



Thesis - TM 185400

***Analisa Kegagalan High Pressure Water Wall
Seamless Tube pada Subcritical Boiler di
PLTU Pangkalan Susu Sumatera Utara***

**VIKI SOFYAN HADI, S.T.
NRP. 6007201034**

**Dosen Pembimbing
Fahmi Mubarak, ST., M.Sc., Ph.D.**

**Program Magister
Bidang Keahlian Manajemen Energi
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022**



Thesis - TM 185400

***Analisa Kegagalan High Pressure Water Wall
Seamless Tube pada Subcritical Boiler di
PLTU Pangkalan Susu Sumatera Utara***

**VIKI SOFYAN HADI, S.T.
NRP. 6007201034**

**Dosen Pembimbing
Fahmi Mubarak, ST., M.Sc., Ph.D.**

**Program Magister
Bidang Keahlian Manajemen Energi
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022**



Thesis - TM 185400

**Failure Analysis of the High Pressure Water
Wall Seamless Tube at Subcritical Boiler in
PLTU Pangkalan Susu Sumatera Utara**

**VIKI SOFYAN HADI, S.T.
NRP. 6007201034**

**Dosen Pembimbing
Fahmi Mubarok, ST., M.Sc., Ph.D.**

**Master Program in Energy Management
Mechanical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

VIKI SOFYAN HADI

NRP: 6007201034

Tanggal Ujian: 14 Juli 2022

Periode Wisuda: September 2022

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP: 197801152003121002




Penguji:

1. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T
NIP: 197407032000031001
2. Wahyu Wijanarko, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP: 198202092012121001
3. Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP: 198512022014042002



Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem



Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.
NIP: 196604021989031002



KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan kemudahan, petunjuk dan kekuatan kepada penulis. Sholawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada baginda besar Rosulullah Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “*Analisa Kegagalan High Pressure Water Wall Seamless Tube pada Subcritical Boiler di PLTU Pangkalan Susu Sumatera Utara*”. Penyusunan tesis ini merupakan persyaratan kelulusan Program Studi S-2 Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari bahwa terlaksananya penulisan tesis ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung dan membantu dalam penulisan tesis ini, antara lain kepada:

1. Bapak dan Ibu tercinta selaku orangtua penulis yang tiada henti selalu memotivasi dan selalu mendoakan yang terbaik bagi anak-anaknya serta memberikan support moril maupun material yang terbaik yang penulis dapat di dunia ini untuk terus belajar menuntut ilmu diiringi dengan pondasi ibadah.
2. Adikku Syifatul Ismaniah dan Muhammad Afwan Al-Akrom yang selalu memberikan semangat dan selalu mendokan untuk kesuksesan penulis.
3. Istriku Syifa Giani dan anakku Ammar Fathee At-Tsaqif yang paling penulis cintai dan banggakan, yang selalu memberikan dukungan motivasi, semangat, doa, pengorbanan, dan perhatian tiada henti untuk kesuksesan penulis.
4. Bapak Fahmi Mubarak, ST., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing terbaik, bapak Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T., bapak Wahyu Wijanarko, ST., M.Sc., Ph.D dan ibu Ika Dewi Wijayanti ST., ME., Ph.D. selaku dosen penguji terbaik yang sudah memberikan banyak bimbingan dan masukan ilmu terhadap laporan tesis ini untuk kemajuan penulis kedepan.

5. Bapak General Manajer beserta jajaran Manajemen PT. Indonesia Power PLTU Pangkalan Susu OMU dalam supportnya untuk pengambilan data maupun perizinannya.
6. PT. Indonesia Power selaku anak perusahaan PLN grup tempat penulis berdinasi.
7. Rekan-rekan kerja Tim Engineering dan Rekan Pemeliharaan Unit PLTU Pangkalan Susu OMU, serta Rekan MSU Head Office PT. Indonesia Power, terimakasih atas support dan bantuannya selama penulis dalam melakukan pengerjaan tesis.
8. Rekan-rekan seperjuangan S2 mandiri Pangkalan Susu, Adipala, Kalbar 1 dan Palabuhan Ratu atas perjuangan dan saling supportnya, semoga yang belum selesai diberikan kemudahan untuk segera menyusul.
9. Dosen pengajar dan Staff di Teknik Mesin ITS yang bersedia selalu meluangkan waktunya untuk mengajar kuliah kami selepas jam kerja.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan tesis ini namun hal tersebut bukanlah sesuatu yang disengaja, tetapi semata-mata disebabkan karena kekhilafan dan keterbatasan pengetahuan yang dimiliki. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan. Akhir kata, semoga Tesis ini bermanfaat bagi pembaca dan Unit PLTU Pangkalan Susu OMU serta PT. Indonesia Power pada umumnya dalam keandalan Unit Pembangkitan.

Surabaya, 29 Juli 2022

Viki Sofyan Hadi, S.T.

ANALISA KEGAGALAN HIGH PRESSURE WATER WALL SEAMLESS TUBE PADA SUBCRITICAL BOILER DI PLTU PANGKALAN SUSU SUMATERA UTARA

Nama mahasiswa : Viki Sofyan Hadi, ST.
NRP : 6007201034
Pembimbing : Fahmi Mubarak, ST., M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Keandalan *boiler* memegang peranan penting dalam menjaga performa Unit PLTU Pangkalan Susu OMU Medan. Kegagalan *tube boiler* mempengaruhi kestabilan operasi secara menyeluruh sehingga harus dianalisa penyebabnya. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir kegagalan serupa di masa mendatang. *Boiler tube rear water wall seamless tube* material GB5310-20G line 132 elevasi 29.8 mdpl dan 37 mdpl terdeteksi mengalami kebocoran pada Maret 2022. Kegagalan terjadi pada usia boiler yang masih muda yaitu 7 tahun sejak *Comercial Operation Date* pada tahun 2015 karena *boiler* di desain untuk beroperasi selama 30 tahun.

Hasil pengamatan *visual* dan pengukuran dimensi menunjukkan pola kegagalan membentuk *fish-mouth rupture* panjang 100 mm dan lebar 42 mm elevasi 37 mdpl. Hasil pengukuran ketebalan *tube* mengalami penurunan nilai ketebalan dibawah MWT berdasarkan *standard* ASME Section I. Kebocoran juga diamati pada elevasi 29.8 mdpl ditemukan kegagalan dalam bentuk lubang. Hasil identifikasi pada *tube* kegagalan *fish-mouth* komposisi kimia menunjukkan material GB5310-20G. Nilai kekerasan 139 HB tepi *rupture* lebih tinggi dari daerah yang jauh dari kegagalan 113 HB. Pengamatan *metallography* pada tepi *fish-mouth rupture* menunjukkan terjadi degradasi struktur mikro *pearlite* yang melepaskan unsur *carbon* sehingga terbentuknya *spherodized carbide*, masuk dalam kategori C ke D sesuai standar ERA. Hasil SEM daerah *fish-mouth* menunjukkan retakan *transgranular* yang merupakan ciri khas dari *short-term overheating*. Pengujian *deposit* dan EDS menunjukkan senyawa *magnetite* pada daerah kegagalan, hal ini karena oksigen terlarut dalam air *boiler* yang berlebih bereaksi dengan Fe pada suhu tinggi membentuk Fe₃O₄ dan terjadi pengikisan tebal material. Mekanisme kegagalan *fish-mouth* diawali dari penurunan debit air *rear water wall tube* akibat kebocoran elevasi 29.8 mdpl menciptakan *hot-spot line pipe* 132. Penyerapan panas berlebih terjadi pada *elbow* elevasi 37 mdpl, proses kelebihan panas 370 °C mengakibatkan degradasi C pada *pearlite* yang lepas menjadi *spherodized carbide*. Dan senyawa *ferromagnetite* (Fe₃O₄) ditemukan pada *deposit* memicu kenaikan kekerasan serta didukung dengan perubahan struktur butir yang kasar. Kondisi ini menyebabkan munculnya insiasi *crack* dari area *spherodize carbide* sehingga menjalar secara *transgranular* akibat dikenai *pressure* 14 Mpa secara *continue* dengan bentuk kegagalan *fish-mouth* karena kelebihan penyerapan panas pada *elbow* elevasi 37 mdpl dengan pola kegagalan *short-term overheating*.

Kata kunci: *Rear water wall tube, short term overheating, tube erosion*

FAILURE ANALYSIS OF THE HIGH PRESSURE WATER WALL SEAMLESS TUBE AT SUBCRITICAL BOILER IN PLTU PANGKALAN SUSU SUMATERA UTARA

By : Viki Sofyan Hadi, ST.
Student Identity Number : 6007201034
Supervisor : Fahmi Mubarok, ST., M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Boiler reliability plays an important role in maintaining the performance of the PLTU Pangkalan Susu OMU Medan Unit. The failure of the tube boiler affects the stability of the overall operation so that the cause must be analyzed. This is done to minimize similar failures in the future. Boiler tube rear water wall seamless tube material GB5310-20G line 132 with an elevation of 29.8 masl and 37 masl was detected as having a leak in March 2022. The failure occurred at a young boiler age of 7 years since the Comercial Operation Date in 2015 because the boiler was designed to operate for 30 years.

The results of visual observations and measurement of dimensions showed a failure pattern to form a fish-mouth rupture with a length of 100 mm and a width of 42 mm with an elevation of 37 meters above sea level. The results of the measurement of tube thickness experienced a decrease in the thickness value below MWT based on the ASME Section I standard. Leaks were also observed at an elevation of 29.8 masl and failure was found in the form of holes. The identification results on the fish-mouth failure tube chemical composition showed the material GB5310-20G. The hardness value of 139 HB at the rupture edge was higher than the area far from failure of 113 HB. Metallography observations on the edge of the fish-mouth rupture showed that there was a degradation of the microstructure of peralite which released carbon elements so that the formation of spherodized carbide was categorized as C to D according to ERA standards. SEM results of the fish-mouth region show transgranular cracks which are characteristic of short-term overheating. Deposite and EDS tests showed magnetite compounds in the failure area, this was because excess dissolved oxygen in boiler water reacted with Fe at high temperatures to form Fe₃O₄ and thick material was eroded. The mechanism of fish-mouth failure begins with a decrease in rear water wall tube water flow due to leakage at an elevation of 29.8 mdpl creating a hot-spot line pipe 132. Absorption of excess heat occurs at the elbow elevation of 37 mdpl, the process of excess heat at 370 C results in C degradation of the loose pearlite. to spherodized carbide. And the ferromagnetite compound (Fe₃O₄) found in the deposit triggers an increase in hardness and is supported by changes in the coarse grain structure. This condition causes the emergence of crack initiation from the spherodize carbide area so that it spreads transgranular due to being subjected to a continuous pressure of 14 MPa with a fish-mouth failure form due to excess heat absorption at the 37 mdpl elevation elbow with a short-term overheating failure pattern.

Keywords: Rear water wall tube, overheating, tube erosion

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	8
2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja <i>Boiler</i>	8
2.2 <i>Rear Water Wall Tube</i>	10
2.3 Material <i>Rear Water Wall Tube</i>	12
2.4 Analisa Kegagalan.....	14
2.5 Kegagalan <i>Tube</i> Karena <i>Overheating</i>	16
2.5.1 <i>Thick Lip Rupture</i>	17
2.5.2 <i>Thin Lip Rupture</i>	18
2.6 <i>Fish Mouth Failure</i>	20
2.7 Penelitian Terdahulu	22

2.8 <i>Minimum Wall Thickness</i>	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	29
3.2 Peralatan Penelitian	30
3.3 Langkah-Langkah Penelitian.....	33
BAB IV PEMBAHASAN DAN ANALISA DATA.....	36
4.1 Sumber Utama Kegagalan <i>Rear Water Wall Tube</i>	36
4.1.1 Analisa Penyebab <i>Tube Rupture</i>	36
4.2 Analisa <i>Overheating</i> pada <i>Rear Water Wall Tube</i>	40
4.2.1 Inspeksi Visual	40
4.2.2 <i>Dimensional Check</i> dan <i>Thickness Measurement</i>	41
4.2.3 Pengujian Komposisi Material	44
4.2.4 Pengujian Kekerasan	45
4.2.5 Pengujian <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	47
4.2.6 Gangguan <i>Sootblower IR20</i>	50
4.2.7 <i>Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)</i>	50
4.2.8 Data Kualitas Air <i>Boiler</i>	53
4.3 Analisa Kegagalan Secara Keseluruhan	54
4.4 <i>Fishbone</i> Diagram RCFA.....	56
4.5 Kajian Financial.....	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA.....	64
BIOGRAFI PENULIS	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Temuan 1 kegagalan <i>fish mout</i> pada <i>rear water wall tube</i> elevasi 37 mdpl area <i>nose</i>	3
Gambar 1.2 <i>Mapping</i> lokasi kebocoran <i>rear water wall tube</i> elevasi 37 mdpl	3
Gambar 1.3 Temuan 2 kegagalan pada elevasi 29.8 mdpl <i>rear wall tube</i> berdekatan dengan sootblower IR20	4
Gambar 2.1 Skematik sistem <i>boiler</i> PLTU	9
Gambar 2.2 Klasifikasi boiler	10
Gambar 2.3 Area <i>rear water wall tube</i> pada <i>drawing boiler</i> PLTU Pangkalan Susu OMU	11
Gambar 2.4 Komposisi kimia material GB5310 20G pada <i>mill certificate</i>	13
Gambar 2.5 Komposisi kimia GB5310 20G berdasarkan <i>standard</i> GB5310 China	13
Gambar 2.6 Diagram faktor-faktor penyebab kerusakan suatu komponen	15
Gambar 2.7 Pecah <i>thick lip</i> dan struktur mikro permukaan akibat <i>overheating</i> ...	17
Gambar 2.8 Kegagalan <i>short term overheating</i>	19
Gambar 2.9 Internal deposit pada <i>tube boiler</i>	20
Gambar 2.10 Kegagalan <i>fish mouth</i> pada <i>short term overheat</i>	20
Gambar 2.11 Foto makro dan lokasi sampel pada kegagalan <i>tube</i> A, (a) retak sampai permukaan, (b) daerah tonjolan, (c) permukaan bagian dalam <i>tube</i> , (d) permukaan bagian dalam daerah tonjolan.....	23
Gambar 2.12 Gambar kamera dari kondisi <i>tube</i> yang gagal	23
Gambar 2.13 <i>Heavy clinkers</i> menutupi wilayah <i>primary superheater</i> dan mengisi ruang kosong antara panel, dan berpotensi <i>localized overheating</i> di beberapa <i>spot</i> yang tidak tertutup.....	24
Gambar 2.14 <i>Tube primary superheater</i> yang gagal dengan retakan terbuka lebar	25
Gambar 2.15 Distribusi dan Vektor Kecepatan pada Penampang Lintang yang Berbeda (Sumber: Choi & Kim, 2009)	26
Gambar 2.16 Distribusi Temperatur (Sumber: Choi & Kim, 2009)	26

Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	30
Gambar 3.2 <i>Tools grinding, polishing, dan etching</i>	31
Gambar 3.3 <i>Microscope optic</i>	31
Gambar 3.4 Alat <i>Positive Material Identification</i>	32
Gambar 3.5 <i>Ultrasonic Thickness Gauging Olympus</i>	32
Gambar 3.6 Alat uji kekerasan TMTECK THL500	33
Gambar 4.1 <i>Visual</i> inspeksi kegagalan <i>rear water wall tube</i> elevasi 37 mdpl	37
Gambar 4.2 <i>Visual</i> inspeksi kegagalan <i>rear water wall tube</i> elevasi 29.8 mdpl (area <i>Sootblower IR20</i>).....	38
Gambar 4.3 Lokasi <i>mapping</i> kebocoran <i>rear wall tube</i> elevasi 37 mdpl (<i>nose</i>)... 38	
Gambar 4.4 Lokasi <i>mapping</i> kebocoran <i>rear wall tube</i> elevasi 29.8 mdpl (area <i>sootblower IR20</i>).....	39
Gambar 4.5 Dimensional <i>tube</i> yang mengalami <i>fracture</i>	41
Gambar 4.6 Lokasi pengukuran <i>thickness elbow</i> elevasi 37 mdpl (<i>nose</i>) yang mengalami <i>fracture</i>	41
Gambar 4.7 Data hasil pengukuran <i>thickness</i> pada Asesmen Boiler Unit 2 tahun 2021	42
Gambar 4.8 Titik pengukuran <i>thickness</i> elevasi 29.8 mdpl area <i>sootblower IR20</i>	43
Gambar 4.9 Lokasi pengujian <i>Positive Material Identification</i> Bruker S1 Titan . 44	
Gambar 4.10 Titik pengujian kekerasan	45
Gambar 4.11 <i>Deposit inside tube</i> area kegagalan	46
Gambar 4.12 Hasil pengujian <i>deposit</i>	46
Gambar 4.13 Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	49
Gambar 4.14 Lokasi <i>sootblower IR20</i> tidak beroperasi normal	50
Gambar 4.15 Daerah lokasi <i>base metal</i> tanpa retakan dengan skala 50 mikron .. 51	
Gambar 4.16 Daerah lokasi retakan <i>tube failure</i> dengan skala 50 mikron	52
Gambar 4.17 Spektrum unsur komposisi kimia <i>material rear water wall tube</i> retakan	53
Gambar 4.18 <i>Fishbone</i> diagram kebocoran <i>Rear Water Wall Tube Boiler Unit 2</i>	56
Gambar 4.17 <i>Fishbone</i> diagram <i>short-term overheating</i>	57

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Kronologi kebocoran <i>rear water wall tube boiler</i> PLTU Pangkalan Susu OMU	2
Tabel 2.1 Parameter Operasi Boiler	12
Tabel 2.2 Sebab-sebab kegagalan <i>tube boiler</i>	16
Tabel 2.3 <i>Short term overheating</i> pada <i>tube</i> (Sumber: EPRI Boiler Condition Assessment Guideline, 2006)	21
Tabel 4.1 Hasil pengukuran <i>thickness elbow</i> elevasi 37 mdpl (<i>nose</i>) yang mengalami <i>fracture</i>	42
Tabel 4.2 Hasil pengukuran <i>thickness tube</i> elevasi 29.8 mdpl area <i>sootblower</i> IR20	43
Tabel 4.3 Hasil pengujian PMI Bruker S1 Titan	44
Tabel 4.4 Hasil <i>hardness testing</i> HB pada <i>material rear wall tube</i> 20G	45
Tabel 4.5 Data unsur komposisi kimia <i>material tube</i> tanpa retakan	51
Tabel 4.6 Hasil komposisi material secara kuantitatif pada retakan <i>tube</i>	53
Tabel 4.7 Data pengambilan kualitas air boiler pada tanggal 20 Maret 2022	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PT Indonesia Power (IP) khususnya Pangkalan Susu Operation and Maintenance Services Unit (OMU) yang berada di desa Tanjung Pasir Kecamatan Pangkalan Susu, Kabupaten Langkat, Provinsi Sumatera Utara mempunyai tanggung jawab dalam menjaga keberlangsungan pasokan energi listrik. Oleh karena itu, pemantauan dan perbaikan sistem secara menyeluruh di Unit Pembangkitan dilakukan untuk meminimalisir terjadinya kegagalan yang tidak terduga.

PLTU Pangkalan Susu OMU Sumatera Utara mempunyai kapasitas daya sebesar 4 x 200 MW. Bahan bakar yang digunakan adalah batubara dengan kalori rendah (*low rank coal*) dengan nilai kalor 3900-4500 KCal/kg (HHV/*High Heating Value*). Konsumsi rata-rata batubara yang dibutuhkan unit ini adalah 3072 ton/hari/unit pada beban penuh 200 MW.

Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan *boiler* sebagai komponen untuk menghasilkan uap dari pemanasan *feedwater* oleh pembakaran batu bara pada *tube boiler*. *Rear water wall tubes boiler* mengubah *feedwater* dari fasa cair menjadi uap basah dengan temperatur mencapai 350 °C. Setelah melalui *rear wall tube boiler*, uap basah masuk kedalam *steam drum* dimana proses pemisahan antara fasa uap dan air terjadi. Uap basah kemudian dipanaskan bertahap melalui *tube super heater* sehingga dihasilkan uap bertekanan tinggi dan suhu yang tinggi yang dapat digunakan untuk memutar *High Pressure Turbin*. Uap dari HP Turbin, kemudian digunakan untuk pemanasan ulang (*reheat system*) untuk menaikkan *temperature reheat steam* yang kemudian menuju *Intermediate Pressure Turbin* hingga terhubung ke *Low Pressure Turbin* dan *Generator* yang menghasilkan energi listrik. Siklus ini berjalan secara *continue* pada Pembangkit PLTU.

Proses transfer kalor dari gas buang ke *fluida* kerja mengakibatkan kenaikan temperatur dan tekanan pada *tube boiler* sehingga terkadang terjadi kegagalan pada

tube boiler. Kegagalan pada *unit boiler* ini menyebabkan terhentinya operasi PLTU sehingga listrik tidak dapat dihasilkan dan terjadi kerugian secara materi yang signifikan.

