



TESIS - TM185400

**ANALISIS METALURGI KEGAGALAN *EVAPORATOR*
TUBE PADA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR***

FARADESIL YULIANI
6007201045

Dosen Pembimbing
Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022

Halaman ini sengaja dikosongkan



TESIS - TM185400

ANALISIS METALURGI KEGAGALAN *EVAPORATOR TUBE* PADA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR*

FARADESIL YULIANI
6007201045

Dosen Pembimbing
Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

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

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FARADESIL YULIANI

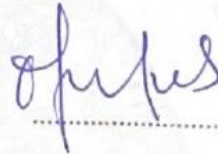
NRP: 6007201045

Tanggal Ujian: 13 Juli 2022

Periode Wisuda: September 2022

Disetujui oleh:

Pembimbing:

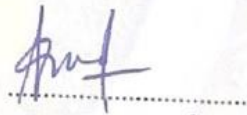


.....

1. Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP: 198005202005011003

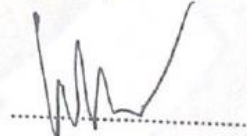
Penguji:

1. Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP: 198512022014042002



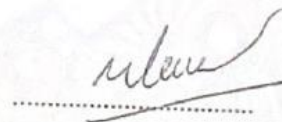
.....

2. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.
NIP: 197407032000031001




.....

3. Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin
NIP: 196308151989032001



.....

Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem



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

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS METALURGI KEGAGALAN *EVAPORATOR TUBE* PADA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR*

Nama Mahasiswa : Faradesil Yuliani
NRP : 6007201045
Dosen Pembimbing : Suwarno, S.T.,M.Sc.,P.hD.

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) merupakan pembangkit listrik gabungan antara siklus tenaga gas dan siklus tenaga uap dengan menggunakan HRSG sebagai penghubung kedua siklus tersebut. Energi listrik pltgu dihasilkan oleh masing-masing generator yang diputar oleh turbin gas dan turbin uap. Pada HRSG terdapat *evaporator tube* yang berfungsi menguapkan air dan menghasilkan uap jenuh, yang nantinya uap jenuh ini akan dipanaskan kembali oleh *superheater* dan akan menghasilkan uap *superheat* yang akan digunakan untuk memutar turbin uap. *Evaporator tube* pada HRSG tersusun dari steam drum (drum bagian atas) hingga ke drum bagian bawah dan akan dilewati oleh *exhaust gas* dari turbin gas PLTGU.

Pada penelitian ini, terjadi kebocoran pada evaporator pada saat proses sedang berjalan. Untuk mengetahui penyebab bocornya pipa tersebut dan mencegah terjadinya kasus yang sama, maka analisis kegagalan terhadap evaporator tersebut perlu dilakukan. Beberapa pengujian seperti uji komposisi kimia untuk mengetahui komposisi unsur, uji kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan suatu spesimen, uji metalografi untuk mengetahui perubahan mikro yang terjadi dan uji SEM untuk melihat morfologi topografi dari sampel yang mengalami kegagalan dan Pengujian EDS dilakukan untuk mengetahui unsur yang terkandung pada sampel serta untuk mengetahui sebaran unsur (*mapping*) pada sampel

Mekanisme kegagalan pada *evaporator tube* dikarenakan *overheating* sehingga mengakibatkan perubahan fasa dari *water-liquid* menjadi *vapor*. *Vapor* ini berbentuk *bubble* yang meletup (*departure from nucleate boiling*) akan pecah dan terangkat. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya proses kavitasi, sehingga tube akan berlubang (*pitting-grooving*). *Grooving* akan menyebabkan luas perpindahan panas akan menjadi lebar. *bubble* ini akan terjebak di dalam *grooving* sehingga *pressure* ini akan menyebabkan pecah tube (*tube leak*). Hal ini juga dipengaruhi oleh penipisan *thickness* dari *tube*. Hasil Analisis pada uji komposisi kimia menunjukkan bahwa material masih sesuai dengan standart ASTM A106 Gr.B, dilakukan pula struktur mikro pada spesimen yang pecah dan bagian fin yang terbakar bahwa spesimen terjadi pertumbuhan batas butir. Pada uji SEM ditunjukkan adanya *micro crack* dan juga *void crack*. Pada sampel *tube evaporator* di indikasi mengalami kegagalan *overheating*

Kata Kunci : PLTGU, HRSG, *evaporator tube*, *overheating*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

METALLURGICAL ANALYSIS ON EVAPORATOR TUBE FAILURE OF HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR

Name : Faradesil Yuliani
NRP : 6007201045
Advisor : Suwarno, S.T.,M.Sc.,P.hD.

