melanjutkan pendidikan ke SD RK Serdang Murni Lubuk Pakam setelah itu ke SMP Negeri 1 Lubuk Pakam, kemudian merantau ke kota orang untuk melanjutkan pendidikan lanjut ke SMA RK Budi Mulia

Pematangsiantar. Penulis diterima di departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem pada tahun 2015 dengan NRP 0211154000111.

Selama menjalani status sebagai mahasiswa, penulis aktif dalam berbagai kegiatan kemahasiswaan. Kegiatan kemahasiswaan penulis dimulai dari berbagai kepanitian kecil seperti MAKRAB dan Event mahasiswa lainnya. Kemudian mengemban tanggung jawab sebagai salah satu staf departemen organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin periode 2016/2017. Kemudian berperan dalam kaderisasi mahasiswa mesin 2017 sebagai anggota Steering Commitee sekaligus Kepala Divisi Internal Keluarga Mahasiswa Mesin Himpunan Mahasiswa Mesin periode 2017/2018. Penulis menjalani tahun-tahun terakhir sebagai mahasiswa dengan menjadi asisten praktikum pada Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin FTIRS ITS.