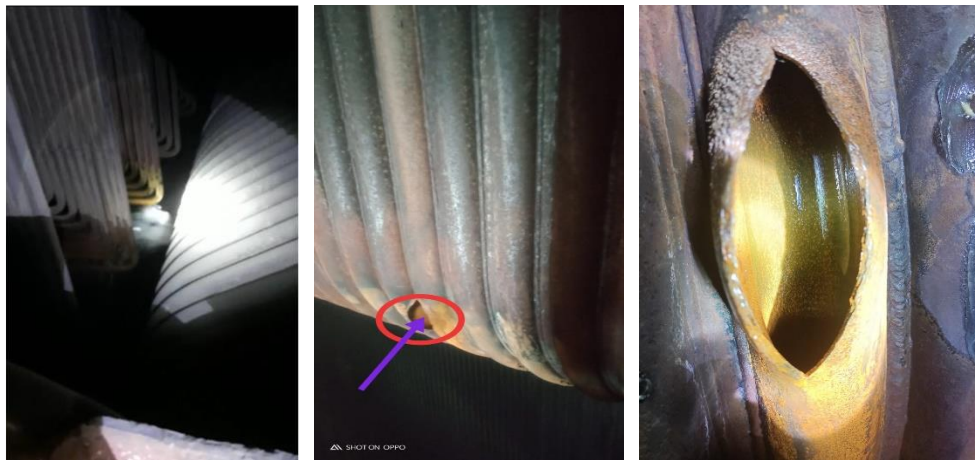
Pada 20 Maret 2022, *rear water wall tubes* di *boiler* Unit 2 PLTU Pangkalan Susu terdeteksi mengalami kebocoran yang diamati dengan naiknya kebutuhan *feedwater* diluar kapasitas produksi *demin water*. Setelah dilakukan inspeksi, hasil pengamatan menunjukkan kebocoran pada *rear water wall tube* nomor 132, elevasi 29.8 mdpl dan elevasi 37 mdpl dengan kegagalan *fish mouth*. Untuk melakukan perbaikan, PLTU dihentikan selama 7 hari. Tabel 1.1 menunjukkan kronologi kejadian kebocoran *tube boiler* pada *rear water wall tube* PLTU Pangkalan Susu.

Tabel 1.1 Kronologi kebocoran *rear water wall tube boiler* PLTU Pangkalan Susu OMU

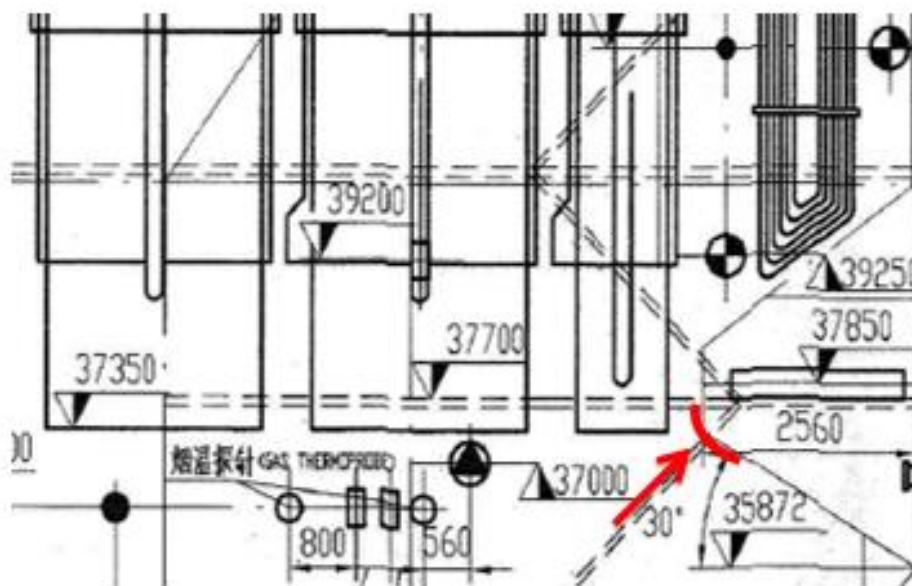
No.	Waktu	Deskripsi
1	20 Maret 2022	Sedang dilakukan perbaikan kebocoran pada sisi <i>drain downcomer</i> oleh mitra secara <i>online sealing</i> "status in progress"
2	20 Maret 2022 Jam 22.58 WIB	Terjadi kebocoran <i>boiler</i> , Unit operasi pada beban 189 MW <i>Main steam pressure</i> dan <i>Main steam flow</i> turun drastis Terdengar suara gemuruh di dalam <i>boiler</i> Air keluar dari sisi bawah boiler dekat SSC
3	20 Maret 2022 Jam 23.49 WIB	Unit 2 Stop
4	21 Maret 2022 Jam 07.00 WIB	Proses <i>cooling down boiler</i>
5	21 Maret 2022 Jam 11.00 WIB	<i>Open manhole boiler</i>
6	21 Maret 2022 Jam 14.00 WIB	<i>Stop BFP, Drain steam drum</i>
7	21 Maret 2022 Jam 16.00 WIB	Inspeksi ke dalam boiler mencari titik kebocoran (ditemukan dua titik kebocoran pada elevasi 37 mdpl dengah kegagalan <i>fish mouth</i> dan elevasi 29.8 mdpl, kebocoran erosi pada <i>row</i> yang sama yaitu <i>tube rear water wall line pipe 132 elbow nose</i>)
8	21 Maret 2022 Jam 20.00 WIB	<i>Thickness tube boiler</i> pada area yang mengalami kebocoran

9	22 Maret 2022 Jam 10.00 WIB	Dilakukan pemotongan tube yang mengalami kegagalan untuk perbaikan <i>retubing</i> dan sampelnya dilakukan <i>failure analysis</i>
---	--------------------------------	--

Inspeksi dilakukan ke dalam boiler pada *area rear water wall tube* setelah proses *cooling down* dan keadaan *inside boiler* aman untuk dilakukan akses. Ditemukan titik kebocoran pada elevasi 37 mdpl *area nose* dengan bentuk *rupture fish mouth*. Temuan 1 disajikan pada Gambar 1.1 dibawah ini:

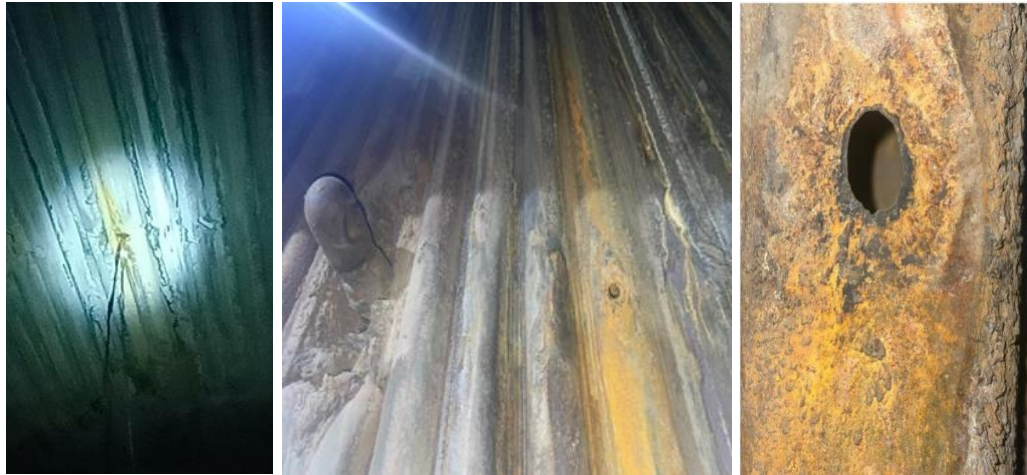


Gambar 1.1 Temuan 1 kegagalan *fish mout* pada *rear water wall tube* elevasi 37 mdpl *area nose*



Gambar 1.2 Mapping lokasi kebocoran *rear water wall tube* elevasi 37 mdpl

Setelah ditemukan titik kebocoran pertama pada elevasi 37 mdpl, inspeksi dan identifikasi permasalahan berlanjut karena ditemukan titik kebocoran kedua pada elevasi 29.8 mdpl *pipa rear water wall tube* dengan no 132 pada *line* yang sama. Berikut temuan 2 disajikan pada Gambar 1.3 dibawah ini:



Gambar 1.3 Temuan 2 kegagalan pada elevasi 29.8 mdpl *rear wall tube* berdekatan dengan *soot blower IR20*

Analisa kegagalan pada *tube boiler* ini sangat penting dilakukan mengingat usia operasi *boiler* yang masih muda yaitu sekitar 7 tahun. Dilihat dari data pareto loss PLTU Pangkalan Susu, kejadian leakage pada *boiler* hampir terjadi dalam kurun waktu 6 - 12 bulan sekali. Dalam penelitian ini akan ditelusuri mekanisme kegagalan pada *water wall tube boiler* yang mengalami kondisi *fishmout* dengan pengamatan *visual*, *metallography*, *hardness testing*, SEM, EDS, dan uji *deposit* pada area yang mengalami kegagalan dan area yang jauh dari kegagalan.

1.2. Perumusan Masalah

Kegagalan *tube boiler* yang terjadi beberapa kali dalam kurun waktu 6 - 12 bulan di usia *boiler* yang masih tergolong muda sejak *Commercial Operation Date* pada 2015 telah berdampak pada penurunan performa *unit*. Oleh karena itu

dilakukan perumusan masalah agar dapat ditelusuri lebih lanjut penyebab dan mekanismenya. Adapun masalah yang diangkat menjadi penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi kegagalan *tube boiler rear water wall tube boiler* pada area *nose* elevasi 37 mdpl dan elevasi 29.8 mdpl tube no.132.
2. Apakah mekanisme kegagalan pada kasus *fish mout rear water wall tube boiler* tersebut.

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari thesis ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui penyebab utama kegagalan *fish mouth* pada *rear water wall tube boiler* PLTU Pangkalan Susu OMU.
2. Mengetahui mekanisme kegagalan *tube boiler* pada *rear water wall* dengan melakukan pengamatan *visual*, *metallography*, pengukuran ketebalan, pengujian kekerasan, *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS), dan pengujian *deposite*.
3. Memberikan rekomendasi untuk melakukan pencegahan agar tidak terjadi kegagalan yang serupa.

1.4. Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah dan asumsi yang digunakan agar penelitian ini dapat berjalan dengan baik adalah:

1. Penelitian ini fokus pada kegagalan *rear water wall tube* GB5310-20G *boiler subcritical* PLTU Pangkalan Susu OMU Unit 2.
2. *Type model boiler* adalah DG693/13.43-22.
3. Aliran kerja *fluida* dalam *boiler* adalah *water* pada *temperature* 350 °C.
4. Analisa kebocoran boiler ini dibatasi pada lokasi *rear water wall tube boiler* nomor 132 ada elevasi 37 mdpl dan elevasi 29.8 mdpl yang mengalami kebocoran.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh dari thesis analisa kegagalan *rear water wall tube boiler* adalah sebagai berikut:

A. Manfaat *Financial*

1. Dapat meningkatkan keandalan Unit PLTU Pangkalan Susu OMU.
2. Mengurangi nilai *pareto loss output* akibat kehilangan produksi listrik yang berpengaruh pada performa dan KPI Penilaian Unit.
3. Efisiensi biaya investasi *boiler* untuk mengatasi permasalahan kebocoran boiler.
4. *Saving* kerugian *financial* Rp. 44.132.240.000, - selama unit stop 7 hari dalam melakukan pemulihan (harga per kWh Rp. 1.445, - sumber ESDM).

B. Manfaat Teknis

1. Mendapatkan hasil analisa penyebab kegagalan material *wall tube* GB5310-20G agar kejadian *boiler leakage* dapat diminimalisir untuk waktu mendatang.
2. Mempertahankan dan meningkatkan keandalan sistem utama *boiler* PLTU Pangkalan Susu OMU.
3. Hasil analisa kegagalan *tube* dapat digunakan sebagai dasar untuk modul BoHM MAXIMO PLTU Pangkalan Susu OMU.
4. Meningkatkan kepercayaan *stakeholder* dalam hal ini PT. PLN P3BS dalam permintaan pemenuhan beban Jaringan 275 kV Sumatera.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

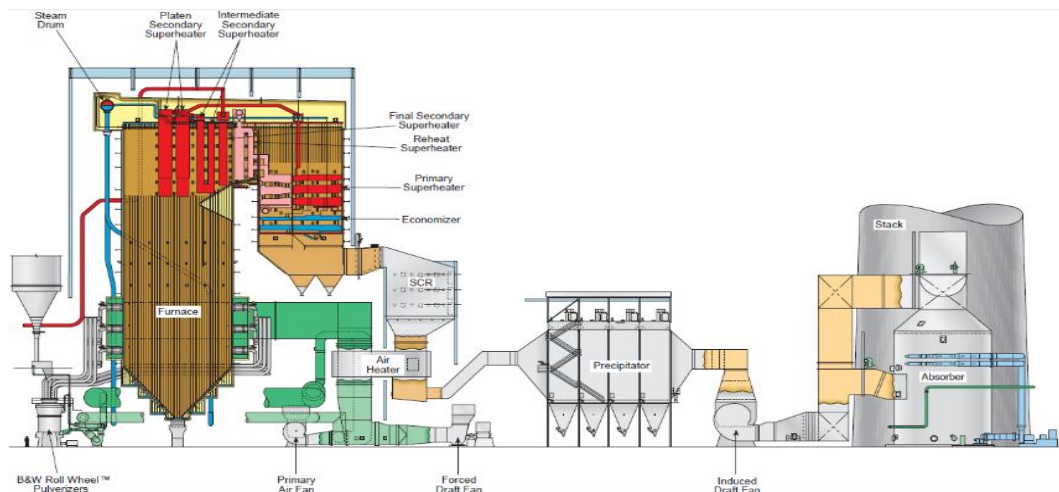
PLTU Pangkalan Susu OMU 2x200 MW merupakan pembangkit dengan daya terbesar di Pulau Sumatera dengan *performance* unit yang sangat berpengaruh dalam memasok energi listrik untuk menerangi Sumatera. PLTU Pangkalan Susu OMU memiliki tiga peralatan utama yang sangat berpengaruh terhadap keandalan pembangkit, apabila salah satu peralatan tersebut tidak beroperasi maka pasokan listrik akan terhenti. Peralatan utama tersebut adalah:

- a. *Boiler*
- b. *Turbin*, dan
- c. *Generator* beserta peralatan pendukungnya

Boiler merupakan salah satu peralatan utama PLTU maka keandalan, performa, dan *reliability* dari boiler harus dijaga. PLTU Pangkalan Susu OMU merupakan pembangkit uap yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar untuk pengoperasiannya. Proses yang terjadi pada tipe *boiler water tube* dimana air umpan dari HPH, *dearator* dipompakan oleh *boiler feed water pump* menuju *drum*. Air yang masuk ke *drum* sebelumnya mendapatkan pemanasan awal saat melalui *economizer*. Pemanasan lanjut terjadi pada uap dari *drum* menuju pipa *superheater*.

2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja Boiler

Boiler merupakan peralatan penukar panas yang memiliki fungsi utama mengubah air menjadi uap pada tekanan dan temperatur tertentu untuk memutar *turbin*. *Boiler* yang konstruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut dengan *water tube boiler*. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada didalam pipa-pipa dengan panas hasil pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar.



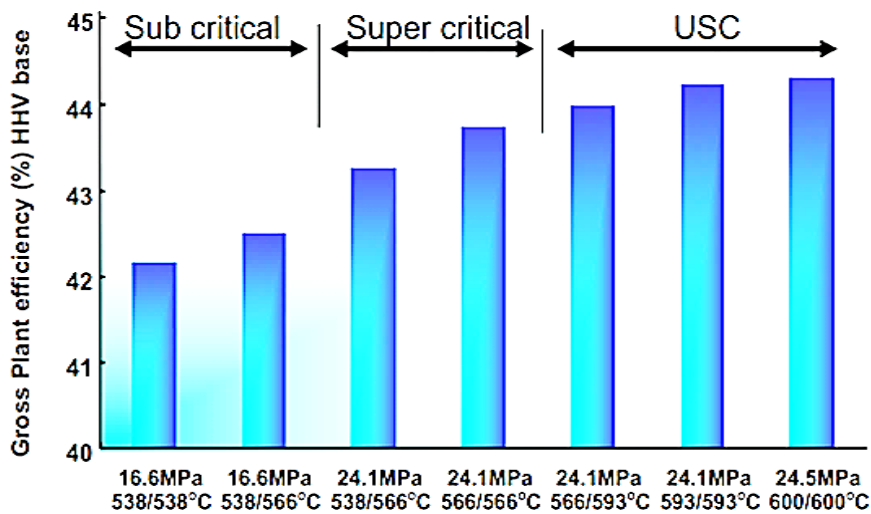
Gambar 2.1 Skematik sistem *boiler* PLTU (sumber: materi *training boiler*)

Fungsi utama *boiler* adalah (sumber: materi *training boiler*):

1. Untuk memproduksi uap sesuai yang dibutuhkan, baik kuantitas maupun kualitas.
2. Memanaskan uap lanjut (mengeringkan) yang dihasilkan sebelum digunakan untuk memutar *turbin*.
3. Memanaskan kembali uap yang telah digunakan untuk memutar *turbin* tekanan tinggi (HP *Turbin*) sebelum digunakan untuk memutar *turbin* tekanan menengah (LP *Turbin*) dan selanjutnya digunakan untuk memutar *turbin* tekanan rendah 1 dan 2 (LP *Turbin*).

Klasifikasi berdasarkan tekanan dan temperatur kerja *boiler*: (sumber: materi *training boiler*)

- a. *Sub Critical*
- b. *Super Critical*
- c. *Ultra-Super Critical (USC) / Advance Ultra Super Critical (AUSC)*



Gambar 2.2 Klasifikasi boiler (sumber: materi *training boiler*)

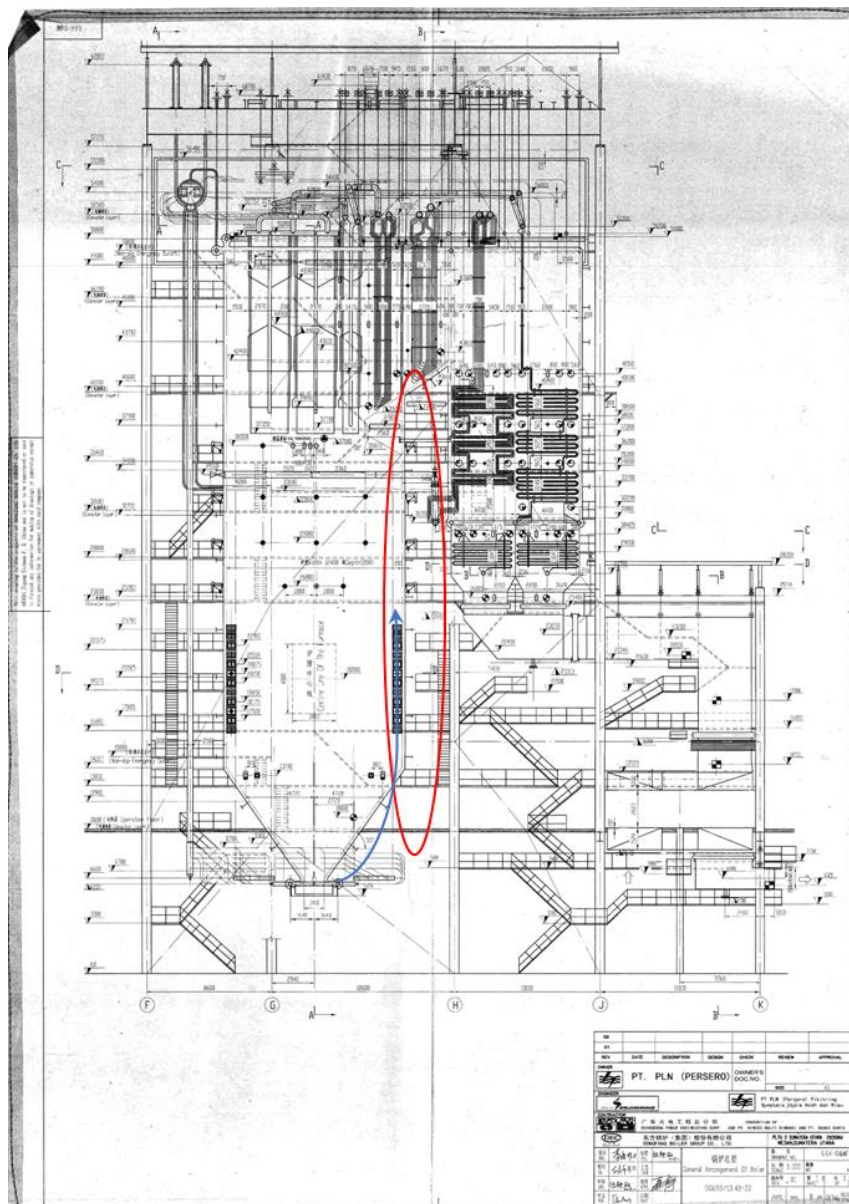
Pada Gambar 2.2 menjelaskan pengklasifikasian boiler berdasarkan *temperature* dan tekanan kerja. Boiler *sub critical* di desain dengan parameter operasi *steam pressure* kurang dari 16.6 Mpa dan *steam temperature* kurang dari 566 °C. Boiler tipe *super critical* di rancang untuk mampu menerima *steam pressure* 24.1 Mpa dan *steam temperature* 566 °C. Sedangkan *ultra super critical boiler* mampu menerima beban operasi dengan *pressure maximum steam* 24.5 Mpa dan *steam temperature* 600 °C.

Boiler PLTU Pangkalan Susu OMU Medan-Sumatera Utara menggunakan boiler *subcritical* dengan tipe *tangensial* berbahan bakar batu bara *low rank coal* yang di desain oleh Guangdong Power Engineering, Co Dongfang Electric Co. Ltd.