ABSTRACT

Gas and Steam Power Plant (PLTGU) is a combined power plant between the gas cycle and the steam power cycle using a Heat Recovery Steam Generator (HRSG) as a link between the two cycles. The power plant's electrical energy is generated by each generator rotated by a gas turbine and a steam turbine. In HRSG, the tube functions to evaporate the air and produce saturated steam, which will be used. This saturated steam will be reused by the superheater and produce superheated steam, which will be used to turn the steam turbine. The evaporator tube on the HRSG is composed of a steam drum (upper drum) to the lower drum and will be passed by exhaust gases from the gas turbine PLTGU.

In this study, there was a leak in the evaporator pipe while the process was running. To find out the cause of the leaking pipe and prevent the same case from happening, it is necessary to do a failure analysis on the evaporator. Several tests such as chemical composition test to determine the elemental composition, hardness test to determine the hardness value of a specimen, metallographic test to determine the micro changes that occur and SEM test to see the topographic morphology of the failed sample and EDS testing is carried out to determine the elements contained in the sample. Sample and find out the distribution of elements (mapping) in the sample.

The failure mechanism in the evaporator tube is overheating, resulting in a phase change from water-liquid to vapor. This vapor is in the form of a bursting bubble (departure from nucleate boiling) which will burst and lift. This will result in a cavitation process, so the tube will be pitted (pitting-grooving). Grooving will cause the heat transfer area to be wide. This bubble will be trapped in the grooving so that this pressure will cause the tube to burst (tube leak). It is also affected by the thinning of the thickness of the tube.

The results of the analysis on the chemical composition test showed that the material was still by the ASTM A106 Gr.B standard, the microstructure was also carried out on the broken specimen, and the burnt part of the fin showed grain boundary growth in the specimen. The SEM test showed the presence of micro cracks and also void cracks. On the sample tube evaporator, it is indicated that it has failed to overheat.

Keywords : PLTGU, HRSG, evaporator tube, overheating.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis kepada Allah SWT atas segala nikmat dan karunia-Nya, sehingga tesis berjudul “**ANALISIS METALURGI KEGAGALAN EVAPORATOR TUBE PADA HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR**” ini dapat selesai sesuai dengan waktu yang telah ditentukan.

Pengerjaan tesis ini menjadi sebuah sarana untuk penulis memperdalam ilmu yang telah didapatkan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, khususnya dalam disiplin ilmu Teknik Mesin. terselesaikannya buku tesis ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan semua pihak. Pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga penulis, Bapak Suharto, Ibu Suwaningsih, dan Loetvy Wahyuningtiyas yang senantiasa memberikan dukungan dan doa.
2. Bapak Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing penulis yang telah meluangkan waktu berharganya demi memberikan ide, bimbingan, dan evaluasi yang sangat besar dampaknya dalam penyelesaian Tesis ini.
3. Ibu Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., Ph.D, bapak Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T dan ibu Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukan, dan arahan untuk menyempurnakan Tesis ini.
4. Seluruh Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS
5. Teman-teman di Laboratorium Metalurgi.
6. Bapak Pranowo, Bapak Rizal Indrawan, Kinari, Ais, Habib, Ulya, Burhan, Mas Naufal dan teman-teman alumni Teknik Desain dan Manufaktur PPNS yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan Tesis ini.
7. Tim Hore-Hore ITS yang telah membantu dalam menyelesaikan Tesis ini
8. Teman-teman pascasarjana Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS Angkatan 2020.
9. Serta semua pihak yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan Tesis ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih memiliki banyak sekali kekurangan namun besar harapan penulis semoga Tesis ini dapat membantu serta memberikan pengetahuan yang berguna bagi para pembaca. Dengan kerendahan hati, penulis

memohon maaf sebesar-besarnya atas kekurangan tersebut dan sangat terbuka akan kritik serta saran.