2.2 Rear Water Wall Tube

Komponen utama boiler adalah *steam drum*, *economizer*, daerah sirkulasi (*waterwall*, *downcomer*), *superheater*, dan *reheater*. Proses yang terjadi pada *rear water tube boiler* air umpan boiler mengalir melalui *tube* masuk ke dalam *drum*. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh bahan bakar membentuk *steam* pada daerah uap dalam *drum*. *Rear water wall tube boiler* pada PLTU Pangkalan Susu bekerja pada *temperature* 350°C dengan tekanan 14 MPa yang dirancang sangat *modern* dengan *flow* 600 ton/jam.

Prinsip kerja dari *rear water wall tube* adalah gas atau udara pembakaran yang berada di dalam *furnace* dilewatkan ke pipa-pipa yang berisi air yang diuapkan. Pipa *water wall* ini berfungsi untuk menyerap panas dari bahan bakar yang berada didalam *furnace* dan di *suplay* oleh batu bara sebagai bahan bakar, udara panas dari PA Fan dan udara luar atau oksigen FD Fan yang secara bersamaan. Berikut adalah lokasi *rear water wall tube* yang disajikan pada Gambar 2.3 *drawing boiler* PLTU Pangkalan Susu OMU:



Gambar 2.3 Area *rear water wall tube* dan arah aliran air pada *boiler* PLTU Pangkalan Susu OMU

Boiler disini terdiri dari 8 *division panel* dengan jumlah masing-masing *panel 29 tube*, 16 *panel platen superheater* dengan jumlah masing-masing *panel 14 tube*, 5 *panel finish superheater* dengan jumlah masing-masing *panel 6 tube*, 60 *panel finish reheater* dengan jumlah masing-masing *panel 8 tube*, *platen reheater*, *low temperature superheater*, *economizer*, dan *wall tube*.

Aliran air yang masuk kedalam *rear water wall tube* adalah keluaran dari *lower header*, arah aliran dari bawah ke atas menuju *steam drum*. Laju aliran berlangsung secara kontinu seiring dengan perubahan fasa air ke fasa uap yang berlangsung pada *rear water wall tube* atau *raiser*. Namun uap disini masih dalam uap basah yang selanjutnya dipisahkan oleh *steam drum*. Uap basah akan berlanjut ke tahap berikutnya untuk menaikkan temperatur dan merubah menjadi uap kering, dan fasa air akan di *return* kembali kedalam *rear water wall tube*.

Spesifikasi *boiler* yang terpasang di PLTU Pangkalan Susu OMU kapasitas 200 MW dapat dilihat pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2.1 Parameter Operasi *Boiler* (Sumber: *Boiler Operation Manual* PLTU Pangkalan Susu OMU)

Parameter Operasi	<i>Boiler System</i>
<i>Gross Load</i>	220 MW
<i>Main steam flow</i>	693 t/h
<i>Steam drum pressure</i>	14.43 Mpa
<i>Main steam pressure (SH Outlet)</i>	13.43 MPa
<i>RH inlet/outlet temperature</i>	324 / 540°C
<i>RH inlet/outlet pressure</i>	2.7 / 2.5 Mpa
<i>Flue Gas outlet temperature</i>	140 °C

2.3 Material Rear Water Wall Tube

Material yang digunakan sebagai *rear water wall tube* PLTU Pangkalan Susu OMU adalah jenis baja karbon pada umumnya dengan sedikit unsur paduan Mn, Cr, Cu, dan Mo. Spesifikasi material yang digunakan yaitu GB5310-20G.

Keberadaan kandungan Mn dan Mo pada *tube water wall* akan meningkatkan sifat kekuatan *tube* yang diaplikasikan pada tekanan tinggi. Kehadiran Cr mampu memperbaiki resistansi *creep* terhadap *temperature* kerja.

Dan unsur Cu yang memiliki sifat ketahanan korosi yang baik. Komposisi kimia material GB5310 20G disajikan pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5 dibawah ini:

Gambar 2.4 Komposisi kimia material GB5310-20G pada mill certificate

GB 5310—XXXX

表 3 钢的牌号和化学成分

钢类	序号	牌 号	化学成分 (质量分数) ¹ , %														P		S		
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti	B	Ni	Al _{tot}	Cu	Nb	N	W	不大于	不大于			
优质碳素结构钢	1	20G	0.17~0.23	0.17~0.37	0.35~0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.015	
	2	20MnG	0.17~0.23	0.17~0.37	0.70~1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.015	
	3	25MnG	0.22~0.27	0.17~0.37	0.70~1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.015	
合金结构钢	4	15MoG	0.12~0.20	0.17~0.37	0.40~0.80	—	0.44~0.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.015	
	5	20MoG	0.15~0.25	0.17~0.37	0.40~0.80	—	0.44~0.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.015	
	6	12CrMoG	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.40~0.70	0.40~0.55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.015	
	7	15CrMoG	0.12~0.18	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.40~0.55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.015	
	8	12Cr2MoG	0.08~0.15	≤0.50	0.40~0.60	2.00~2.50	0.90~1.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.015	
	9	12Cr1MoVG	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	1.20~1.35	0.25~0.30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.010	
	10	12Cr2MoWVTiB	0.08~0.15	0.45~0.75	0.45~0.65	1.60~2.10	0.50~0.65	0.28~0.42	0.08~0.18	0.0020~0.0050	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30~0.55	0.025	0.015
	11	07Cr2MoW2VnNb	0.04~0.10	≤0.50	0.10~0.60	1.90~2.60	0.05~0.30	0.20~0.30	—	0.0005~0.0060	—	≤0.030	—	—	0.02~0.08	0.030	≤1.45	1.75	0.025	0.010	
	12	12Cr3MoVSiTiB	0.09~0.15	0.60~0.90	0.50~0.80	3.00~3.00	1.00~1.20	0.25~0.35	0.22~0.38	0.0050~0.0110	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.015	
	13	15Ni1MnMoNbCu	0.10~0.17	0.25~0.50	0.80~1.20	—	0.25~0.50	—	—	—	1.00~1.30	≤0.050	0.50~0.80	0.015~0.045	—	≤0.020	—	—	0.025	0.015	

Gambar 2.5 Komposisi kimia GB5310-20G berdasarkan standard GB5310 China

2.4 Analisa Kegagalan

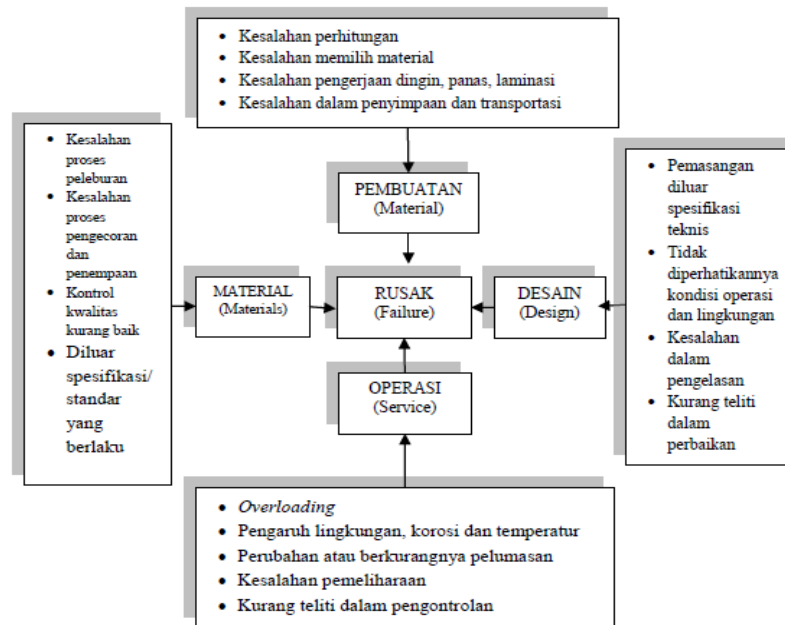
Definisi dari analisa kegagalan secara lengkap adalah suatu langkah atau prosedur yang dilakukan untuk mencari dan mengungkapkan mengapa dan bagaimana suatu alat atau komponen mengalami kegagalan, dengan mengacu kepada bagian atau komponen yang mengalami kegagalan tersebut, khususnya pada bagian permukaan pecah atau patah [10].

Faktor-faktor penyebab suatu kegagalan tidak distandarisasikan, namun pada umumnya faktor-faktor penyebab kegagalan suatu komponen dikategorikan kedalam 4 kelompok, yaitu [12]:

1. Pembuatan (*manufacturing*), diantaranya adalah:
 - a. Kesalahan perhitungan.
 - b. Kesalahan memilih material.
 - c. Kesalahan pengerjaan lanjutan (pengerjaan dingin, panas, laminasi).
 - d. Kesalahan dalam penyimpanan dan transportasi.
2. Design, diantaranya adalah:
 - a. Pemasangan diluar spesifikasi teknis.
 - b. Tidak diperhatikannya kondisi operasi dan lingkungan.
 - c. Kesalahan dalam pengelasan.
 - d. Kurang ketelitian dalam perbaikan.
3. Material, diantaranya adalah:
 - a. Kesalahan dalam proses peleburan.
 - b. Kesalahan dalam proses pengecoran dan penempaan.
 - c. Kontrol kualitas kurang baik.
 - d. Diluar spesifikasi/standar yang berlaku.
4. Operasi (servis), diantaranya adalah:
 - a. Overloading.
 - b. Pengaruh lingkungan (korosi, temperatur).
 - c. Perubahan atau berkurangnya pelumasan.
 - d. Kesalahan dalam perawatan (*maintenance*).
 - e. Kurang teliti dalam pengontrolan.

Bila dikemaskan faktor-faktor penyebab kegagalan pada suatu komponen dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Kegagalan suatu sistem didefinisikan sebagai hilangnya kemampuan atau ketidakmampuan sistem bekerja akibat adanya kerusakan. Kerusakan adalah sebagai ketidakmampuan suatu sistem untuk beroperasi, atau mampu beroperasi tetapi tidak berfungsi maksimal, atau komponen didalam sistem sudah tidak aman untuk dioperasikan. Banyak kerusakan terlihat secara *visual* tetapi tidak mengurangi kemampuan kerja sistem dan sebaliknya, banyak kerusakan permukaan tidak terlihat tetapi menjadi penyebab kegagalan [12].



Gambar 2.6 Diagram faktor-faktor penyebab kerusakan suatu komponen

Kegagalan terjadinya akibat keretakan atau kadang-kadang gabungan dari bermacam-macam gejala di atas. Kebanyakan kegagalan terjadi secara berangsur-angsur, dimana *fluida* alir menembus ketebalan dinding *tube* atau pipa yang retak dan akhirnya pipa mengalami kebocoran, yang potensial menimbulkan kondisi yang membahayakan [13].

Sangat jarang terjadi kegagalan bermula dari rambatan retak yang langsung memecahkan *tube* atau pipa, atau pecahnya *tube* terjadi secara mendadak tanpa didahului oleh adanya keretakan. Dengan demikian kegagalan yang terjadi adalah

akibat keretakan tahap awal yang tumbuh dan merambat. Menurut David N. French [14] mentabulasi 10 sebab kegagalan pada industri yang menggunakan ketel yang dapat dilihat pada Tabel 2.2 dibawah ini:

Tabel 2.2 Sebab-sebab kegagalan *tube boiler*

No.	Sebab-sebab kegagalan	Prosentasi (%)
1.	<i>Long term overheating</i>	23,4
2.	Lelah (thermal 8,6 %, korosi 5,3%)	13,9
3.	Korosi debu (batubara 8,1%, sampah 2,5%, oli 1,4%)	12,0
4.	Kerusakan <i>hydrogen</i>	10,0
5.	Kegagalan pengelasan (logam yang berbeda 3,4%)	9,0
6.	Temperatur tinggi (<i>short term overheating</i>)	8,8
7.	Erosi	6,5
8.	Lubang oksigen	5,6
9.	Serangan benda tajam	2,6
10.	<i>Stress corrosion cracking</i>	2,6
TOTAL		95,9

2.5 Kegagalan *Tube* karena *Overheating*

Apabila air dipanaskan di dalam *tube* dengan *flux* panas yang aliran panasnya merata (*uniform*) disepanjang *tube* di bawah kondisi yang menghasilkan keseimbangan dinamis. Maka semua titik disepanjang tube akan berhubungan langsung dengan fluida air dingin, fluida air mendidih, fluida uap kualitas rendah dan uap yang *superheater*. Gradien temperatur antara dinding *tube* dan fluida di dalam *tube* memberikan gaya untuk menghasilkan perpindahan panas pada setiap titik [16].

Pada unit pembangkit uap telah direncanakan agar keseimbangan (*balance*) panas yang masuk dari hasil pembakaran dengan uap *superheater*. Di dalam dapur temperatur gas panas cukup tinggi, panas tersebut diserap oleh dinding dapur dan uap di dalam *tube* (pada daerah laluan konveksi) sehingga temperatur turun.

Untuk menjaga panas dan meningkatkan *overall thermal efficiency* air dari *feed water* dipanaskan dulu di *ecomonizer*. Pada kondisi terjadinya perbedaan temperatur yang besar antara dinding *tube* dan fluida, secara teoritis *tube* akan pecah karena terjadi melting pada material *tube*, walaupun kenyataannya *tube* akan

pecah apabila material *tube* kehilangan kekuatannya, karena itu perlu diperhitungkan kemampuan material *tube* menerima panas yang tinggi.

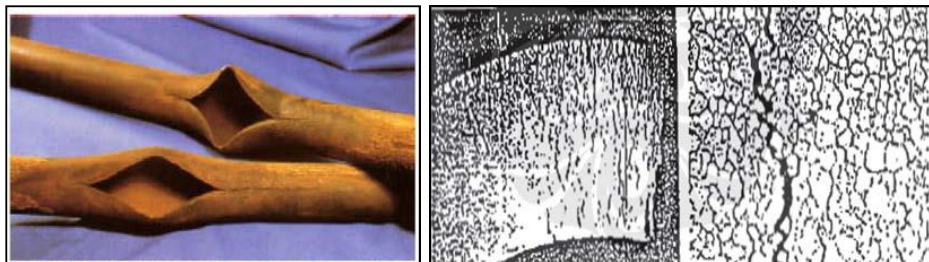
Pada *wall tube* temperatur operasinya pada temperatur, perpindahan panasnya diatur dengan aliran fluida dibagian *inlet* dan *outlet*. Walaupun demikian *flux* panas yang tinggi dapat menyebabkan temperatur dinding *tube* yang tinggi pula, misalnya dengan adanya *deposit* pada dinding *tube* dapat mengakibatkan *overheating*.

Tube pecah karena *overheating* dapat terjadi dalam waktu beberapa menit (*short term overheating*) atau dapat juga terjadi dengan waktu yang lama (*long term overheating*). Ditinjau dari permukaan pecahnya, pecah karena *overheating* dapat dibagi dua yaitu *thick lip rupture* dan *thin lip rupture* [18].

2.5.1. *Thick lip rupture*

Pecah *thick lip rupture* ditandai dengan permukaan pecahnya yang tebal, sedikit liat dan terjadi *swelling* atau mengembang. Pecahnya yang normal terjadi dibagian yang sejajar dengan sumbu *axis* atau pada sisi longitudinal, dikenal dengan pecah *fishmouth* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Struktur mikro permukaan pecah menunjukkan terjadi creep, kavitasasi, pemisahan batas butir dan terjadinya retak *intergranular* pada bagian *inside* dan *outside* diameter atau *oxide* penetrasi pada batas butir.

Pecah *thick lip* disebabkan oleh *overheating* dalam waktu lama (*long term overheating*) pada temperatur di atas temperatur aman dari material *tube*.



Gambar 2.7 Pecah *thick lip* dan struktur mikro permukaan akibat *overheating* [18]

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

1. Terjadinya *blocking* pada aliran gas panas

Terjadinya *flux* panas di *superheater* dan *reheater*, hal ini karena terjadinya bagian tertentu yang terbloking pada laluan konveksi sehingga akan meningkatkan aliran gas panas pada daerah tertentu saja. Kecepatan gas panas yang tinggi akan memperbesar koefisien *heat transfer* di bagian sisi uap dan akan meningkatkan temperatur material.

2. Faktor dalam kerak (*factor internal scale*)

Kerak atau *scale* deposit dari bagian air (*water side*) dapat meningkatkan konduktivitas *thermal* baja sampai 5%. Hal ini akan mengurangi perpindahan panas dari gas panas ke fluida.

3. Terjadinya pengurangan *supply* uap

Kondisi ini apabila terjadi penyumbatan aliran uap karena adanya internal kerak pada *tube*, hal ini disertai terbentuknya lapisan uap yang tipis (*vapor film*) yang konduktivitas panasnya rendah. Sewaktu aliran *flux* panas yang besar melalui daerah yang lapisan uapnya tipis akan mengakibatkan temperatur dinding *tube* tinggi sekali (terjadi *overheating*).

4. Faktor *burner adjustment*

Ketidaktepatan bahan bakar gas atau *oxygen* yang didistribusikan tidak sesuai dengan *burner*, pengaruhnya akan meningkatkan *flux* panas.

5. Faktor aliran uap yang tidak sempurna

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

2.5.2. *Thin lip rupture*

Kegagalan yang disebabkan oleh *short term overheating* terjadi diatas temperatur aman *material tube* dan disertai *swelling* di dekat daerah pecah [18].



Gambar 2.8 Kegagalan *short term overheating* [18]

Pada Gambar 2.8 menunjukkan uap keluar dengan kecepatan tinggi melalui permukaan pecah akan menimbulkan gaya reaksi pada tube berupa pembengkokan secara lateral, semakin tinggi temperatur dan tidak *uniform overheating* maka pembengkokan lateral semakin besar [19].

Pecah *thin lip* dapat ditunjukkan dengan penipisan dinding *tube* yang disebabkan oleh tegangan luluh (*yielding*) di daerah pecah, kadang-kadang permukaan pecahnya menjadi tajam seperti pada gambar 2.8, penipisan juga terjadi di daerah *swelling* dekat daerah pecah.

Faktor penyebab *short term overheating* dapat diuraikan sebagai berikut:

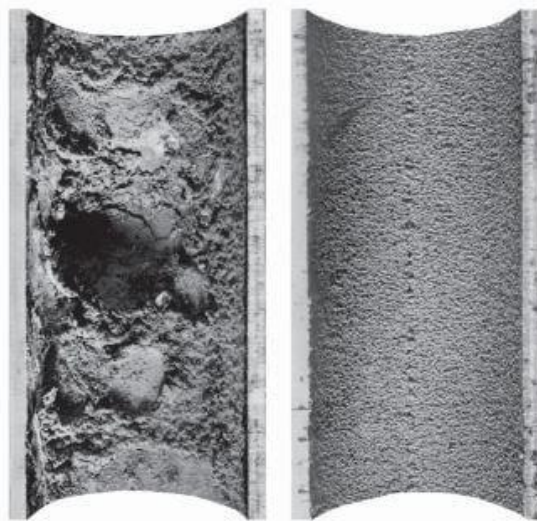
1. Terjadinya bloking di dalam tube superheater karena terkumpulnya kondensat pada laluan uap.
2. Terjadinya bocor halus pada *tube*.

Pada pipa air kebocoran halus tidak dapat dideteksi di dalam dapur. Kebocoran yang besar diketahui dengan berkurangnya aliran fluida yang terjadi dibawah kondisi normal, disertai *flux* panas yang tinggi menyebabkan temperatur *material* naik dengan cepat.

Penipisan dinding *tube* adalah salah satu karakteristik dari *kagagalan short term overheating*, namun tidak selalu kegagalan tersebut mengakibatkan penipisan dinding.

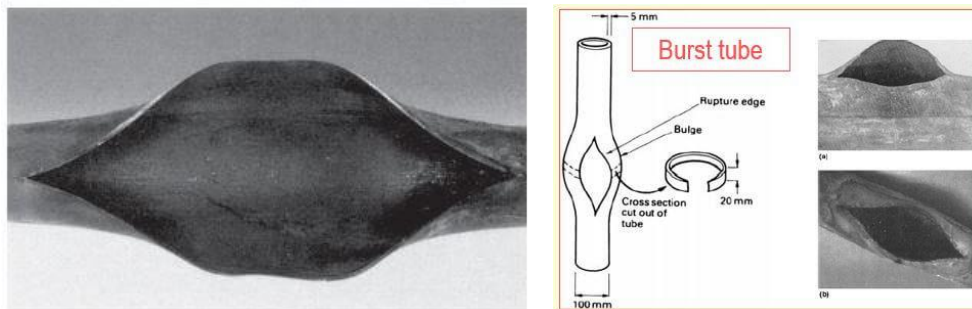
2.6. Fish Mouth Failure

Failure ini disebabkan oleh pemanasan yang tidak merata dan hanya ada dibagian tertentu saja. Lebih dikenal dengan *fish mouth failure* atau *crack* mulut ikan. Salah satu contoh kegagalan *fish mouth* disajikan pada data-data sebagai berikut:



Gambar 2.9 Internal deposit pada *tube boiler* (Sumber: The Babcock & Wilcox Company) [21]

Ketika laju aliran tersumbat *scale* maka aliran air menjadi tidak lancar dan panas dari *furnace* tidak mengalami penukaran panas oleh air sehingga material *tube boiler* terus-menerus terbakar (sampai suhu antara 850-950°C) dan karena *tube boiler* yang tersumbat memiliki tekanan yang tinggi maka *mechanical properties* akan turun dan menyebabkan *leakage* atau pecah. Berikut profil kerusakan *tube boiler* akibat *caustic gouging*.