Surabaya, 13 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
LEMBAR PENGESAHAN TESIS	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
2.1.Kajian Pustaka.....	5
2.2.Dasar Teori.....	16
2.2.1.HRSG	16
2.2.2.Komponen HRSG.....	19
2.2.3.Fin.....	20
2.2.4.Fenomena Creep Temperatur Tinggi.....	21
2.2.5.Korosi Temperatur Tinggi.....	23
2.2.6. <i>Tube</i> Pecah karena Overheating	26
3.1.Diagram Alir Penelitian	31
3.2.Metode Penelitian.....	32
3.3 Tahap indentifikasi Awal	32
3.4.Uji Metalografi (Makro dan Mikro).....	33
3.5.Uji SEM-EDS.....	33
3.6.Uji Kekerasan	33
3.7.Uji Spektrometri.....	34
BAB 4	35

4.1. <i>Fishbone</i> Diagram Analisis	35
4.2. Lokasi Kegagalan	36
4.3. Pengamatan Visual	37
4.4. Uji Komposisi Kimia	40
4.5. Uji Kekerasan	41
4.6. Uji Metalografi	42
4.7. Uji SEM	47
4.8. Uji EDS.....	48
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN.....	59
BIODATA PENULIS	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Unit HRSG (Source: Kaltim Daya Mandiri)	2
Gambar 2. 1. Sampel evaporator <i>tube</i> unit HRSG yang gagal (Gupta dkk, 2019).....	5
Gambar 2. 2. Hasil Struktur Mikro evaporator <i>tube</i> (Gupta dkk, 2019)	6
Gambar 2. 3. Hasil Uji SEM (Gupta dkk, 2019)	7
Gambar 2. 4. Skema dan posisi pompa yang mengalami kegagalan (Shuchao dkk, 2020)	8
Gambar 2. 5. Hasil pengujian SEM (Shuchao dkk, 2020)	9
Gambar 2. 6. Gambar SEM dan EDS dari poros pompa yang gagal. (a–c) gambar SEM; (d–f) EDS titik A, B dan C (Shuchao dkk, 2020).....	9
Gambar 2. 7. Sample <i>tube</i> yang mengalami kegagalan (Pal dkk, 2019).....	10
Gambar 2. 8. Hasil strukturmikro sample-1 (Pal dkk, 2019)	11
Gambar 2. 9. Hasil strukturmikro sample-2 (Pal dkk, 2019)	11
Gambar 2. 10. Diagram proses HRSG (Sumber: Kaltim Daya Mandiri).....	17
Gambar 2. 11. Skema sistem pada PLTGU (Black and Veatch, 1996).....	18
Gambar 2. 12. Horizontal dan Vertical HRSG (V, Ganapathy, 2015)	18
Gambar 2. 13. Penampang Evaporator pada HRSG (rayapolu, 2009)	20
Gambar 2. 14. Susunan pipa triangular (Kern, 1950).....	21
Gambar 2. 15. Helical fins (Kern, 1950)	21
Gambar 2. 16. Kurva Creep.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan. 20
Gambar 2. 19. Hubungan konsentrasi klorida terhadap Weight Loss pada baja; konsentrasi di atas titik kritis meningkatkan Weight Loss secara tajam	24
Gambar 2. 20. Pecah thick lip (Ghosh, 2021)	27
Gambar 2. 21. Kegagalan short term overheating	28
Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian	31
Gambar 3. 2. Posisi kebocoran pada evaporator <i>tube</i>	32

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Spesifikasi HRSG PLTGU	2
Tabel 2. 1. Hasil tensile testing (Gupta dkk, 2019)	5
Tabel 2. 2. Hasil hardness testing (Gupta dkk, 2019).....	6
Tabel 2. 3. Hasil chemical analysis (Shuchao dkk, 2020).....	9
Tabel 2. 4. Hasil dari chemical analysis (Pal dkk, 2019)	12
Tabel 3. 1. Komposisi kimia standart SA/A-106 Gr.B.....	32
Tabel 4. 1. Detail posisi <i>tube</i> yang gagal dan kondisi operasional.....	37
Tabel 4. 2. Diameter Spesimen Penelitian.....	39
Tabel 4. 3. Thickness spesimen penelitian	39
Tabel 4. 4. Thickness potongan melintang	40
Tabel 4. 5. Hasil Uji Komposisi Kimia	41
Tabel 4. 6. Hasil Uji Kekerasan.....	42
Tabel 4. 7. Hasil Uji Mikro.....	45

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri, teknologi dan real estate telah berkembang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Hal ini sangat mempengaruhi pertumbuhan kebutuhan listrik. Dengan mencermati perkembangan tersebut, maka diperlukan peningkatan produksi listrik suatu negara. Produksi ini tidak hanya berfokus pada kapasitas daya yang dapat dihasilkan, tetapi juga pada perkembangan teknologi, terutama dalam rekayasa mesin, sistem operasi dan pemeliharaan pembangkit listrik. Salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan pendirian Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU).

PLTGU merupakan pembangkit siklus gabungan, yang merupakan gabungan antara pembangkit gas dan pembangkit uap. Pada unit PLTGU terdapat alat yang disebut HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*). Keuntungan terbesar menggunakan HRSG dibandingkan dengan boiler umum (menggunakan burner) adalah peningkatan efisiensi, karena HRSG menggunakan gas buang dari turbin gas sebagai sumber panas sehingga tidak memerlukan bahan bakar dan udara untuk pemanasan. HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) adalah perangkat yang menggunakan energi sisa gas buang di turbin gas untuk menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin uap. (A. Santosa & Nugraha, 2018).

HRSG terdiri dari beberapa tahapan yang akan dilalui oleh air dari siklus turbin uap. Air dari *feedback water* akan mengalir menuju tahapan pertama yaitu *preheater*, dimana pada tahapan *preheater* panas dari gas buang sisa pembakaran gas turbin akan menaikkan temperatur air, kemudian air akan menuju economizer, dimana air akan diberi panas lebih agar temperatur air akan mendekati temperatur titik didihnya. Setelah itu air akan memasuki tahap evaporator, pada tahap ini air akan berubah bentuk menjadi uap. Lalu uap tersebut akan diberikan panas untuk menjadi superheated vapor dengan fase uap jenuh.

Tabel 1. 1. Spesifikasi HRSG PLTGU

<i>Type</i>	<i>Single Pressure HRSG</i>
Kapasitas Uap	156 ton/jam
<i>Steam Flow</i>	88.9 ton/hour
<i>Drum Pressure</i>	1220 psig
<i>Superheater Outlet Pressure</i> <i>Temperatur</i>	82 barg 530 °C
<i>Reheater Outlet Pressure</i> <i>Temperatur</i>	80 barg 480 °C



Gambar 1. 1. Unit HRSG (Source: Kaltim Daya Mandiri)

Salah satu komponen HRSG yang mengalami kegagalan terdapat pada bagian *tube* evaporator. Evaporator pada HRSG berfungsi menguapkan air dan menghasilkan uap jenuh, yang nantinya uap jenuh ini akan dipanaskan kembali oleh superheater dan akan menghasilkan uap superheat yang akan digunakan untuk memutar turbin uap. *Tube* evaporator pada HRSG tersusun dari *steam drum* (drum bagian atas) hingga ke drum bagian bawah dan akan dilewati oleh exhaust gas dari turbin gas PLTG. Dalam kasus ini, ditemukan kegagalan pada pipa evaporator yang mengalami dua kali kebocoran. Pada Mei 2021 terjadi kebocoran *tube* pada evaporator *row-8 tube* nomor 25 dan untuk posisi kebocoran *tube* terjadi pada elevasi 2 meter di bawah *roof*. Kebocoran kedua terjadi pada tanggal 27 juni 2021 dimana letak kebocoran *tube* berasal dari evaporator *row-10 tube* nomor 17 dan untuk posisi kebocoran *tube* terjadi pada elevasi 2 meter di bawah *header* atas. Jika hal tersebut diabaikan dapat menyebabkan seluruh sistem HRSG *shut down*. Oleh karena itu perlu diadakan penelitian analisis kegagalan untuk mengetahui penyebab kebocoran sehingga dapat menghindari kasus kegagalan yang serupa.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah yang diperoleh adalah:

1. Bagaimana mekanisme terjadinya kegagalan pada *evaporator tube*?
2. Faktor apa saja yang menyebabkan terjadinya kegagalan pada *evaporator tube*?