Gambar 2.10 Kegagalan *fish mouth* pada *short term overheat* [21]

Dikutip dari handbook Port and Herro (1991) *short term overheat* terjadi dalam waktu yang cepat antara 454-730 °C bahkan bisa lebih. Kebocoran *tube* seperti ini sangat dirasakan ketika konsumsi air *boiler* meningkat sangat pesat dan harus diputuskan unit untuk segera dilakukan *shutdown* untuk perbaikan. Berdasarkan EPRI (2006) Tabel 2.3 sebagai berikut:

Tabel 2.3 *Short term overheating* pada *tube* (Sumber: EPRI Boiler Condition Assessment Guideline, 2006)

<p><i>Pressure drop across circulation pump (orifices are plugging)</i></p>	<p><i>Short-term overheating in waterwall tubing</i></p>	<p><i>Non-optimum cycle chemistry and/or metallurgy allowing corrosion in condenser and/or feedwater system, with redeposition downstream</i></p> <p><i>Inadequate condensate polishing</i></p> <p><i>Inadequate chemical cleaning</i></p> <p><i>Not flushing after chemical cleaning</i></p> <p><i>Cavitation/deposition at orifice due to pump NPSHR versus flow temperature and pressure and/or orifice size versus flow rate</i></p>
---	--	--

Kegagalan pada *tube boiler* dipengaruhi terjadinya *short-term overheating* di daerah pipa (Robert. & Harvey 1991). Suhu dan tegangan operasi menunjukkan indikasi bahwa pipa tersebut mengalami suhu operasi yang tinggi (Rahman & Kadir 2011). Mekanisme kegagalan *tube* adalah kombinasi dari *pressure* operasi yang

tinggi dan *overheating* lokal sebagai akibat terkonsentrasinya kelebihan *panas hot spot* pada temperatur tinggi.

2.7. Penelitian Terdahulu

Pada penelitian J. Ahmad, J. Purbolaksono b, L.C. Beng, A.Z. Rashid, A. Khinani, A.A. Ali [25] melakukan penelitian yang mengangkat investigasi kegagalan pada *rear water wall* SA210-A1, dilakukan pengukuran ketebalan *wall tube* dan pemeriksaan mikroskopis. Kegagalan *rear water wall tube* dengan pecahan terbuka lebar dan terletak pada *nose lower boiler*. Pengukuran ketebalan *tube* dilakukan pada semua area kegagalan *rear water wall tube* dengan level yang sama. Berdasarkan pengamatan, *tube* mengalami penipisan ketebalan yang signifikan. Pemeriksaan mikroskopis pada titik kegagalan dan daerah yang agak jauh dari kegagalan dilakukan untuk mendukung data dalam menentukan mekanisme kegagalan dan akar penyebab kegagalan. Temuan yang diperoleh dari inspeksi, pengukuran ketebalan *tube*, pemeriksaan mikroskopis dan analisa *creep* akhirnya dapat mengungkapkan mekanisme kegagalan dan akar penyebab utama kegagalan. Mekanisme kegagalan diidentifikasi sebagai hasil dari kombinasi penipisan dinding lokal yang signifikan dari *rear water wall tube* karena erosi *fly ash* dan proses permasalahan *creep* yang berlangsung secara *thermal* karena peningkatan suhu.

Selain itu ada juga penelitian yang dilakukan oleh A. K. Pramanick, G. Das, S. K. Das and M. Ghosh (2016) dinyatakan bahwa penyebab utama kegagalan *superheater tube* Cr-Mo SA213 T22 pada *coal fired power plant* kapasitas 60MW adalah deposit oksida yang ditemukan pada permukaan *internal tube*. Deposit mengakibatkan resistensi yang signifikan terhadap perpindahan panas dan berdampak pada kenaikan suhu komponen yang tidak diinginkan. Situasi ini dapat memperburuk kondisi sisi gas yang terkena suhu tinggi. Pemanasan lokal karbida kasar serta pengendapan yang didorong dari fase getas baru di sepanjang batas butir yang mengakibatkan penggetasan *material tube*. Paparan terus menerus terhadap suhu tinggi melunakkan *material tube* dan dinding *tube* menipis dengan menonjol ke arah luar. Pembentukan celah-celah di sepanjang batas butir mengarahkan retak *intergranular*. Semua efek ini berkontribusi secara sinergis dan pada akhirnya *tube*

gagal karena kelebihan panas pada tekanan yang tinggi. Kegagalan disajikan pada Gambar 2.11 dibawah ini.

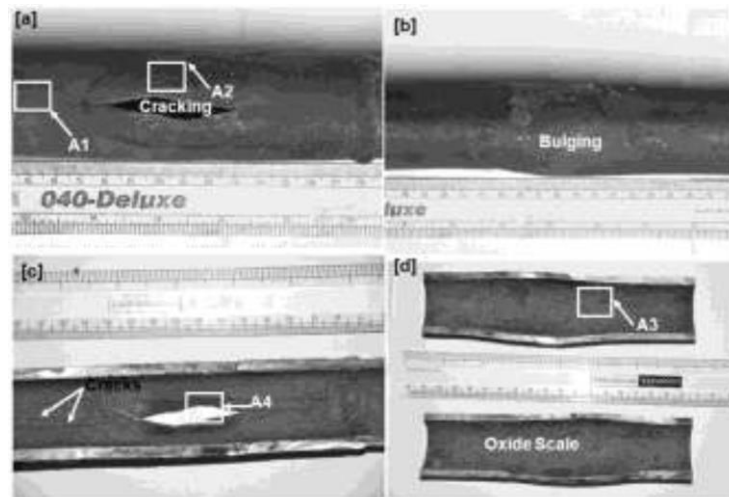


Fig. 1: Macro image and sampling location from damaged tube A (a) cracking over surface (b) bulged region, (c) inner surface of tube and (d) inner surface of bulged region

Gambar 2.11 Foto makro dan lokasi sampel pada kegagalan *tube* A, (a) retak sampai permukaan, (b) daerah tonjolan, (c) permukaan bagian dalam *tube*, (d) permukaan bagian dalam daerah tonjolan [31]

Penelitian yang dilakukan oleh *F. Dehnavi, A. Eslami, F. Ashrafizadeh (2016)* sebuah studi kasus tentang kegagalan tabung *superheater* dari *boiler unit* di pembangkit listrik tenaga uap. *Tube* terbuat dari baja *DIN-16CrMo4*, bentuk kegagalan menggembung dan pecah hanya setelah sekitar tiga tahun beroperasi. Penyelidikan metalurgi mengungkapkan bahwa degradasi mikrostruktur terutama terjadi pada permukaan tabung eksternal (perapian). Jangka panjang *overheating* diidentifikasi sebagai akar penyebab kegagalan prematur. Bentuk kegagalan disajikan pada Gambar 2.12 dibawah ini.

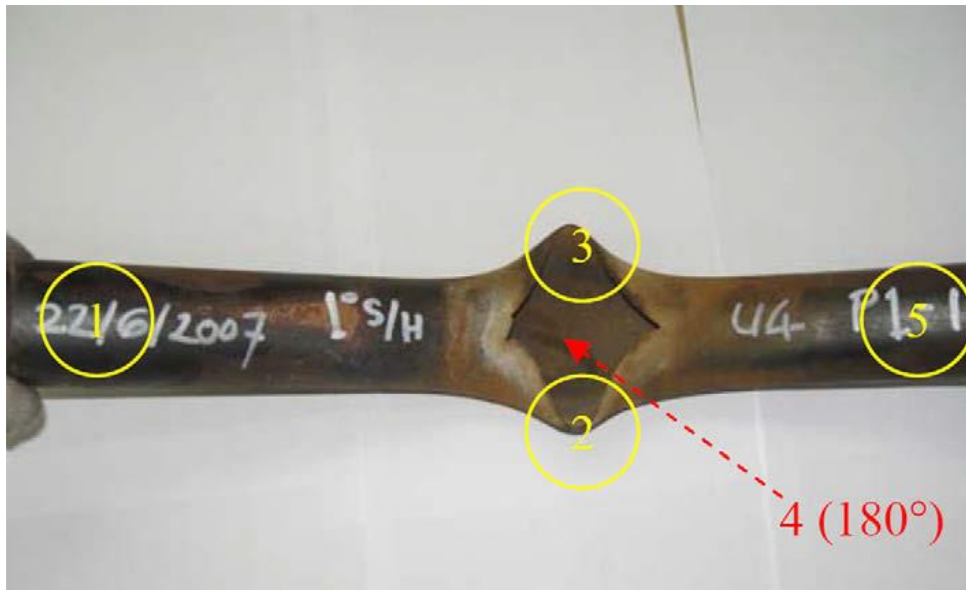


Gambar 2.12 Gambar kamera dari kondisi *tube* yang gagal [24]

Penelitian yang dilakukan *J. Purbolaksono, J. Ahmad, L.C. Beng, A.Z. Rashid, A. Khinani, A.A. Ali (2010)*. Dalam paper ini analisis kegagalan pada tabung *superheater SA213-T12* dengan inspeksi *visual*, pengukuran *in-situ* kekerasan dan analisis elemen. *Tube primary superheater* gagal dengan pecah terbuka lebar setelah berjalan sekitar 28.194 jam. Berat *clinkers* ditemukan hampir seluruhnya menutupi wilayah *tube primary superheater*. *In-situ hardness measurement* dilakukan pada tube baris pertama *primary superheater* yang dipilih di daerah tengah antara *tube* layar belakang tungku dan jalur aliran *blower superheater primer*. Pengukuran kekerasan juga dilakukan pada tabung yang gagal. *Finite element analysis* pada fitur yang mungkin sebelum kegagalan juga dilakukan untuk menggambarkan dan menyimpulkan mekanisme kegagalan dan akar penyebab kegagalan. *Overheating* jangka pendek yang terlokalisasi tabung karena aliran gas buang lokal dan terkonsentrasi mengakibatkan kegagalan pada *tube primary superheater*. Efek kegagalan yang disajikan pada Gambar 2.13 dibawah ini.



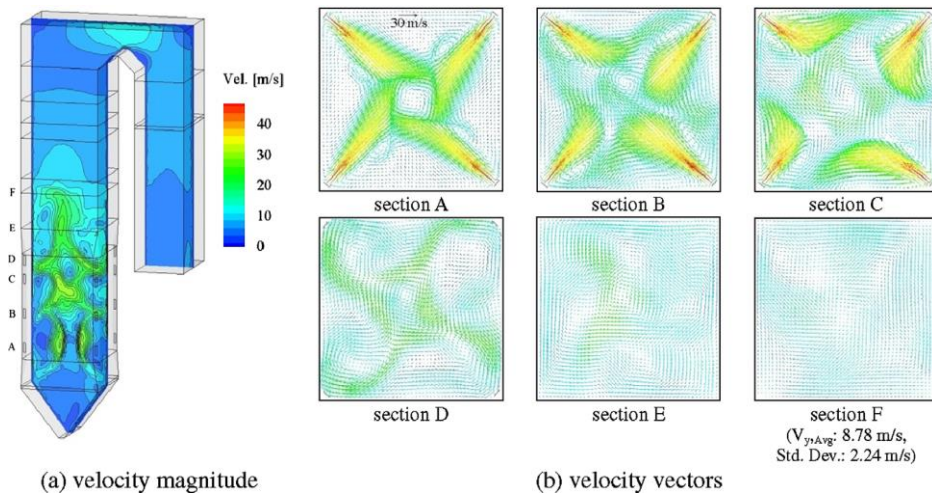
Gambar 2.13 *Heavy clinkers* menutupi wilayah *primary superheater* dan mengisi ruang kosong antara panel, dan berpotensi *localized overheating* di beberapa *spot* yang tidak tertutup [25]



Gambar 2.14 *Tube primary superheater* yang gagal dengan retakan terbuka lebar [25]

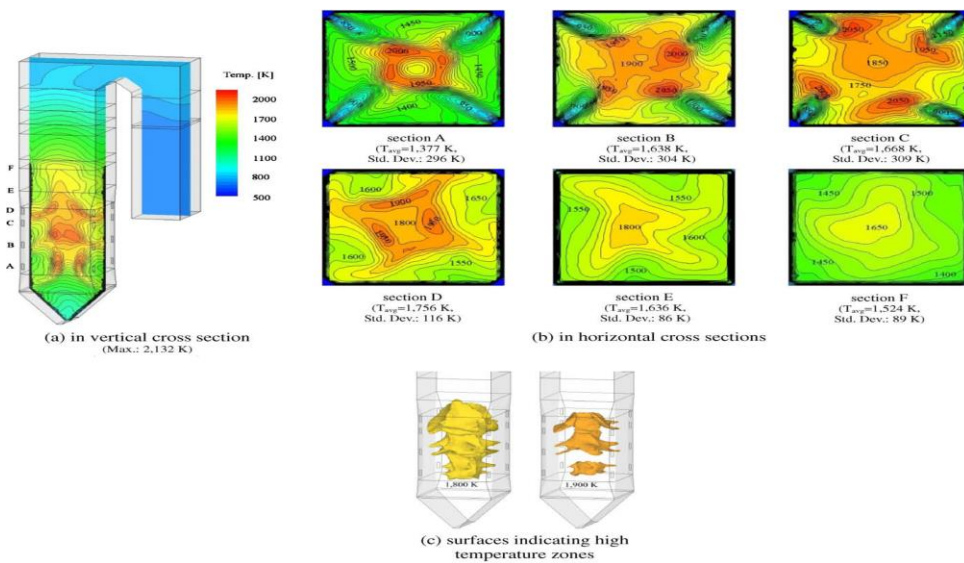
Pada Gambar 2.14 menjelaskan kasus penelitian terdahulu mengenai *short-term overheating* yang diakibatkan oleh cerobong lokal aliran gas yang mengikuti formasi *clinkers* masif di daerah *primary superheater* dianggap sebagai mekanisme kegagalan. Operasi batubara jenis baru yang memiliki temperatur fusi abu yang rendah merupakan akar penyebab utama kegagalan tersebut.

Penelitian-penelitian mengenai perilaku aliran di dalam *boiler* dan juga faktor-faktor yang mempengaruhi *localized rapid overheating*, *surface tube erosion*, *fly ash of coal corrosion*, dan *creep deformation* pada *tube boiler* menjadi referensi utama pada thesis ini. Choi dan Kim di tahun 2009 [5] memodelkan aliran, pembakaran, dan emisi NOx pada boiler 500 MWe dengan tipe *pulverized coal* dan konfigurasi *burner* tangensial. Penelitian ini dapat dijadikan acuan pola aliran *flue gas* dan juga temperaturnya pada bagian tertentu dari *boiler*. Hasil simulasi untuk vektor dan besar kecepatan pada area *furnace* dan *backpass* dapat dilihat pada Gambar 2.15 di bawah ini:



Gambar 2.15 Distribusi dan Vektor Kecepatan pada Penampang Lintang yang Berbeda (Sumber: Choi & Kim, 2009)[5]

Distribusi temperatur juga dimodelkan dan ditunjukkan pada gambar 2.16 berikut:



Gambar 2.16 Distribusi Temperatur (Sumber: Choi & Kim, 2009)[5]

2.8. Minimum Wall Thickness

Erosi dan korosi adalah penyebab paling umum untuk penipisan dinding OD (*Outer Diameter*) *tube boiler*. Erosi terjadi pada *tube* OD dalam bentuk kehilangan ketebalan dinding. *Wall thickness* untuk sebuah *tube* didesain berdasarkan *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* untuk dapat menahan tekanan, temperatur, dan beban mekanis tertentu. Persamaan MWT dari ASME BPVC adalah:

$$t = \frac{PD}{2S+P} + 0,005D \quad (1)$$

di mana:

t = *minimum wall thickness*

P = tekanan desain

D = diameter luar (OD)

S = tegangan yang diijinkan (*allowable stress*)

Produsen *boiler* Babcock & Wilcock dalam *Steam: Its Generation and Use* [11], menggunakan pendekatan praktis untuk boiler pembangkit listrik yaitu:

- a. *Water-cooled tubes* (pipa air) sebaiknya diperbaiki atau diganti dengan pipa ukuran tebal dinding semula jika terjadi penipisan hingga di bawah 70% dari ukuran semula.
- b. *Steam-cooled tubes* (pipa uap) sebaiknya diperbaiki atau diganti dengan pipa ukuran tebal dinding semula jika terjadi penipisan hingga di bawah 85% dari ukuran semula.

Penelitian mengenai deviasi pengukuran *thickness* dilaksanakan di Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Korea Selatan (Yun, Moon, & Oh, 2016) [12]. Penelitian tersebut menghasilkan formulasi standard deviasi pengukuran untuk pipa, yaitu:

$$Std_{Pipe,total} = 0,024808D_o^{-0,6671} \times t_n \quad (2)$$

di mana D_o adalah diameter luar pipa dan t_n adalah nominal *thickness*.

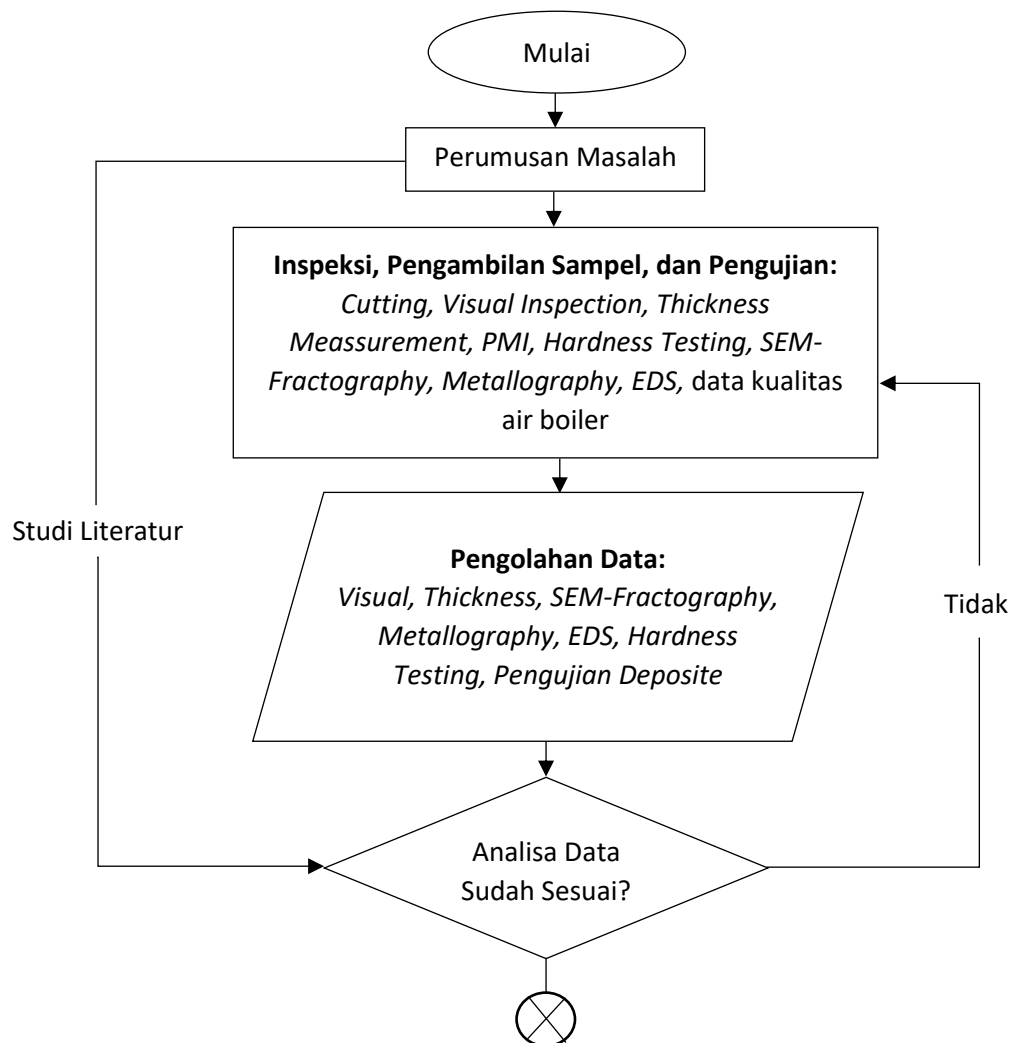
Halaman ini sengaja dikosongkan

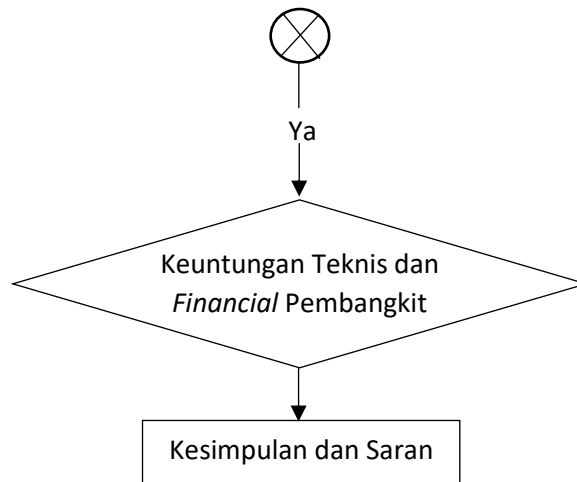
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahap diantaranya inspeksi pada titik kegagalan dan identifikasi masalah, pengambilan data *sample* uji, studi literatur dari jurnal penelitian terdahulu, analisa serta pengambilan kesimpulan dan saran.