1.3 Tujuan Penelitian

Melihat perumusan masalah tersebut, maka tujuan penelitian tersebut adalah untuk menjawab permasalahan yang ada pada penelitian ini, adalah:

1. Menganalisis mekanisme terjadinya kegagalan pada *evaporator tube*.
2. Menganalisis faktor penyebab terjadinya kegagalan pada *evaporator tube*.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama di kemudian hari.
2. Bagi pembaca diharapkan dapat memahami dan mengaplikasikan ilmu yang terdapat pada penelitian ini sebagai alat bantu untuk penelitian lain yang terkait dikemudian hari.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan penelitian ini lebih terarah serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan, maka perlu dibuat pembatasan masalah, antara lain:

1. Desain awal *evaporator tube* pada HRSG telah sesuai standart spesifikasi
2. Kondisi peralatan pengujian dianggap sempurna sehingga menghasilkan data yang akurat

Halaman ini sengaja di kosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Kajian Pustaka

Penelitian tentang analisis kegagalan pada HRSG telah dilakukan beberapa orang. (Gupta, Kujur, Talukdar, Velusshami, Prasad, Bhatia, Sharma, & Bhardwaj, 2019) yang melakukan penelitian ini tentang penyebab kebocoran pada unit HRSG. Pada unit HRSG *gas processing plant* tersebut, terjadi dua kali kebocoran pada *4th row – 12th position evaporator tube*. Pada proses penyebab Analisis terjadinya kebocoran, terjadi dua kebocoran serupa yang telah dilaporkan pada *1st row – 13th position & 2nd row – 4th position evaporator tube*.



Gambar 2. 1. Sampel *evaporator tube* unit HRSG yang gagal (Gupta dkk, 2019)

Pada penelitian ini dilakukan pemeriksaan laboratorium untuk mengetahui penyebab kebocoran antarai lain uji SEM-EDS, uji Tarik, uji kekerasan, uji spektrometri serta uji metalografi. Pada uji tarik sampel *tube* yang gagal dilakukan sesuai ASTM A370. Sifat Tarik dari *tube* yang gagal memenuhi bahan ASTM A210 Grade A-1

Tabel 2. 1. Hasil *tensile testing* (Gupta dkk, 2019)

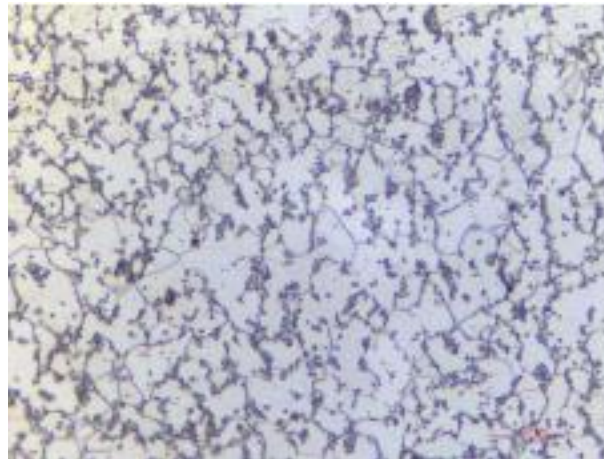
Parameter	Hasil Uji Tarik	Standart ASTM A210 Grade A-1
Tensile Strenght (Mpa)	305.70	255
Yield Strenght (Mpa)	444.65	415
Elongation %	33.76	30

Pengujian kekerasan sampel *tube* yang gagal dilakukan dengan menggunakan alat uji kekerasan *Vickers* pada penampang melintang sesuai ASTM E384. Nilai kekerasan

rata-rata yang diukur pada material *tube* yang gagal tidak sesuai dengan material ASTM A210 Grade A-1

Tabel 2. 2. Hasil *hardness testing* (Gupta dkk, 2019)

Material	Hasil Uji <i>Hardness</i>	Standart ASTM A210 Grade A-1
<i>Tube sampel yang gagal</i>	164 HV (85 HRB)	79 HRB (maksimal)

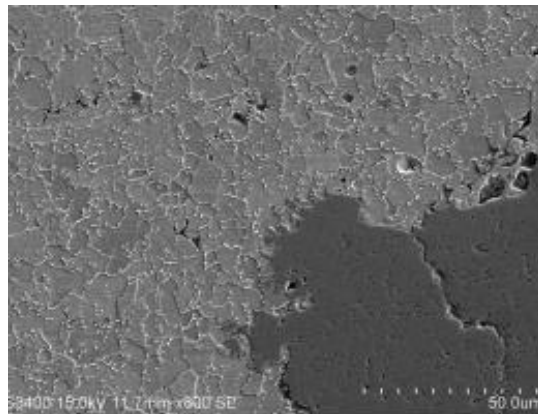


Gambar 2. 2. Hasil Struktur Mikro *evaporator tube* (Gupta dkk, 2019)