3.1 Flowchart Penelitian

Diagram alir atau flowchart merupakan suatu metode yang digunakan untuk mempermudah untuk melihat proses yang harus dilakukan dalam suatu penelitian. Adapun langkah-langkah dalam penelitian ini sebagai berikut:





Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan penelitian yang digunakan untuk melakukan *failure analysis* ini adalah sebagai berikut:

1. *Camera digital*
2. Penggaris, jangka sorong, dan meteran

Alat yang diukur untuk mengukur dimensi benda kerja, dimensi yang diukur adalah panjang dan lebar kegagalan *fishmout*, diameter dari sampel tersebut serta mengukur dimensi lain jika diperlukan. Penggaris yang digunakan memiliki ketelitian 0.1 mm dan jangka sorong memiliki ketelitian 0.01 mm.

3. Alat pemotongan sampel

Gerinda dan *cutting disc* digunakan untuk pemotongan sampel pada dinding *tube boiler*.

4. Alat preparasi *specimen*

Dalam melakukan pengamatan *metallography*, sampel harus dilakukan pemotongan terlebih dahulu dan preparasi. Setelah itu dilakukan grinding dengan *rubber stone grade* 100, 400, 800, dan 1500 serta *cotton* dan *alcohol* untuk membersihkan permukaan. Selanjutnya dilakukan *polishing* menggunakan *diamond paste* dan *etching* menggunakan cairan etsa nitrid *acid* dan *alcohol* 96% dengan

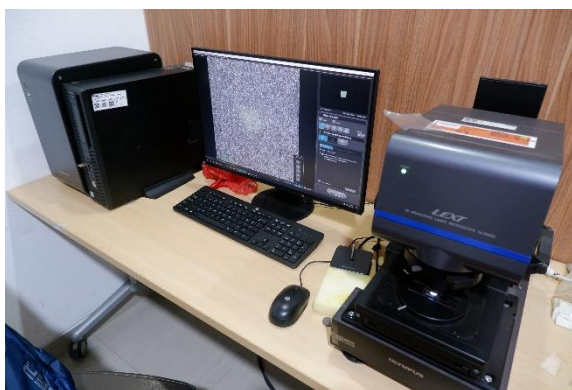
perbandingan 3:1. Untuk melakukan proses *etching* dibutuhkan gelas ukur, wadah kaca, pipet, dan pengering sehingga *specimen* menjadi kilat seperti cermin dan dapat struktur mikro dapat diamati menggunakan *microscope optic*.



Gambar 3.2 *Tools grinding, polishing, dan etching*

5. *Microscope optic*

Alat yang digunakan untuk mengamati struktur mikro dari spesimen uji serta bentuk struktur mikro kecacatan yang terjadi pada spesimen uji dengan memanfaatkan pembesaran lensa.



Gambar 3.3 *Microscope optic*

6. *Positive Material Identification (PMI)*

Alat yang digunakan adalah *type* Bruker S1 Titan untuk mengetahui komposisi kimia yang ada dalam suatu material. PMI adalah analisis paduan logam untuk membentuk komposisi dengan membaca kuantitas berdasarkan persentase elemen penyusunnya. Metode PMI termasuk fluoresensi sinar X atau X-ray fluorescence (XRF).



Gambar 3.4 Alat *Positive Material Identification*

7. Mesin *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Alat yang digunakan untuk melihat lapisan-lapisan yang dapat menyebabkan kecacatan yang berukuran nanometer. Salah satu jenis alat SEM yaitu merk HITACHI FLEXSEM 1000.

8. Alat *Ultrasonic Thickness Gauge*

UTG adalah alat untuk melakukan pengukuran *non-destructive* ketebalan lokal elemen padat dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik yang dipancarkan oleh *probe* yang kemudian dipantulkan kembali dan dibaca oleh monitor. Alat yang digunakan adalah Olympus 38DL PLUS dengan probe tunggal.



Gambar 3.5 *Ultrasonic Thickness Gauging Olympus*

9. Alat Uji Kekerasan

Salah satu alat pengujian kekerasan yang dapat digunakan alat merk TMTECK THL500.



Gambar 3.6 Alat uji kekerasan TMTECK THL500

3.3 Langkah - Langkah Penelitian

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

1. *Visual Inspection* Sisi Dalam boiler

Inspeksi secara *visual* dilakukan kedalam boiler untuk mengetahui lokasi titik kegagalan, perlakuan apa saja yang telah terjadi pada tube yang gagal, dan inspeksi peralatan lain yang berpotensi mengakibatkan kegagalan rear water wall tube boiler.

2. Identifikasi Masalah

Pemeriksaan terhadap rear water wall tube boiler PLTU Pangkalan Susu OMU dengan faktor-faktor yang berkaitan pada kegagalan material tube mengalami kegagalan dengan bentuk kegagalan fish mouth. Dan kebocoran pada elevasi bawah nose yang masih dalam satu line tube line 132. Pemeriksaan area sootblower dengan memastikan status peralatan sootblower IR20.

3. Observasi Lapangan dan Wawancara

Setelah diketahui permasalahan yang terjadi, dilakukan observasi lapangan dan wawancara dengan bagian pemeliharaan dan operasi yang

bertujuan untuk mengumpulkan data-data berupa kondisi *actual sootblower* IR20, kualitas air *boiler* dalam hal ini seksi kimia pembangkit, dan mengumpulkan data-data *specimen* benda uji agar dapat merumuskan masalah yang terjadi pada *tube rear water wall boiler* Unit 2.

4. Studi Literatur

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

5. Pengambilan Data Operasional dan *Material*

Setelah dilakukannya beberapa tahapan diatas, maka *material tube* yang mengalami kegagalan *fish mouth* dapat dijadikan objek penelitian analisis kegagalan. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengetahui penyebab kegagalan yang terjadi pada *rear water wall tube boiler* Unit.2 disertai dengan beberapa batasan masalah dan diharapkan kegagalan serupa tidak berulang.

6. Perumusan Masalah dan Tujuan

Setelah dilakukannya beberapa tahapan diatas, maka *tube platen superheater* dapat dijadikan objek penelitian analisis kegagalan. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengetahui penyebab dan *damage mechanism* kegagalan yang terjadi pada *tube platen superheater* disertai dengan beberapa batasan masalah.

7. Beberapa pengujian dilakukan sebagai pendukung untuk mengetahui analisa dan mekanisme kegagalan yang terjadi pada *tube rear water wall* yang mengalami kegagalan *fish mouth* antara lain pengamatan *visual*, pengujian UTG, PMI, pengamatan *metallography*, pengujian *scanning electron microscope*, pengujian kekerasan, dan EDS.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

PEMBAHASAN DAN ANALISA DATA

Sejak unit PLTU Pangkalan Susu OMU beroperasi dari tahun 2015 sampai 2022 (7 tahun operasi) telah terjadi kebocoran *tube boiler* sebanyak 11 kali di berbagai lokasi dan *tube* yang berbeda. Padahal berdasarkan *manual book* Guangdong Power Engineering, Co Dongfang Electric Co. Ltd. *boiler* di desain untuk beroperasi selama 30 tahun. Dari data kebocoran *tube* terjadi dalam rentan kurun waktu 6 bulan sejak 2021, maka kejadian kebocoran terakhir pada tanggal 20 Maret 2022 dianalisa lebih lanjut dalam penelitian ini. *Rear water wall tube boiler* mengalami *failure* dengan 2 lokasi titik kebocoran dalam 1 *row pipe number* 132 pada elevasi 37 mdpl dan 29.8 mdpl.

4.1 Kegagalan *Rear Water Wall Tube Boiler*

Kegagalan yang terjadi pada *rear water wall tube* dilakukan dengan melihat secara *visual* karakteristik *tube rupture*. Pemeriksaan secara *visual* dilakukan langsung ke dalam *boiler* yang berada di Unit PLTU Pangkalan Susu OMU setelah *cooling down* dan *boiler* aman untuk dilakukan akses.

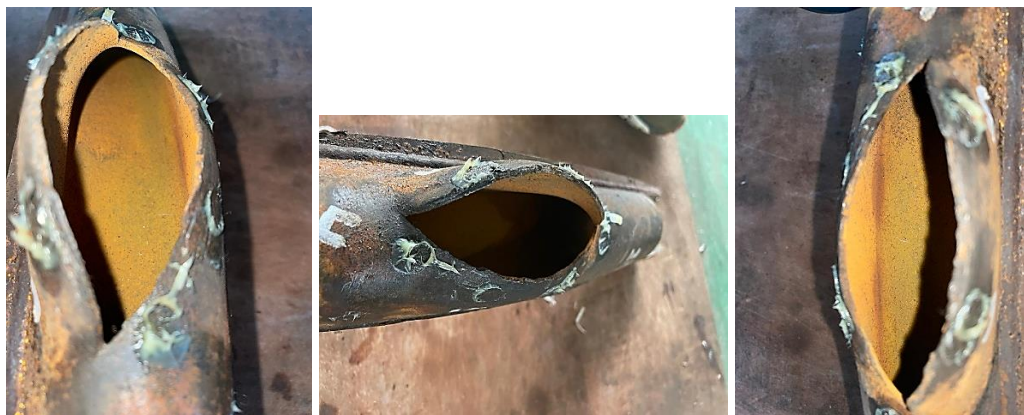
4.1.1. Analisa penyebab *tube rupture*

Tube yang *rupture* yaitu *rear water wall tube* dapat dilihat pada Gambar 4.1, Gambar 4.2, Gambar 4.3, dan Gambar 4.4 yang mempunyai karakteristik sebagai berikut:

- a. Berdasarkan inspeksi *visual* ditemukan lokasi kebocoran pada *area rear water wall tube material* GB5310 identitas nomor pipa 132.
- b. Temuan kegagalan pertama pada elevasi 37 mdpl di *nose* dengan bentuk kegagalan *fish mouth* dengan arah *rupture* searah sumbu pipa pada Gambar 4.1. Temuan kebocoran kedua pada elevasi 29.8 mdpl sekitar *area sootblower* IR20 pada Gambar 4.2.
- c. Lokasi *mapping* kebocoran disajikan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 dibawah ini.
- d. Arah *rupture* sejajar dengan arah aliran water.

- e. Terjadi penambahan diameter *tube* atau mengembung (*bulging*) pada titik pecah.
- f. Permukaan yang pecah tidak terdapat lapisan kerak dari *metal tube* itu sendiri.

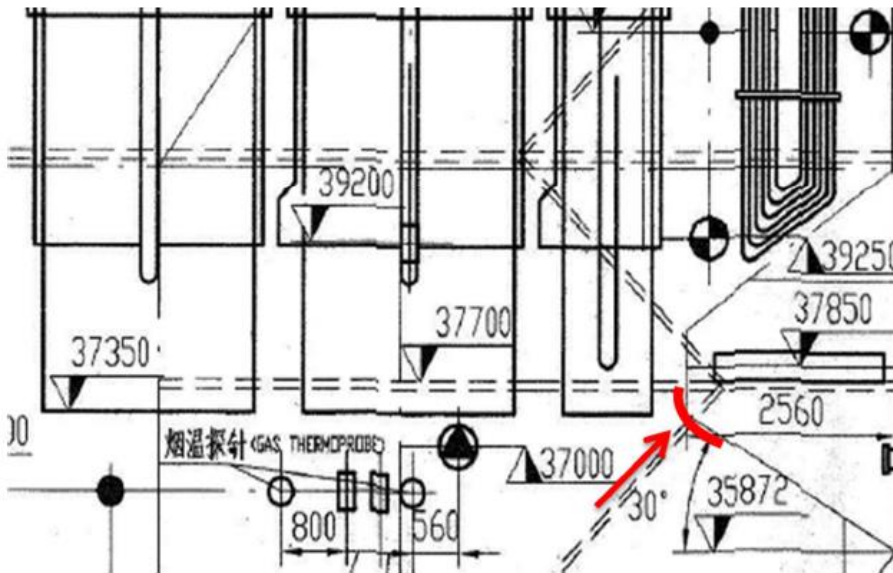
Kegagalan terjadi pada daerah *elbow (nose)* yang membentuk *rupture fish mouth*. Untuk memastikan lebih dalam dan mengetahui mekanisme kegagalan yang terjadi dilakukan pengujian lebih lanjut. Pengukuran yang dilakukan antara lain *dimensional check*, *thickness check*, *positive material identification*, *hardness check*, *microstructure analysis*, *scanning electron microscope*, *energy dispersive spectroscopy*, dan pengujian *deposite*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah kegagalan yang terjadi adalah *short-term overheating* atau *long-term overheating exposure*. Tidak ditemukan keberadaan *secondary crack*, tidak ditemukan adanya pecahan yang hilang pada daerah *rupture* hal ini karena perubahan sifat material menjadi lunak apabila dikenai panas berlebih dalam hal ini temperature 350 °C – 370 °C secara continue.



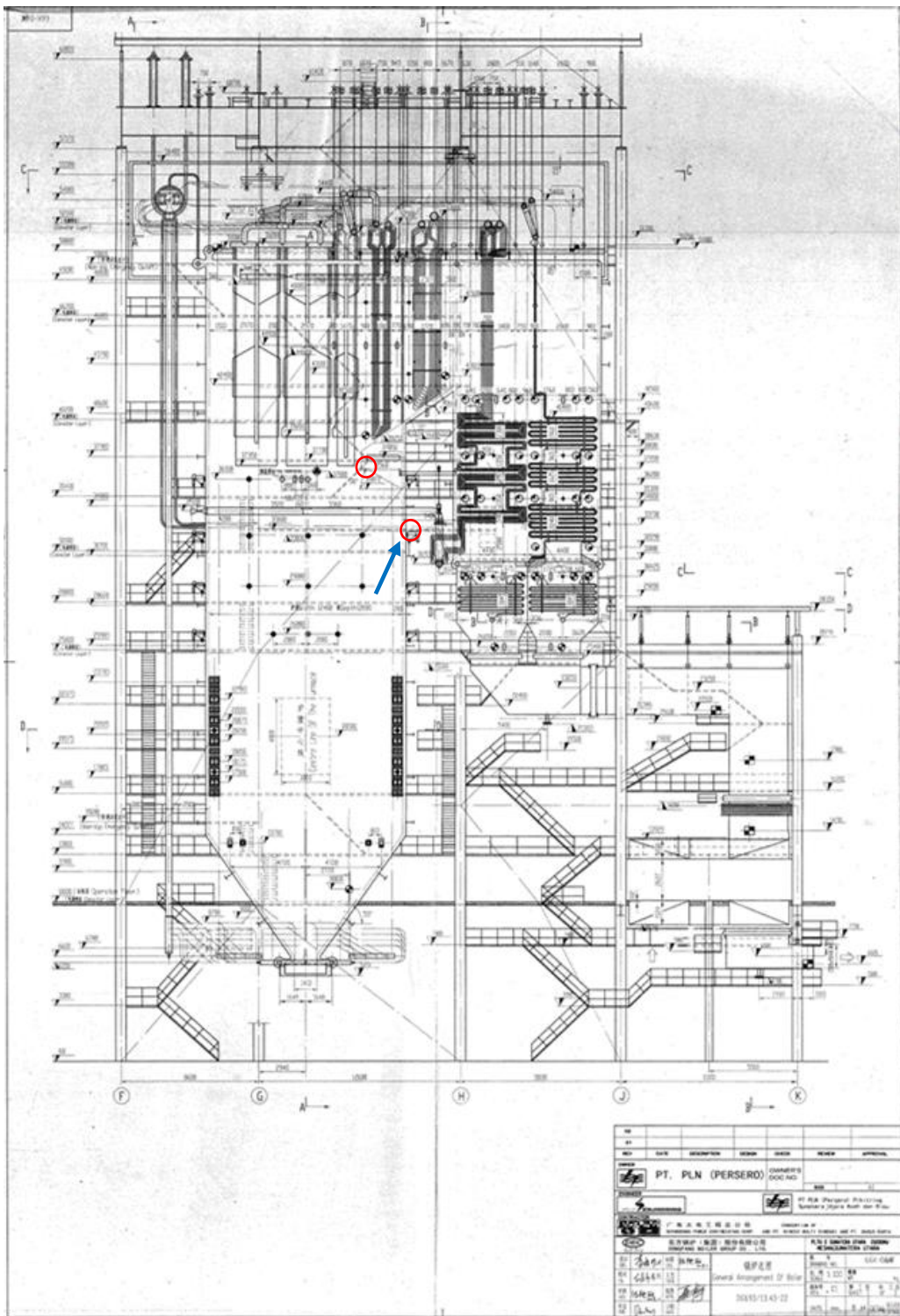
Gambar 4.1 *Rupture fishmouth* pada *rear water wall tube* elevasi 37 mdpl (*nose*)



Gambar 4.2 Visual inspeksi kegagalan rear water wall tube elevasi 29.8 mdpl (area Sootblower IR20)



Gambar 4.3 Lokasi mapping kebocoran rear wall tube elevasi 37 mdpl (nose)



Gambar 4.4 Lokasi *mapping* kebocoran rear wall tube elevasi 29.8 mdpl (area Sootblower IR20)

Pemeriksaan dilakukan ke lokasi kejadian *tube* yang pecah (*rupture*) pada tanggal 21 Maret 2022 Pukul 16.00 WIB yaitu *rear water wall tube* nomor 132. Ditemukan kebocoran dengan bentuk *rupture fish mouth* pada elevasi 37 mdpl. Inspeksi berlanjut dan ditemukan kebocoran dengan titik yang berbeda pada elevasi 29.8 mdpl dengan kegagalan erosi dekat dengan *sootblower* IR20.

Faktor yang menyebabkan kegagalan *tube* antara lain sebagai berikut:

1. Kedua titik kegagalan *tube* yang *rupture* merupakan *rear water wall tube*.
2. Karakteristik yang berbeda pada kegagalan kedua titik dalam satu *line tube*.
3. Kedua titik kegagalan *tube* yang pecah nomor 132 berada pada *tube* yang sama (segaris) pada *wall tube*.
4. Temuan pertama pada *tube* elevasi 37 mdpl pecah dengan indikasi bentuk pecahan *fish mouth* dan permukaan *inside tube* yang berwarna coklat kekuningan pada Gambar 4.1.
5. *Tube* elevasi 29.8 mdpl bocor dengan indikasi pengurangan *thickness* akibat *spray sootblower* IR20 yang mengakibatkan erosi pada Gambar 4.2.
6. Ditemukan *sootblower* IR20 yang mengalami gangguan pada sisi *limit switch* pada Gambar 4.12.

4.2 Analisa Overheating pada Rear Water Wall Tube

4.2.1. Inspeksi visual

Pengamatan secara visual dilakukan langsung kedalam *boiler* PLTU Pangkalan Susu setelah *cooling down* dan *boiler* dinyatakan aman untuk diakses. Dengan melihat secara visual karakteristik *water wall tube* yang pecah menunjukkan pipa mengalami pemanasan yang berlebih (*overheating*). Ini ditandai dengan terjadinya mulut ikan "*fishmouth defect*" dan terjadinya mengembung "*bulging*" dapat dilihat pada Gambar 4.1.

4.2.2 Dimensional check dan thickness measurement

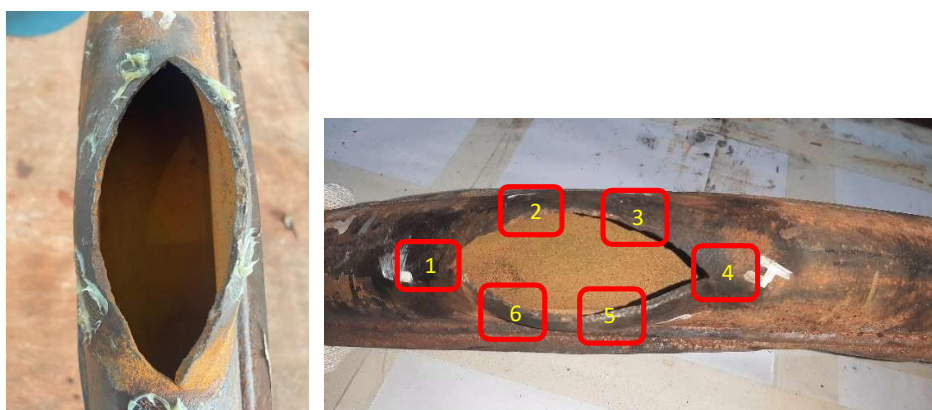
Adapun *dimensional check rupture fishmouth tube* yang telah diukur disajikan pada Gambar 4.5 dibawah ini. Panjang kegagalan *fishmout* 100 mm dan lebar 42 mm.



Titik Pengukuran	Panjang (mm)
A	100
B	42

Gambar 4.5 *Dimensional tube* yang mengalami *fracture*



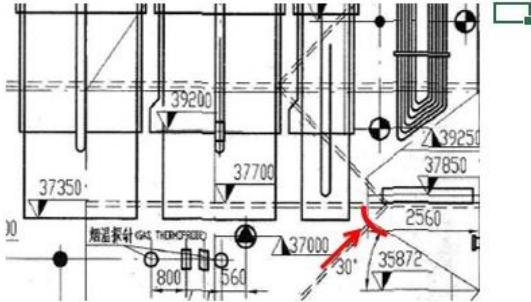
Pada area kebocoran dilakukan pengecekan ketebalan *tube* untuk mengetahui tebal pipa pada saat *fracture* disajikan pada Table 4.1 dan dibandingkan dengan ketebalan hasil pengukuran *thickness Assessment Boiler* Tahun 2021 pada Gambar 4.7. Berikut adalah data ketebalan masing-masing titik dengan lokasi pengukuran ketebalan pada sampel *fracture* disajikan pada Gambar 4.6 dibawah ini.