Sebagai sampel yang dipoles diamati untuk inklusi tetapi inklusi tidak ditemukan signifikan. Kemudian benda uji etsa dengan Nital 2%. Sampel yang tergores diamati di bawah mikroskop metalurgi pada perbesaran yang berbeda untuk mempelajari struktur mikro. Struktur mikro spesimen yang dibuat dari sampel tabung gagal mengungkapkan *spheroidite*, yang menunjukkan dekomposisi perlit menjadi ferit dan karbida *spheroidal*. Itu karena kontak yang terlalu lama dengan suhu tinggi atau kepanasan.

Analisis SEM mengungkapkan bahwa rongga di sepanjang batas butir dan retakan titik rangkap merupakan tipikal fenomena mulur. Penggabungan celah rangkap dan retakan di sepanjang batas butir dengan adanya suhu tinggi dan tegangan yang diterapkan, menghasilkan retakan antar butir dan pemisahan butir di sisi bagian dalam tabung yang gagal. Seiring waktu, butir-butir lebih banyak dipisahkan dan butir-butir ini tidak mampu mendukung skala oksida besi tepat di atasnya. Karena sifat rapuh dari kerak oksida besi dan dengan tidak adanya dukungan dari butiran, pemecahan/retak lokal dari kerak oksida besi terjadi dengan adanya tekanan internal. Akibatnya, fluida yang mengalir (air dan uap) bersentuhan langsung dengan butiran bahan tabung yang retak dan terpisah antarbutir. Gaya yang disebabkan oleh fluida yang mengalir menghilangkan butiran dari permukaan

internal tabung yang gagal (*flow accelerated corrosion*). Sekali lagi lapisan oksida besi terbentuk di sisi bagian dalam tabung dan mengulangi proses penghilangan material ini sampai pembentukan lubang. Jadi, tabung evaporator gagal karena aksi gabungan dari *creep* dan *flow accelerated corrosion*. Creep bertanggung jawab untuk inisiasi kerusakan (pemisahan butir) dan *flow accelerated corrosion* membantu dalam pemindahan material akhir. *Creep* disebabkan karena terlalu panas dalam jangka pendek atau kontak yang terlalu lama ke suhu tinggi.

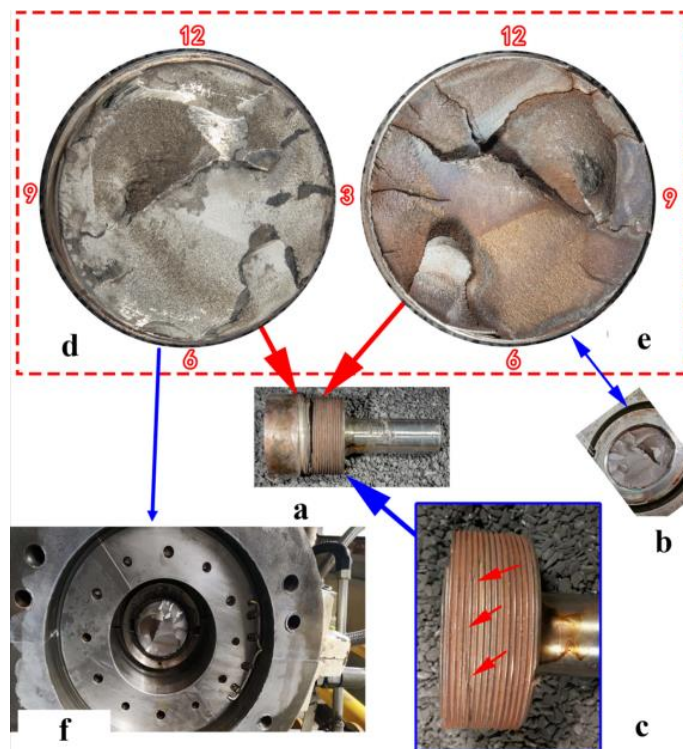


Gambar 2. 3. Hasil Uji SEM (Gupta dkk, 2019)

(Shuchao, Minghua, Guoping, Ruixuan, Yuzhe, & Jun, 2020) telah melakukan penelitian dimana terjadi kegagalan *feed water pump shaft failure* yang digunakan pada HRSG (*heat recovery steam generator*) unit pembangkit turbin gas kelas 9F telah diteliti secara sistematis dalam hal inspeksi visual, fraktografi, komponen kimia, struktur mikro dan analisis sifat mekanik menggunakan mikroskop optik (OM), mikroskop elektron pemindaian (SEM) yang dilengkapi dengan analisis EDX, mikroskop elektron transmisi (TEM), penganalisis unsur dan mesin uji tarik universal, masing-masing. Hasil menunjukkan bahwa kegagalan poros pompa air umpan adalah *fatigue fracture* yang dihasilkan dari tegangan puntir, karena sifat mekanik yang lebih rendah yang disebabkan oleh elemen paduan yang lebih sedikit dan fase penguatan paduan karbida pada batas butir, yang mempercepat nukleasi lubang mikro dan menyebabkan pembentukan retakan mikro di persimpangan lubang mikro. Analisis kegagalan ini dapat membantu mengidentifikasi akar penyebab dan menghilangkannya dengan tindakan korektif yang dilakukan.

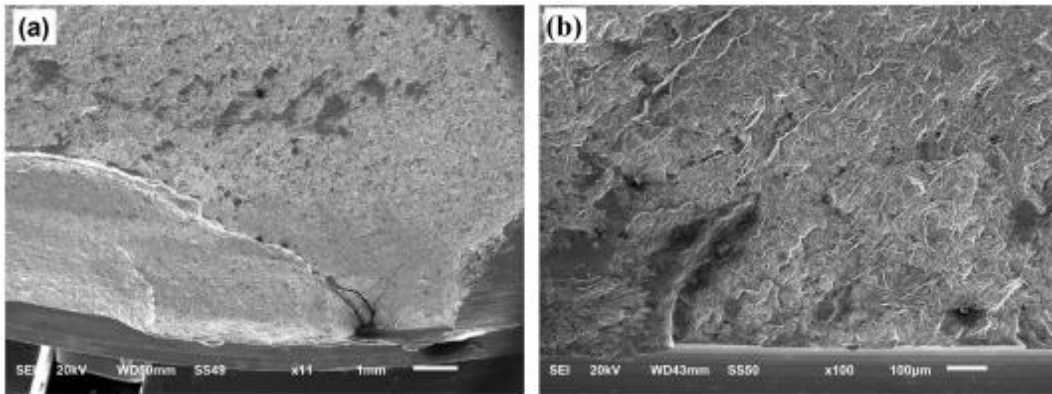
Pada penelitian ini menggunakan beberapa pemeriksaan laboratorium yaitu

inspeksi visual dan melakukan Komposisi kimia bahan diperoleh dengan alat analisis logam SPECTROMAXx arc spark Optical Emission Spectrometry (LMF06). Pemeriksaan metalografi telah dilakukan dengan mikroskop metalografi Axio Oberver.D1m. Permukaan patahan dan struktur mikro dari poros yang gagal dianalisis dengan menggunakan mikroskop elektron pemindaian (SEM)-JFEI Quanta 450, EDX yang berafiliasi, dan mikroskop elektron transmisi (TEM, TECNAI F30). Pengujian tarik menurut GB/T228.1-2010, dan pengukuran kekerasan menurut GB/T231.1-2009 pada suhu kamar masing-masing dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik C45.305 dan pengukur kekerasan Brinell (UH250).



Gambar 2. 4. Skema dan posisi pompa yang mengalami kegagalan (Shuchao dkk, 2020)

SEM digunakan untuk memeriksa permukaan fraktur secara lebih rinci hingga perbesaran 1000x. Pada Analisis visual sebelumnya terlihat bahwa awal retakan berada di akar ulir sekrup dimana terdapat konsentrasi tinggi. Pada pengamatan lebih dekat ditemukan dibagian tepi kecil yang disebabkan oleh penyimpangan local korespondensi inisiasi retak diamati pada jalur perambatan retak. Dan ditemukan sejumlah lubang yang diduga *worm hole* pada permukaan retakan.