Gambar 4.6 Lokasi pengukuran *thickness* elbow elevasi 37 mdpl (*nose*) yang mengalami *fracture*

Tabel 4.1 Hasil pengukuran *thickness elbow* elevasi 37 mdpl (*nose*) yang mengalami *fracture*

Titik Pengukuran	Tebal (mm)		
	1	3.13	3.15
2	3.15	3.18	3.17
3	3.22	3.20	3.25
4	3.28	3.30	3.27
5	3.05	3.08	3.10
6	2.85	2.87	2.88

	ASSESMEN BOILER PLTU UNIT 2 PANGKALAN SUSU 2021		Sheet : 303 Date : 12-Jan-20																																																																																																																																																						
	MECHANICAL JOB		BOILER THICKNESS CHECK																																																																																																																																																						
Work Order No. : Priority : Maintenance type : ASSESSMENT BOILER	Tag No. (KKS) : Unit : PLTU 2 Location : PANGKALAN	Work Instr. No. : Reference Doc. : MANUAL BOOK Other Ref. Doc. :																																																																																																																																																							
LOKASI : WATER WALL TUBE POSISI : NOSE A3																																																																																																																																																									
																																																																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">No. Row</th> <th colspan="3">Tebal Pipa (mm)</th> </tr> <tr> <th>Kiri</th> <th>Tengah</th> <th>Kanan</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>121</td><td>6.02</td><td>6.01</td><td>6.02</td></tr> <tr><td>122</td><td>6.02</td><td>6.01</td><td>6.04</td></tr> <tr><td>123</td><td>6.05</td><td>6.06</td><td>6.03</td></tr> <tr><td>124</td><td>6.06</td><td>6</td><td>5.99</td></tr> <tr><td>125</td><td>5.89</td><td>5.88</td><td>5.89</td></tr> <tr><td>126</td><td>6.15</td><td>6.15</td><td>6.15</td></tr> <tr><td>127</td><td>5.98</td><td>5.96</td><td>6.11</td></tr> <tr><td>128</td><td>5.85</td><td>5.88</td><td>5.88</td></tr> <tr><td>129</td><td>5.92</td><td>5.92</td><td>5.92</td></tr> <tr><td>130</td><td>5.91</td><td>6.01</td><td>6</td></tr> <tr><td>131</td><td>5.89</td><td>5.86</td><td>5.89</td></tr> <tr><td>132</td><td>5.96</td><td>5.89</td><td>5.91</td></tr> <tr><td>133</td><td>6.22</td><td>6.1</td><td>6.08</td></tr> <tr><td>134</td><td>6.04</td><td>6.05</td><td>6.03</td></tr> <tr><td>135</td><td>6.16</td><td>6.16</td><td>6.15</td></tr> <tr><td>136</td><td>6.1</td><td>6.08</td><td>6.07</td></tr> <tr><td>137</td><td>5.76</td><td>5.76</td><td>5.76</td></tr> <tr><td>138</td><td>6.02</td><td>6.02</td><td>6.02</td></tr> <tr><td>139</td><td>6.01</td><td>6.06</td><td>5.99</td></tr> <tr><td>140</td><td>6.05</td><td>6.07</td><td>6.09</td></tr> </tbody> </table>		No. Row	Tebal Pipa (mm)			Kiri	Tengah	Kanan	121	6.02	6.01	6.02	122	6.02	6.01	6.04	123	6.05	6.06	6.03	124	6.06	6	5.99	125	5.89	5.88	5.89	126	6.15	6.15	6.15	127	5.98	5.96	6.11	128	5.85	5.88	5.88	129	5.92	5.92	5.92	130	5.91	6.01	6	131	5.89	5.86	5.89	132	5.96	5.89	5.91	133	6.22	6.1	6.08	134	6.04	6.05	6.03	135	6.16	6.16	6.15	136	6.1	6.08	6.07	137	5.76	5.76	5.76	138	6.02	6.02	6.02	139	6.01	6.06	5.99	140	6.05	6.07	6.09	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">No. Row</th> <th colspan="3">Tebal Pipa (mm)</th> </tr> <tr> <th>Kiri</th> <th>Tengah</th> <th>Kanan</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>141</td><td>6.02</td><td>6.03</td><td>6.01</td></tr> <tr><td>142</td><td>6.1</td><td>6.06</td><td>6.05</td></tr> <tr><td>143</td><td>5.99</td><td>5.87</td><td>5.87</td></tr> <tr><td>144</td><td>6.04</td><td>6.1</td><td>6.09</td></tr> <tr><td>145</td><td>6.03</td><td>5.99</td><td>6.01</td></tr> <tr><td>146</td><td>6.18</td><td>6.18</td><td>6.18</td></tr> <tr><td>147</td><td>6.09</td><td>6.06</td><td>6.03</td></tr> <tr><td>148</td><td>6.16</td><td>6.19</td><td>6.16</td></tr> <tr><td>149</td><td>6.07</td><td>6.07</td><td>6.06</td></tr> <tr><td>150</td><td>6.07</td><td>6.07</td><td>6.08</td></tr> <tr><td>151</td><td>6.13</td><td>6.12</td><td>6.07</td></tr> <tr><td>152</td><td>5.86</td><td>5.9</td><td>5.9</td></tr> <tr><td>153</td><td>5.93</td><td>5.98</td><td>5.9</td></tr> <tr><td>154</td><td>6.08</td><td>6.09</td><td>6.13</td></tr> </tbody> </table>		No. Row	Tebal Pipa (mm)			Kiri	Tengah	Kanan	141	6.02	6.03	6.01	142	6.1	6.06	6.05	143	5.99	5.87	5.87	144	6.04	6.1	6.09	145	6.03	5.99	6.01	146	6.18	6.18	6.18	147	6.09	6.06	6.03	148	6.16	6.19	6.16	149	6.07	6.07	6.06	150	6.07	6.07	6.08	151	6.13	6.12	6.07	152	5.86	5.9	5.9	153	5.93	5.98	5.9	154	6.08	6.09	6.13
No. Row	Tebal Pipa (mm)																																																																																																																																																								
	Kiri	Tengah	Kanan																																																																																																																																																						
121	6.02	6.01	6.02																																																																																																																																																						
122	6.02	6.01	6.04																																																																																																																																																						
123	6.05	6.06	6.03																																																																																																																																																						
124	6.06	6	5.99																																																																																																																																																						
125	5.89	5.88	5.89																																																																																																																																																						
126	6.15	6.15	6.15																																																																																																																																																						
127	5.98	5.96	6.11																																																																																																																																																						
128	5.85	5.88	5.88																																																																																																																																																						
129	5.92	5.92	5.92																																																																																																																																																						
130	5.91	6.01	6																																																																																																																																																						
131	5.89	5.86	5.89																																																																																																																																																						
132	5.96	5.89	5.91																																																																																																																																																						
133	6.22	6.1	6.08																																																																																																																																																						
134	6.04	6.05	6.03																																																																																																																																																						
135	6.16	6.16	6.15																																																																																																																																																						
136	6.1	6.08	6.07																																																																																																																																																						
137	5.76	5.76	5.76																																																																																																																																																						
138	6.02	6.02	6.02																																																																																																																																																						
139	6.01	6.06	5.99																																																																																																																																																						
140	6.05	6.07	6.09																																																																																																																																																						
No. Row	Tebal Pipa (mm)																																																																																																																																																								
	Kiri	Tengah	Kanan																																																																																																																																																						
141	6.02	6.03	6.01																																																																																																																																																						
142	6.1	6.06	6.05																																																																																																																																																						
143	5.99	5.87	5.87																																																																																																																																																						
144	6.04	6.1	6.09																																																																																																																																																						
145	6.03	5.99	6.01																																																																																																																																																						
146	6.18	6.18	6.18																																																																																																																																																						
147	6.09	6.06	6.03																																																																																																																																																						
148	6.16	6.19	6.16																																																																																																																																																						
149	6.07	6.07	6.06																																																																																																																																																						
150	6.07	6.07	6.08																																																																																																																																																						
151	6.13	6.12	6.07																																																																																																																																																						
152	5.86	5.9	5.9																																																																																																																																																						
153	5.93	5.98	5.9																																																																																																																																																						
154	6.08	6.09	6.13																																																																																																																																																						

Gambar 4.7 Data hasil pengukuran thickness pada *Assessment Boiler* Unit 2 tahun 2021

Hasil pengukuran ketebalan pada daerah *fracture* Tabel 4.1 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan ketebalan yang dibanding dengan ketebalan pipa pada data hasil pengukuran *thickness Assessment Boiler* Tahun 2021. *Thickness* pada daerah kegagalan lebih kecil dari *thickness* hasil *Assessment* tahun 2021.

Pengukuran *thickness* berlanjut pada area kebocoran elevasi 29.8 mdpl pada area *sootblower* IR20. Secara visual dapat terlihat adanya penipisan pada beberapa *tube* yang bersebelahan dengan *nozzle sootblower* IR20. Untuk lebih meyakinkan dilakukan pengukuran *thickness* pada *tube* yang mengalami pengikisan ketebalan oleh *sootblower* IR20. Lokasi titik pengukuran ketebalan pada Gambar 4.8 dibawah ini dan hasil pengukuran *thickness* disajikan pada Table 4.2 sebagai berikut:



Gambar 4.8 Titik pengukuran *thickness* elevasi 29.8 mdpl area *sootblower* IR20

Tabel 4.2 Hasil pengukuran *thickness tube* elevasi 29.8 mdpl area *sootblower* IR20

<i>Tube No.</i>	Tebal (mm)	
	Pengukuran 1	Pengukuran 2
129	5.56	5.70
130	5.83	5.70
131	3.45	2.79
132 (Leak)	1.02	1.06
133	2.10	1.86
134	1.20	1.57

135	1.63	1.56
136	1.88	1.83
137	2.70	2.72
138	3.25	3.30
139	3.67	3.66
140	3.95	4.05
141	4.48	4.39
142	4.67	4.70
143	5.17	5.23

4.2.3. Pengujian komposisi material

Untuk mengetahui jenis material yang mengalami kegagalan dilakukan uji komposisi material dengan menggunakan metode *X-Ray Fluorescence Analyzer Positive Material Identification*. Alat yang dipakai adalah Bruker S1 Titan, dengan hasil pengujian jenis *material* sebagai berikut.



Gambar 4.9 Lokasi pengujian *Positive Material Identification* Bruker S1 Titan

Tabel 4.3 Hasil pengujian *positive material identification* Bruker S1 Titan

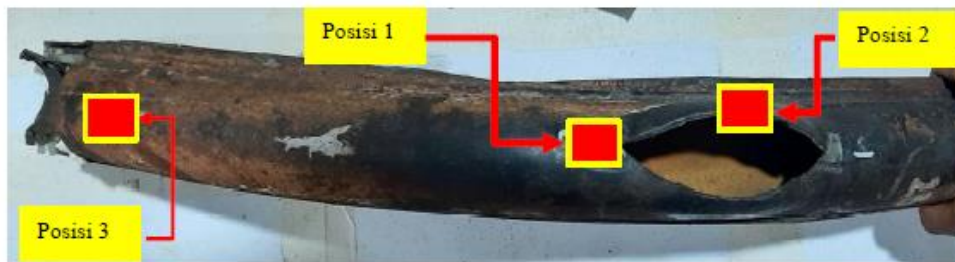
Sample	%Fe	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cu	%Cr	%Mo	%V	%Nb	%Ti
Rear Wall Tube No.132 (PMI)	99.186	0.200	0.588	-	-	0.089	0.026	0.009	-	-	0.002
20G (Mill Certificate)	-	0.200	0.440	0.300	0.080	0.020	0.090	0.003	0.003	-	0.002

Hasil pengujian PMI Tabel 4.3 menunjukkan bahwa material rear wall tube No.132 boiler Pangkalan Susu tergolong baja karbon rendah dengan paduan Mangan dan Silikon, serta sedikit kehadiran Cu, Cr, dan Mo. Berdasarkan data

pengukuran aktual PMI komposisi kimia material telah sesuai dan masuk dalam range spec GB5310-20G pada Mill Certificate yang disajikan pada Gambar 2.4.

4.2.4. Pengujian kekerasan

Pengujian hardness test dilakukan dengan menggunakan alat TMTECK THL370 *Hardness Tester* dengan metode dan satuan yang digunakan *Hardness Brinell*. Material GB5310 *equivalent* dengan material SA210-A1, batas standar untuk HB pada SA210-A1 adalah 149 HB *max*. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.4, nilai kekerasan yang didapat masih dalam batas standar keberterimaan ASME II tidak melebihi 149 HB tetapi kekerasan pada daerah tepi *rupture fish mouth* titik pengujian Posisi.1 dan titik pengujian Posisi.2 pada Gambar 4.10 mengalami kenaikan nilai kekerasan sebesar 139 HB dibanding dengan *base material* yang jauh dari *rupture* titik pengujian Posisi.3 sebesar 113 HB.

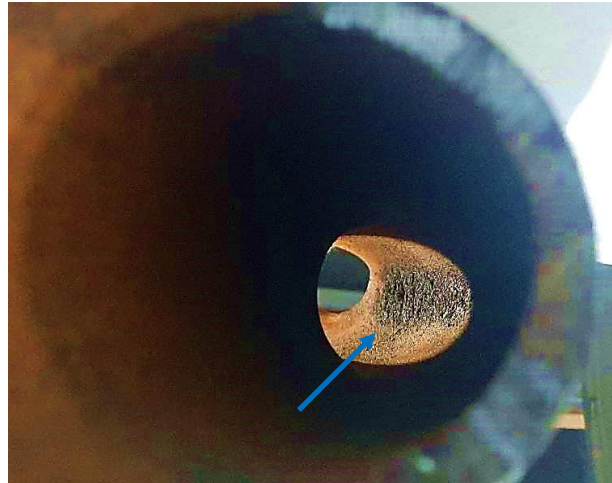


Gambar 4.10 Titik pengujian kekerasasn Posisi 3 *base material*, Posisi 2 dan Posisi 1 tepi *rupture*.

Tabel 4.4 Hasil *hardness testing* HB pada *material rear wall tube 20G*

Posisi	Hardness Value (HB)			Average (HB)
	N1	N2	N3	
1 (tepi rupture)	139	138	139	139
2 (tepi rupture)	128	127	128	128
3 (base material)	113	112	113	113

Temuan *deposit* dan hasil pengujian *deposit* membuktikan keberadaan *ferromagnetite* (Fe_3O_4) disajikan pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 sebagai berikut:



Gambar 4.11 *Deposit inside tube* area kegagalan

Card	Phase	RIR	%W Unc	m/R	Mu/rho	%W Xtal	%W Xtal+A
01-1516	Magnesioferrite	25.85	59.4(0.6)	0042.4	59.4(0.6)	52.9(0.6)	
01-6450	Magnetite= Fe ₃	37.85	40.6(0.6)	0043.1	40.6(0.6)	36.2(0.6)	
	Global amorphous stuff	37.85	12.3(3.3)			11.0(2.6)	
272-ka: R-according factor= 2.9111							
Density= 1.000(g·cm ⁻³) μ/Dx of the mixture= 42.7 cm ² ·g ⁻¹							
Summary of quantitative analysis of crystalline components							
Sample	Magnesiof	Magnetite	R-acc	Densit	C.Mas		
272-ka	59.4(0.6)	40.6(0.6)	2.9111	1.000	42.7		
Summary of quantitative analysis of crystalline components and amorphous stuff							
Sample	Magnesiof	Magnetite	Amorp	R-acc	Densit	C.Mas	
272-ka	52.9(0.6)	36.2(0.6)	11.0(2.6)	2.9111	1.000	42.7	

Gambar 4.12 Hasil pengujian *deposit*

Berdasarkan temuan *deposit* pada sampel kegagalan telah dilakukan pengujian *deposit* dengan hasil yang disajikan pada Gambar 4.12 bahwa menunjukkan keberadaan senyawa *magnetite* (Fe₃O₄) akibat dari kadar oksigen (O₂) yang terlarut dalam air *boiler* dan bereaksi dengan Fe.

Kenaikan nilai kekerasan yang terjadi disebabkan karena terjadinya pemanasan yang berlebih atau *hot spot* pada *line pipe* no.132 yang penyerapan panasnya terkonsentrasi pada titik punggung *elbow* elevasi 37 mdpl disebabkan

karena kurangnya laju aliran fluida pada sisi dalam *tube* seiring dengan terpaparnya secara radiasi pada *temperature* tinggi dari sisi luar *tube* secara *continue*. Kekerasan meningkat karena terbentuknya lapisan *ferromagnetite* pada *tube* akibat kandungan oksigen yang terlarut pada kesadahan air *boiler* yang bereaksi dengan Fe pada *temperature* tinggi sehingga membentuk Fe₃O₄. Dan keberadaan *spheroidize carbide* yang berkumpul di batas butir yang berbentuk kasar. Dimana *temperature* kerja sisi dalam *tube* adalah 350 °C dan sisi luar *tube* 380 °C dengan *pressure* operasi 14 Mpa.

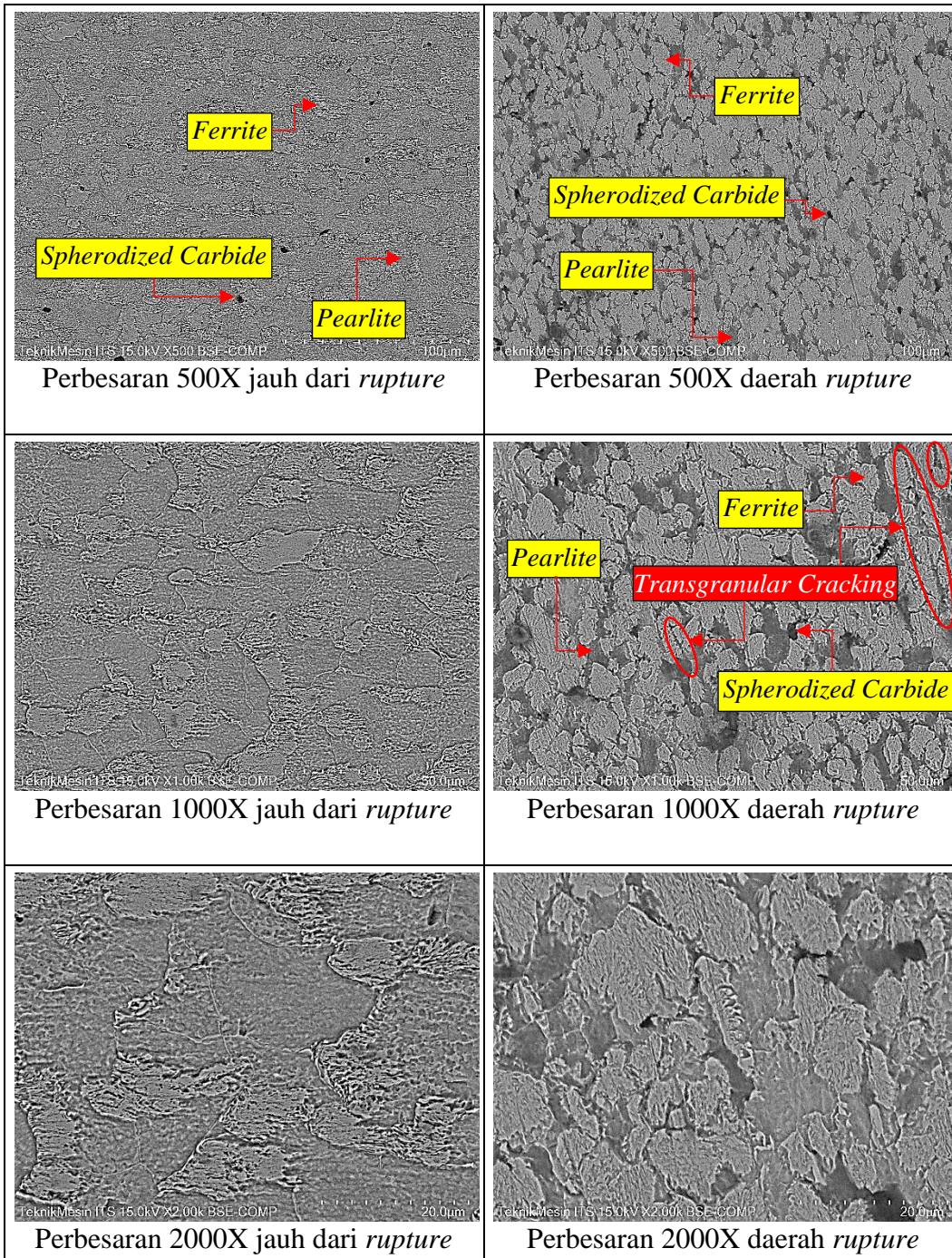
4.2.5. Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

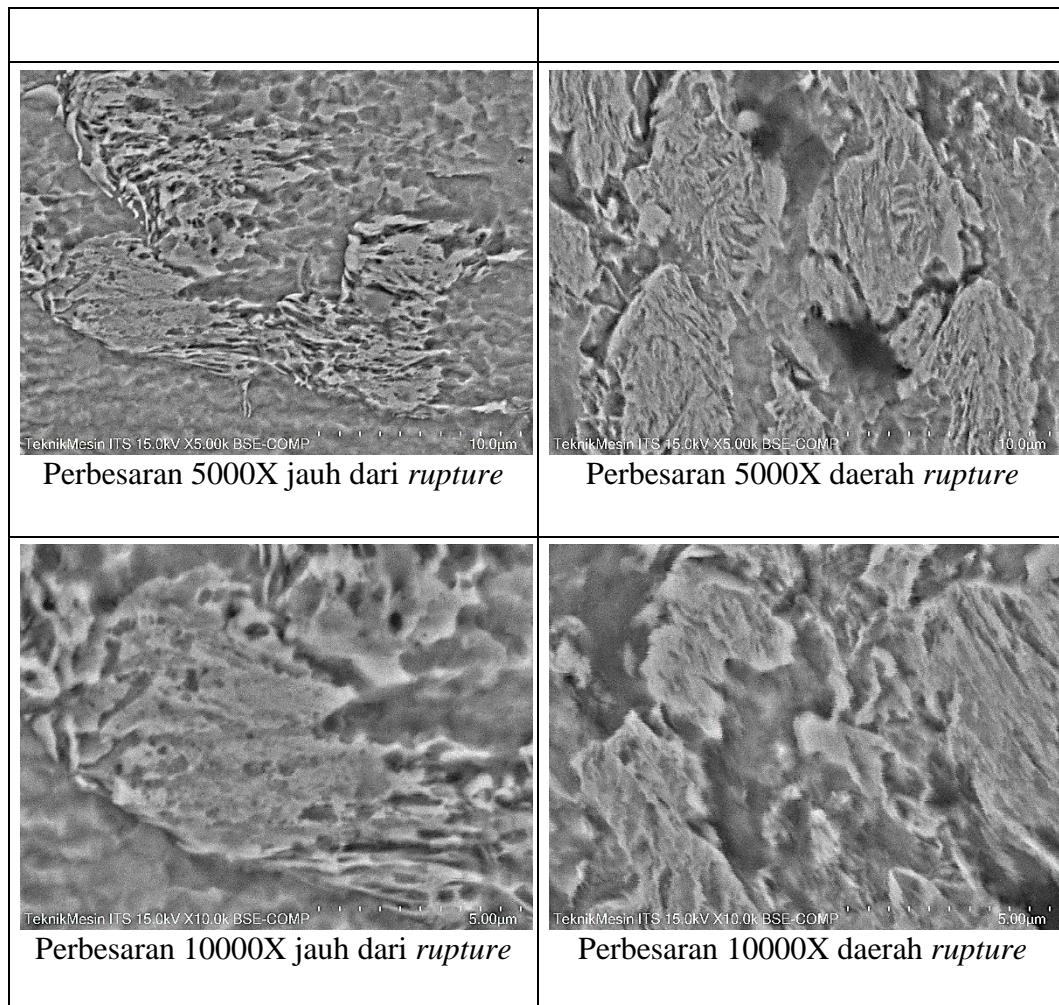
Pengujian ini dilakukan pada 2 (dua) daerah pengujian pada *rear water wall tube* yang mengalami kegagalan *fishmouth* untuk mengetahui struktur mikro dari *material tube* dan jenis retakan yang terjadi pada kegagalan tersebut apakah retakan terjadi secara *intergranular* (retak batas butir) atau *transgranular* (retak membelah butir).

Pengamatan struktur mikro dilakukan pada daerah *fracture* kegagalan *fish mouth* pada Gambar 4.13 kolom kanan daerah *rupture* dibandingkan dengan daerah yang jauh dari kegagalan pada Gambar 4.13 kolom kiri daerah jauh dari kegagalan. Pengamatan struktur mikro *base material* pada *tube* perbesaran 500X dan 1000X memperlihatkan bahwa fasa terdiri dari fasa *ferrite* yang berwarna putih dan *pearlite* berwarna gelap dengan hadirnya karbida antar batas butir ditunjukkan pada Gambar 4.13. Sferoidisasi fasa *pearlite* telah terjadi, tetapi masih dalam tahapan stadium 2 atau kategori B menurut standar ERA. Terjadi sebagian sferoidisasi fasa *pearlite* tetapi fasa *pearlite* masih dapat diamati.

Sedangkan pengamatan struktur mikro pembesaran 500X dan 1000X pada daerah *rupture* Gambar 4.13 kolom kanan, dimana telah terjadi degradasi struktur mikro yaitu sferoidisasi karbida dalam butir *pearlite* bergerak berkumpul pada batas butir karena pengaruh kelebihan panas yang terjadi pada *tube*. Dimana butir fasa *pearlite* sudah memudar dan masuk dalam stadium 3 atau kategori C pada standar ERA. *Tube* yang pecah mempunyai fenomena *short term overheating* yaitu merupakan penggabungan dekomposisi *pearlite* ke dalam *ferrite* dan sferoidisasi karbida. Akibat pemanasan *hotspot* yang terjadi dan berkurangnya laju aliran *water*

pada sisi dalam *tube*. Kejadian ini akan mengurangi kekuatan *material tube*, jika terus berlangsung akan menyebabkan kenaikan kekerasan (*brittle*) pada struktur butir *material*. Seiring dengan meningkatnya kekerasan *material*, keuletan akan semakin menurun dan *material* semakin *brittle*. *Pressure wall tube* yang tinggi mengakibatkan *tube* tidak mampu menahan tegangan, yang terjadi *tube* akan pecah atau gagal.





Gambar 4.13 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan jenis retakan yang terjadi pada kegagalan *tube rear water wall* GB5310 20G. Dimana disajikan pada hasil SEM dengan perbesaran 1000X retak yang terjadi adalah membelah butir (*transgranular cracking*) pada Gambar 4.13. Retakan ini merupakan dampak dari material yang mengalami pengaruh panas yang berlebih dalam jangka waktu pendek. *Transgranular cracking* salah satu ciri khas dari kegagalan *short term overheating*. Tidak terlihat adanya *secondary crack* pada retakan yang muncul melalui pengamatan struktur mikro perbesaran 5000X dan 10000X. Terlihat adanya *vacancy* antar butir tetapi masih dalam jumlah yang sedikit, hal tersebut dapat dikategorikan *initial crack* pada fenomena *creep*. Tetapi ini bukanlah *factor* utama penyebab kegagalan yang terjadi pada saat ini. Melainkan

hanya karena efek dari perlakuan panas yang diterima oleh tube selama 8 tahun boiler beroperasi dan memungkinkan akan *fail* dimasa mendatang.

4.2.6. Gangguan *sootblower* IR20

Temuan pada *sootblower* IR20 yang mengalami gangguan terlihat pada Gambar 4.14 dibawah ini. IR20 tidak bisa *rack-in* dan *re-track* seperti operasi normal. IR20 mengalami gangguan pada sisi *limit switch*. IR20 ketika dilakukan *rack-in tube sootblower* tidak bisa kembali ketika dilakukan *command re-track* pada DCS. Sehingga semburan spray *steam sootblower* berlangsung secara terus menerus pada sisi *wall tube* dengan temperatur 320 °C dan Press 1.8 MPa. Akibatnya *tube* mengalami penipisan karena erosi dan terjadi kebocoran atau kegagalan pada elevasi 29.8 mdpl.



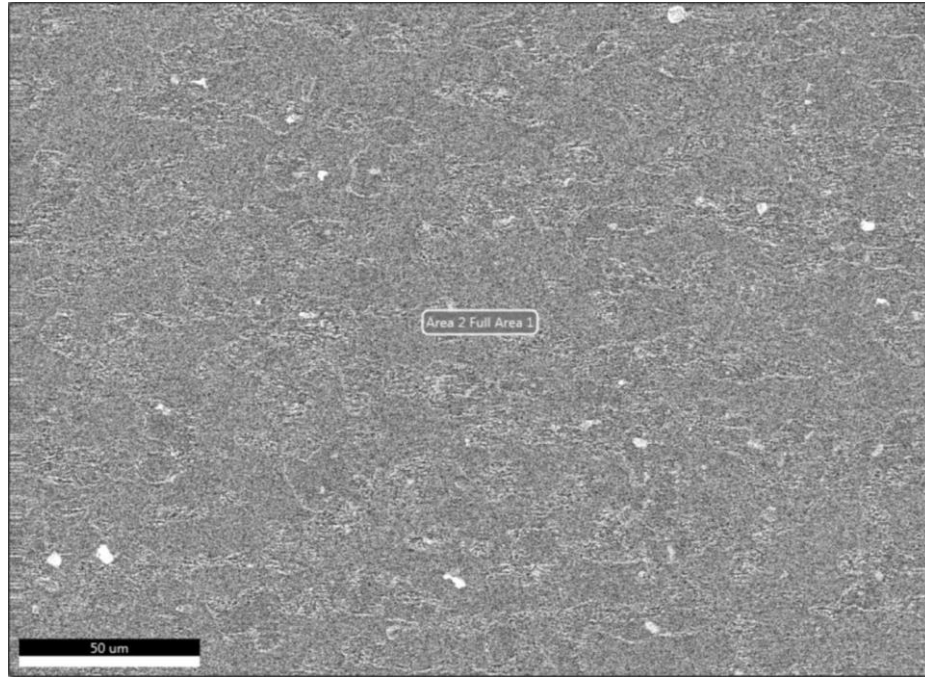
Gambar 4.14 Lokasi *sootblower* IR20 tidak beroperasi normal

4.2.7. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

Scanning Electron Microscope (SEM) selain untuk mengetahui citra struktur secara mikro suatu bahan juga dapat memberikan informasi terkait komposisi kimia pada material tersebut, baik unsur *ferro*, *non-ferro*, maupun *alloy*.

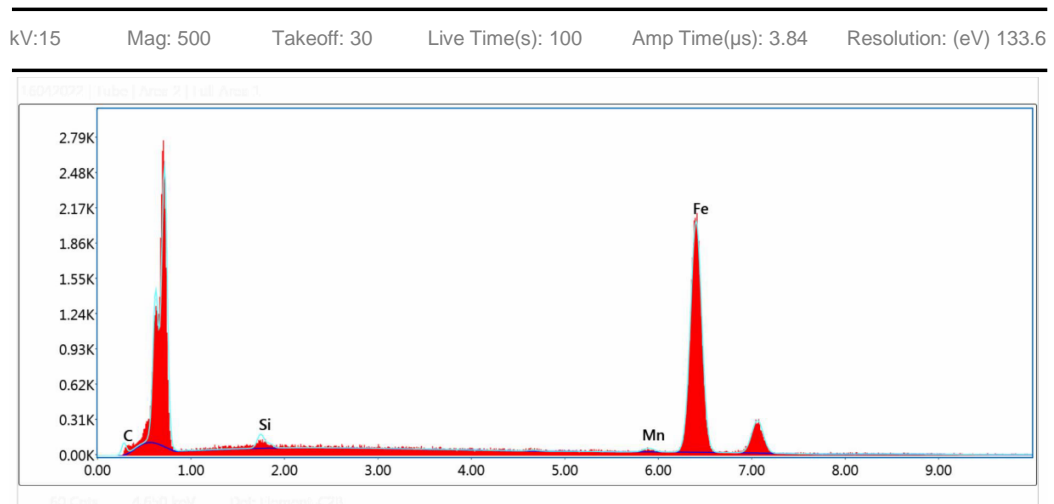
Analisa komposisi kimia material *rear wall tube* dilakukan dengan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) pada daerah yang diamati dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Data komposisi ini penting untuk mengetahui apakah terdapat unsur asing yang merupakan *impurities* dan ikut mempengaruhi terjadinya

fenomena kegagalan. Pengambilan titik analisa komposisi kimia dengan EDS dilakukan pada area retakan pada Gambar 4.16 dan area jauh dari retakan Gambar 4.15 dibawah ini.



Gambar 4.15 Daerah lokasi *base metal* tanpa retakan dengan skala 50 mikron

Tabel 4.5 Data unsur komposisi kimia material *tube* tanpa retakan

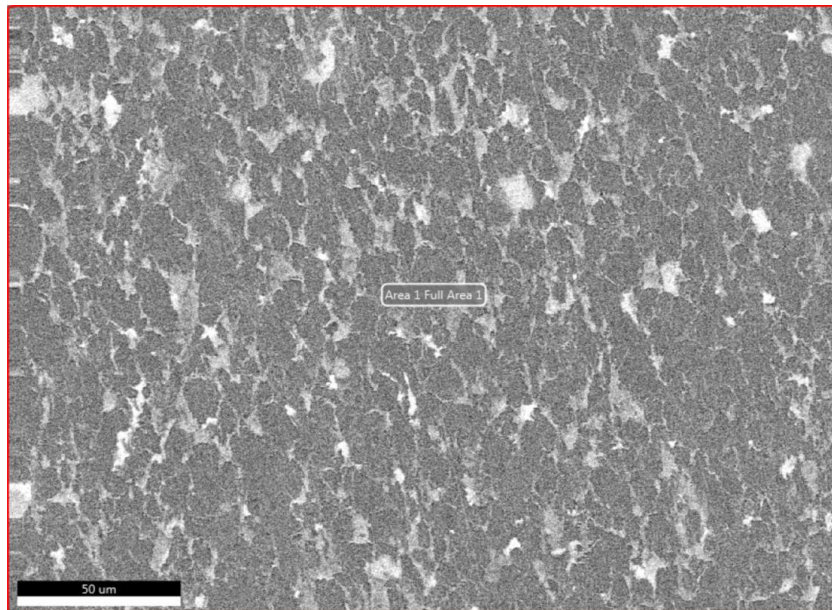


Smart Quant Results

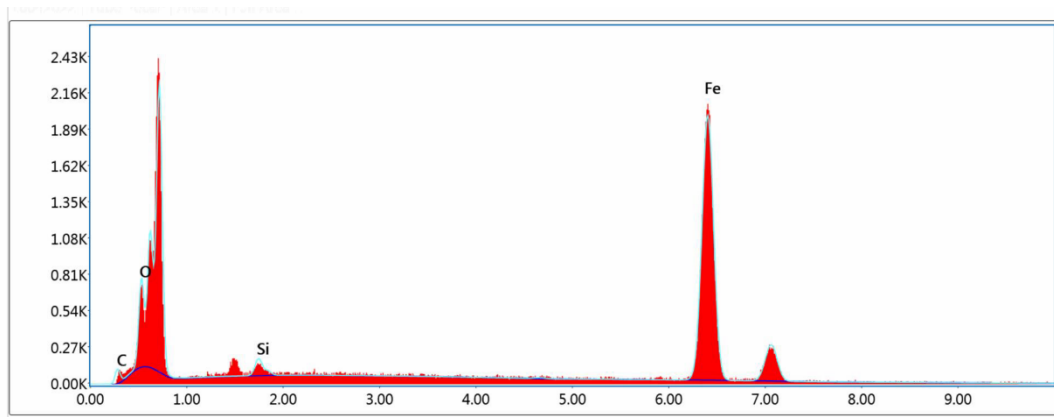
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	2.12	9.05	6.43	14.88	0.0063	1.3444	0.2222	1.0000
SiK	1.00	1.83	11.08	12.61	0.0064	1.1709	0.5495	1.0028
MnK	1.05	0.98	4.37	31.11	0.0115	0.9740	0.9974	1.1334
FeK	95.84	88.14	301.18	2.87	0.9486	0.9894	1.0002	1.0002

Berdasarkan hasil pengujian EDS yang disajikan pada Tabel 4.5 bahwa secara kuantitatif menunjukkan unsur kimia yang terkandung didalam *material rear water wall tube* tanpa kegagalan sesuai dengan kandungan unsur *material GB5310 20G*. Tidak ditemukan unsur yang bersifat *impurities* atau pengotor terutama unsur-unsur yang bersifat korosif.

Untuk daerah *tube failure* hasil EDS dapat dilihat pada Tabel 4.6 dibawah ini dan lokasi pengambilan dengan skala 50 μm pada Gambar 4.16 disajikan sebagai berikut:



Gambar 4.16 Daerah lokasi retakan *tube failure* dengan skala 50 mikron



Gambar 4.17 Spektrum unsur komposisi kimia *material rear water wall tube* retakan

Hasil spektrum pada lokasi retakan Tabel 4.6 dibawah ini bahwa *material tube* menunjukkan kandungan besi (Fe) yang dominan 92.63 % dengan karbon (C) 2.07% dengan kehadiran unsur paduan Si 1.01% dan tidak ditemukan adanya unsur *impurities* pada retakan *tube* tersebut.

Table 4. 6 Hasil komposisi material secara kuantitatif pada retakan *tube*

Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	2.07	8.07	6.45	14.83	0.0062	1.3273	0.2270	1.0000
O K	4.29	12.57	45.14	8.36	0.0273	1.2704	0.5012	1.0000
SiK	1.01	1.68	11.36	12.33	0.0065	1.1557	0.5574	1.0028
FeK	92.63	77.69	292.15	2.89	0.9048	0.9753	1.0010	1.0005

Dari hasil spektrum dan kuantitatif pada retakan tube tidak ditemukan unsur pengotor atau *impurities* pada lokasi retakan *tube* dan komposisi kimia material yang terkandung pada material tersebut sesuai dengan kandungan unsur material GB5310 20G.

4.2.8. Data kualitas air *boiler*

Data kualitas air *boiler* yang diambil oleh bidang kimia pembangunan PLTU Pangkalan Susu OMU adalah disajikan pada Tabel 4.7 sebagai berikut:

Tabel 4.7 Data pengambilan kualitas air *boiler* pada tanggal 20 Maret 2022

Tanggal	Limit	20-Mar					
LOG SHEET UNIT 2		0:00	4:00	8:00	12:00	16:00	20:00
CONDENSATE WATER							
DO (ppb)	≤ 10	12.71	11.84	12.15	12.27		
BOILER WATER							
pH	9 - 9.7	7.16	7.21	7.17	7.15	7.11	7.01
PO4 3- (Phospat) (ppm)	4-6	1.17	0.07	0.10	0.13	0.74	0.63
Silika (SiO2) (ppb)	< 450	456.80	318.50	273.40	229.10	880.00	972.00
Specific Conductivity (us/cm)	< 18	11.58	8.32	7.91	7.20	6.98	8.32
Chloride (ppm)	<0.8	2116.00	3061.00	2672.00	1987.00	2176.00	1540.00

Berdasarkan data yang didapat Tabel 4.7 nilai DO berada diatas dari standar yang diizinkan. Dimana DO pada tanggal 20 Maret 2022 saat kebocoran 12.71 ppb melampaui dari standar *limit* yang ditentukan ≤ 10 ppb. *Dissolve Oxygen* (DO) adalah jumlah oksigen terlarut dalam air yang berasal dari absorpsi atmosfer atau udara dari proses demineralisasi air *boiler*.

Nilai DO berhubungan dengan temuan senyawa *deposit* yang terkandung pada daerah kegagalan *fish-mouth* yaitu *magnetite* (Fe_3O_4). Kandungan oksigen berlebih yang larut dalam air akan bereaksi dengan Fe pada *material tube* yang membentuk Fe_3O_4 . Sehingga Fe akan berkurang pada *tube* karena diikat oleh oksigen terlarut pada air boiler yang mengakibatkan pengikisan *material inside tube* dengan ketebalan yang semakin berkurang, hal ini dibuktikan pada hasil pengukuran *thickness* tabel 4.1 hasil pengukuran *thickness elbow* yang mengalami *fracture* dibandingkan dengan gambar 4.7 data hasil pengukuran *thickness* pada *Asesmen Boiler Unit 2* tahun 2021. Penipisan material sangat berhubungan dengan kekuatan *tube* dalam menerima *pressure* kerja 14 Mpa.

4.3. Mekanisme Kegagalan Secara Keseluruhan

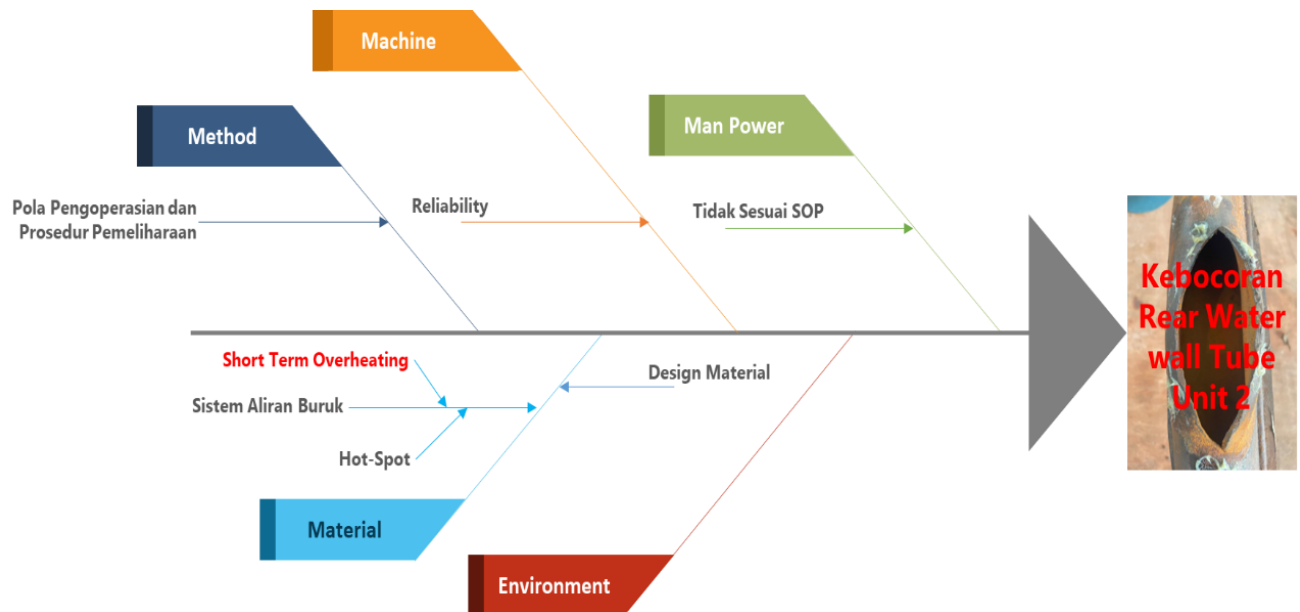
Kegagalan *rear water wall tube boiler* PLTU Pangkalan Susu Medan - Sumatera Utara dipicu oleh:

1. *Fail*-nya tube rear water wall tube merupakan fenomena *short term overheating*.

2. Hasil pengamatan visual dan pengukuran dimensi pola kegagalan membentuk *rupture fish mouth* dengan panjang 100 mm dan lebar 42 mm elevasi 39 mdpl dengan bentuk diameter *tube* sedikit menggebu (*bulging*) dengan bentuk permukaan *fracture thin lip*. [26] [28] [30]
3. Kebocoran juga diamati pada elevasi 29.8 mdpl dengan bentuk lubang dan penipisan *thickness* material terjadi yang diakibatkan oleh semburan *steam sootblower* IR20 temperatur 320 °C yang mengalami gangguan. [27]
4. *Metallography* menunjukkan telah terjadi degradasi struktur mikro pada daerah *rupture* dengan terbentuknya *spherodized carbide* pada butiran *pearlite* dengan kategori C ke D sesuai standar ERA. Kondisi yang serupa juga teramati pada area yang jauh dari posisi *rupture* namun masih dalam kategori B ke C.
5. Hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada posisi *rupture fish mouth* menunjukkan retakan membelah butir (*transgranular*) yang merupakan ciri khas dari *short term overheating*.
6. Pengujian EDS menunjukkan munculnya senyawa *magnetite* (Fe₃O₄) pada daerah kegagalan. Hal ini karena oksigen terlarut dalam air *boiler* yang berlebihan telah bereaksi dengan Fe pada suhu tinggi sehingga menyebabkan inisiasi pertumbuhan retak.

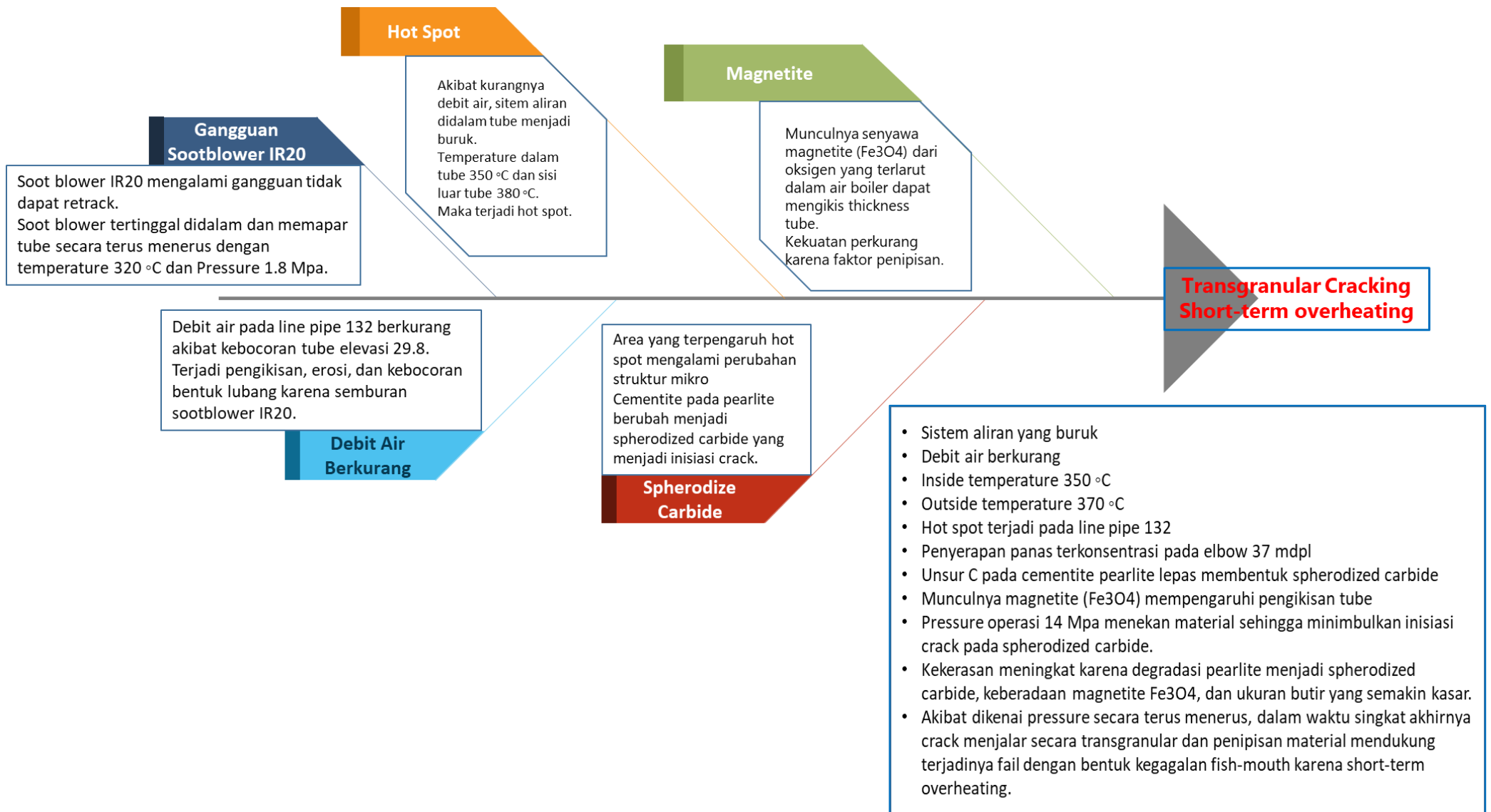
4.4. Fishbone Diagram RCFA

Mekanisme kegagalan *rear water wall tube boiler* PLTU Pangkalan Susu Medan - Sumatera Utara menggunakan analisa RCFA pada Gambar 4.18 sebagai berikut:



Gambar 4.18 Fishbone diagram kebocoran *Rear Water Wall Tube Boiler Unit 2*

Berdasarkan *fishbone* diagram di atas, menunjukkan faktor penyebab terjadinya kebocoran pada *rear water wall tube boiler* disebabkan oleh sistem aliran yang buruk dan terjadi *hot spot* menyebabkan *short-term overheating* pada material. Berikut analisis *short-term overheating* menggunakan *fishbone* diagram yang disajikan pada Gambar 4.19 dibawah ini:



Gambar 4.19 Fishbone diagram short-term overheating

Mekanisme kegagalan *fish mouth* pada *rear water wall tube boiler* mengakibatkan *short-term overheating* yang disajikan pada *fishbone* diagram pada Gambar 4.19 dengan penjelasan sebagai berikut:

1. Mekanisme diawali dari penurunan debit air pada *rear water wall tube boiler* akibat kebocoran pada pipa di 29.8 mdpl sehingga kemudian menciptakan *hot spot* area pada 39 mdpl. [28]
2. Area yang terpengaruh *hot spot* mengalami perubahan struktur mikro dimana struktur *cementite* pada *pearlite* berubah menjadi *spherodized carbide* yang menyebabkan naiknya kekerasan. Kondisi ini menyebabkan munculnya *crack* dari area *spherodize carbide* dan menjalar secara *transgranular* akibat *short-term overheating*. [26] [30]
3. Adanya *magnetite* yang terbentuk berkontribusi mengurangi ketebalan *tube* sehingga area tersebut tidak mampu lagi menahan tekanan air *boiler*. Adanya *crack* yang terbentuk ikut berkontribusi pada pelemahan area sehingga akhirnya terjadi kegagalan *fish mouth* pada area tersebut. [28]
4. Pengujian SEM membuktikan bahwa retakan yang terjadi adalah membelah butir (*transgranular cracking*). Ini merupakan salah satu ciri khas bentuk kegagalan *short-term overheating*. [30]

4.5 Kajian Financial

Keandalan dan performa Unit Pembangkitan, *losses* produksi, dan kerugian *financial* ketika Unit stop selama 7 hari dalam melakukan perbaikan menjadi salah satu tujuan juga dalam melakukan penelitian ini. Kerugian *financial* yang dapat dihindari dari efek kebocoran *boiler* adalah sebagai berikut:

Anggaran rencana biaya Jasa Perbaikan Penormalan Kebocoran *Boiler*:

No.	Deskripsi	Jumlah	Waktu	Satuan	Harga Satuan	Sub Total
1	Jasa Perbaikan include consumable pengelasan	7	Hari	Vendor	Rp. 245.000.000,-	Rp. 245.000.000,-
2	Tube Boiler	3		Pcs	Rp. 3.000.000,-	Rp. 9.000.000,-
TOTAL HARGA						Rp. 254.000.000,-

Losses produksi atau *derating* Unit akibat 7 hari *stop* melakukan perbaikan:

Losses output produksi selama 7 hari :					
	= 180 MW x 168 Jam	x Rp. 1451/kWh	(Sumber ESDM per kWh)		
	= 30.240 MWH	x Rp. 1451/kWh			
	= 30.240.000 kWh	x Rp. 1451/kWh			
	= Rp. 43.878.240.000,-				

Total Kerugian *Financial*:

$$\begin{aligned}
 & \text{Jasa Anggaran Biaya Perbaikan} + \text{Losses Derating Unit} \\
 & = \text{Rp. 254.000.000,-} + \text{Rp. 43.878.240.000,-} \\
 & = \text{Rp. 44.132.240.000,-}
 \end{aligned}$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan metode dan pengujian yang telah dilakukan, maka hasil penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan inspeksi visual ditemukan kegagalan *fishmouth short-term overheating* pada *rear water wall tube material* GB5310 elevasi 37 mdpl area *nose* dan kebocoran berlubang pada elevasi 29.8 dengan nomor pipa 132 karena erosi.
2. Fenomena yang terjadi berdasarkan identifikasi dan analisa permasalahan adalah *short-term overheating* terjadi karena sistem aliran yang buruk akibat kebocoran *tube* pada elevasi 29.8 mdpl yang terpapar *steam sootblower* secara *continue* dengan *temperature* 320 °C dan *pressure* tinggi 1.8 Mpa yang berdampak pada berkurangnya laju fluida *tube* elevasi 37 mdpl. Akibatnya *tube* mengalami pemanasan berlebih (*hot spot*), muncul inisiasi *crack* pada *spherodized carbide*, terjadi perubahan bentuk kekasaran struktur butir, dan kehadiran *magnetite* Fe₃O₄ menyebabkan pengikisan tebal *material* mendukung terjadinya penurunan kekuatan *material*, sehingga *material tube* tidak mampu menahan *pressure* yang diterima dan terjadi retakan membelah batas butir (*transgranular cracking*) pada *elbow* yang mengalami penyerapan panas berlebih.
3. Kebocoran pada *tube* elevasi 29.8 mdpl disebabkan oleh paparan *steam sootblower* IR20 yang mengalami gangguan *rack-in* dan tidak dapat *retrack*. Dengan adanya paparan secara terus menerus *tube* mengalami pengikisan erosi sehingga kebocoran terjadi.
4. Ditemukan fakta pendukung yang cukup meyakinkan dalam investigasi penyebab kebocoran pada elevasi area *sootblower* IR20 yang mengalami gangguan. Dengan demikian patutlah diduga bahwa kedua kebocoran tersebut merupakan dua kejadian yang berkaitan antara *nose* elevasi 37 mdpl dan *tube* area *sootblower* IR20.

5. Hasil dari analisa kegagalan *rear water wall tube boiler* dapat bermanfaat untuk menghindari kejadian berulang sebagai upaya menjaga keandalan Unit Pembangkitan.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian kedepan adalah sebagai berikut:

1. Status kondisi *equipment* pendukung *boiler* dalam hal ini *sootblower* yang berpaparan langsung dengan *tube boiler* harus terus menerus dimonitor dan dipastikan fungsi operasinya dalam keadaan baik dan siap untuk dioperasikan.
2. Kualitas air dan uap pada sistem pembangkitan khususnya *boiler* harus terus menerus dimonitor, diperbaiki, dan dijaga parameter unsur kimianya untuk meningkatkan keandalan *boiler*.
3. Perlu dilakukan kajian terkait perbaikan *grade material water wall tube boiler GB5310 20G* meng-*upgrade* dengan *material* yang memiliki unsur Cr, Mo, dan V yang memiliki *mechanical properties* lebih baik berkaitan dengan *lifetime* peralatan.
4. Perlu dilakukan kajian untuk melakukan *cleaning inside tube boiler* dari *scale* dan *deposit*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Das, S., Mehrotra, S., Sastry, K., & Dey, P. (2006). *Analytical Model for Erosion Behaviour of Impacted Fly-ash Particles on Coal-fired Boiler Components*. National Metallurgical Laboratory.
- [2] Guangdong Power Engineering, Co. (2013). *Boiler Operation Manual Edition 1 PLTU Sumatera Utara 2x220 MW*. Dongfang Electric Co. Ltd.
- [3] Tilley, R., & Worrell, E. (2006). *Boiler Condition Assessment Guideline*. Electric Power Research Institute.
- [4] Port, R., & Herro, H. (1991). *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*. McGraw-Hill, Inc.
- [5] J. Ahmad, J. Purbolaksono, L.C. Beng, A.Z. Rashid, A. Khinani, A.A. Ali. (2009). *Failure investigation on rear water wall tube of boiler. 2325-2332*, Engineering Failure Analysis, Elsevier Science.
- [6] Choi, C. R., & Kim, C. N. (2009). *Numerical Investigation on the Flow, Combustion and NOx Emission Characteristics in a 500 MWe Tangentially Fired Pulverized-coal Boiler*. Fuel 188, Elsevier Science via ScienceDirect.Dewangan.
- [7] K., Kumar, S., & Singh, R. (2017). *Analysis and Optimization of Boiler Tube Failure Due To Erosion Using CFD Package*. International Journal of Innovative Research in Science.
- [8] Hidayat, R. (2015). *Studi Numerik Karakteristik Aliran Gas-Solid dan Pembakaran Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler 315 MWe dengan Variasi Sudut Tilting dan Nilai Kalor Batubara (Studi Kasus PLTU Pacitan Unit 1)*. Thesis Program Magister Bidang Keahlian Rekayasa Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

- [9] Shida, Y., Fujikawa, H. (1985). *Particle Erosion Behaviour of Boiler Tube Materials at Elevated Temperature*. Wear 103 via ScienceDirect
- [10] V. Ramachandran, A.C. Raghuram, R.V. Krishnan, and S.K. Bhaumik. (2005), *Failure Analysis of Engineering Structures Methodology and Case Histories*, ASM International Materials Park.
- [11] Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.matdes.2003.09.020. 2003. *Methodologies for Failure Analysis: A critical Survey. Reduce Future Boiler Tube Failure*. Paulo M.S.T. de Castro, A.A. Fernandes. <http://www.sciencedirect.com>.
- [12] Thielsch Helmut. (1997), *Defect and Failures in Pressure vessel and piping*, Florida Robert E Krieger Publishing Co, Inc.
- [13] Structural Integrity Associates, Inc. (2011), *Experts in The Prevention and Control of Structural and Mechanical Failures*. www.structint.com.
- [14] David N. French. (1993), *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, New York, John Wiley & Sons Inc
- [15] Mbabazi, J. G.; Sheer, T. J.; Shandu, R. (2004). *A Model to Predict Erosion on Mild Steel Surfaces Impacted by Boiler Fly Ash Particles*. Wear 257 via ScienceDirect.
- [16] Surdia, Tata, dan Saito, S. (2005), *Pengetahuan bahan teknik*, Cetakan Keenam. Jakarta: Pradnya Paramita.
- [17] Wahyu, H. (2013). *Computational Analysis of Ash Erosion on Superheater Tubes in Coal Fired Power Plant*. *Indonesian Mining Journal*.
- [18] Wulpi Donald J. (1988), *Understanding How Components Fail*, ohio, Four Printing, American Society For Metals.
- [19] ASM Handbook. (2002), *Mechanical Testing and Evaluation*, ASM International, volume 8.

- [20] Bhowmick, S. (2011). *Ultrasonic Inspection for Wall Thickness Measurement at Thermal Power Stations*. International Journal of Engineering Research and Technology via ResearchGate.
- [21] The Babcock and Wilcox Company (2005). *Steam: Its Generation and Use Edition 41*. The Babcock and Wilcox Company.
- [22] Yun, H., Moon, S.-J., & Oh, Y.-J. (2016). *Development of Wall-Thinning Evaluation Procedure for Nuclear Power Plant Piping - Part 1: Quantification of Thickness Measurement Deviation*. Nuclear Engineering and Technology.
- [23] A.K. Pramanick, G. Das, S.K. Das, M. Ghosh. (2016). *Failure Investigation of Super Heater Tubes of Coal Fired Power Plant*. Engineering Failure Analysis, India.
- [24] F. Dehnavi, A. Eslami, F. Ashrafizadeh (2016). *A Case Study on Failure of Superheater Tubes in an Industrial Power Plant*. Engineering Failure Analysis, Iran.
- [25] J. Purbolaksono, J. Ahmad, L.C. Beng, A.Z. Rashid, A. Khinani, A.A. Ali (2010). *Failure Analysis on a Primary Superheater Tube of a Power Plant*. Engineering Failure Analysis, Malaysia.
- [26] R.K. Hosseini (2018). *Root Cause Failure Analysis of Superheated Steam Tube at a Petrochemical Plant*. Procedia Structural Integrity. Elsevier, Iran.
- [27] S.R. Bamrotwar, V.S. Desphande (2014). *Root Cause Analysis and Economic Implication of Boiler Tube Failures in 210 MW Thermal Power Plant*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, India.
- [28] S.S. Prabu, A. Shoudhary, N. Mittal, S. Gupta, D. Ramkumar, A. Natarajan (2019). *Failure evaluation of SA 210C riffle water wall tubes in 70 MW CFBC boiler*. Engineering Failure Analysis. Elsevier, India.
- [29] D.R.H. Jones (2004). *Creep failures of overheated boiler, superheater and reformer tubes*. Engineering Failure Analysis. Elsevier, England.

- [30] X.L.Z. Chang (2013). *Leakage Failure Analysis in a Power Plant Boiler*. Procedia IERI. Elsevier, China.
- [31] A.K. Pramanick, G. Das, S.K. Das, M. Ghosh (2017). *Failure Investigation of Super Heater Tubes of Coal Fired Power Plant*. Engineering Failure Analysis. Elsevier, India.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis mempunyai nama lengkap Viki Sofyan Hadi, lahir di Kota Serang, Banten, tanggal 31 Maret 1989. Anak ke-1 dari 3 bersaudara dari pasangan Bapak Sobli dan Ibu Roudlatul Jannah. Penulis mengenyam pendidikan sekolah pertama kali di TK Pertiwi Kota Serang, kemudian lanjut ke SDN 5 Kota Serang, lalu meneruskan ke SMPN 2 Kota Serang dan lanjut ke SMAN 3 Kota Serang, penulis lulus pada tahun 2007.

Tahun 2007 sampai dengan April 2012 penulis memilih Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Banten melalui jalur SPMB, Teknik Metalurgi penulis pilih sebagai landasan pacu pertama untuk menggali ilmu sebagai bekal untuk kemajuan karier penulis di masa depan.

Setelah menyelesaikan perkuliahan S1, pada awal tahun 2012 sampai akhir 2013 penulis memulai karier di PT. Radiant Utama Interinsco, Tbk sebagai Inspector dalam program Management Trainee. Pada tahun 2014 penulis berkarier di PT. Hydroraya Adhi Perkasa sebagai Staff Quality Control. Kemudian pada awal tahun 2015 penulis bergabung dengan PT. Tripatra Engineering and Constructor sebagai Welding Inspector pada project Exxon Mobil Cepu, Ltd. Lalu pertengahan tahun 2015 sampai dengan akhir tahun 2016 penulis bergabung ke PT. Krakatau Engineering termasuk dari Krakatau Steel Group, penulis bertugas sebagai QA/QC Engineer pada divisi Energy bergabung dengan tim pengerjaan Pipeline PT. PGN area Jawa Timur. Kemudian pada tahun 2016 bulan Desember penulis memutuskan untuk bergabung dengan PT. Indonesia Power sampai dengan saat ini. Di PT. Indonesia Power PLTU Pangkalan Susu OMU penulis pertama kali mendapatkan tempat prajabatan pada bagian Operator Senior CCR, kemudian ditugaskan sebagai Operator Senior Balance of Plant, lalu pindah tugas ke bidang Pemeliharaan sebagai Teknisi Senior Mekanik, dan mendapatkan kepercayaan untuk pindah ke bidang Engineering dengan penugasan pertama sebagai Ahli Muda Kontrak atau Settlement, kemudian ditugaskan sebagai Ahli Muda Reliability, dan posisi saat ini

penulis menjabat sebagai Ahli Muda Predictive Maintenance di bagian Engineering.

Puji syukur Allah SWT, berbagai sertifikasi profesi yang telah penulis dapatkan antara lain Welding Engineer - UI, International Welding Inspector Personnel - B4T, Radiography Interpreter Level.2 ASNT, Magnetic Particle Testing dan Liquid Penetrant Testing Level.2 ASNT, International Infrared Thermography Level.1, dan Tropical Basic Offshore Safety Induction and Emergency Training.

Pada pertengahan tahun 2020 penulis berkesempatan untuk melanjutkan pendidikan pada jenjang S2 Manajemen Energi Jurusan Teknik Mesin ITS dengan jalur non beasiswa. Pada pertengahan tahun 2022 penulis diberikan kelancaran oleh Allah SWT untuk dapat menyelesaikan pendidikan S2 sebagai bekal penulis dalam berkarier di bidang pekerjaan dimasa mendatang.