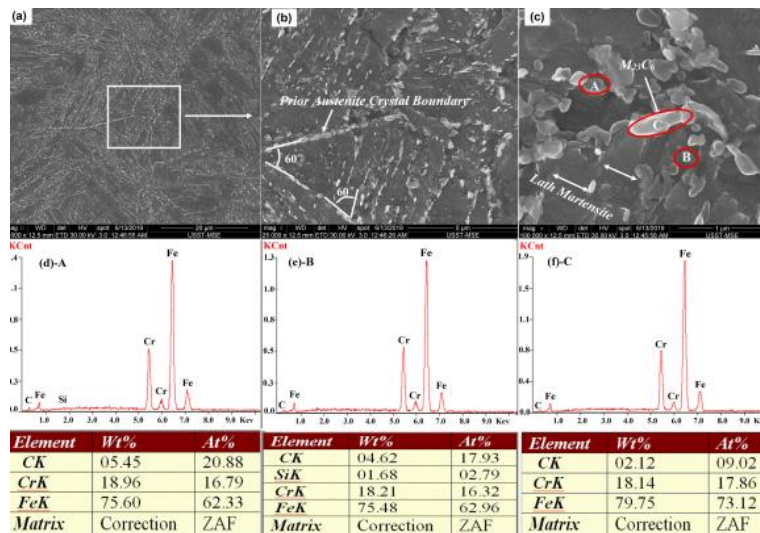


Gambar 2. 5. Hasil pengujian SEM (Shuchao dkk, 2020)

Tabel 2. 3. Hasil *chemical analysis* (Shuchao dkk, 2020)

Material	C	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	Fe
<i>Tube sampel yang gagal</i>	0.190	0.383	0.0203	0.011	12.660	0.373	0.079	0.098	Rem.
ASTM A564-83	≤0.07	≤1.0	≤0.04	≤0.03	15.0-17.0	3.0-5.0	3.0-5.0	0.15-0.45	Rem

Pada Analisis kimia menunjukkan isi unsur diukur pada poros gagal. Ditemukan bahwa analisis kimia spesimen tidak sesuai dengan persyaratan komposisi ASTM A564-83 - kandungan unsur C yang tinggi dan kandungan unsur paduan yang rendah (Cr, Ni, Cu, dan Nb).



Gambar 2. 6. Gambar SEM dan EDS dari poros pompa yang gagal. (a–c) gambar SEM; (d–f) EDS titik A, B dan C (Shuchao dkk, 2020)

Pada pengujian SEM dan EDS konsisten dengan hasil analisis metalografi sebelumnya, struktur mikro terdiri dari karbida kasar yang melimpah dalam butir dan

posisi batas butir austenit sebelumnya. Hasil analisis EDX yang diambil dari karbida kasar menunjukkan bahwa karbida terutama terdiri dari Cr, Fe dan C, dan dalam bentuk Fe-Cr karbida. Di zona mikro lainnya, diamati segregasi struktur mikro dan retakan mikro disertai karbida ukuran besar (sekitar 8 μm) dengan pengayaan Cr, hasil EDS menunjukkan kandungan fraksi massa Cr untuk karbida kasar sekitar 26%, yaitu jelas lebih tinggi dari matriks poros yang gagal (12,6%). Menunjukkan hasil sapuan permukaan elemen (Cr dan C) zona mikro di dekat celah mikro. Terlihat bahwa distribusi Cr pada fase karbida kasar meningkat secara signifikan disertai dengan delesi Cr pada tepi karbida kasar atau posisi batas butir, yang bertepatan dengan hasil yang ditemukan pada uji analitik EDS. Itu akan memiliki efek negatif pada kekuatan material karena penipisan elemen paduan dan konsentrasi tegangan pada batas butir. TEM digunakan untuk menganalisis lebih lanjut struktur mikro dan jenis karbida dari poros yang gagal. Perlu dicatat bahwa sejumlah besar fase presipitasi karbida kasar terdistribusi di sepanjang batas butir martensit dengan bentuk rantai, dan tidak ada fase penguatan paduan lainnya yang termasuk dalam baja tahan karat pengerasan presipitasi martensit 17-4PH. telah ditemukan di BFI dan DFI dari fase diendapkan.

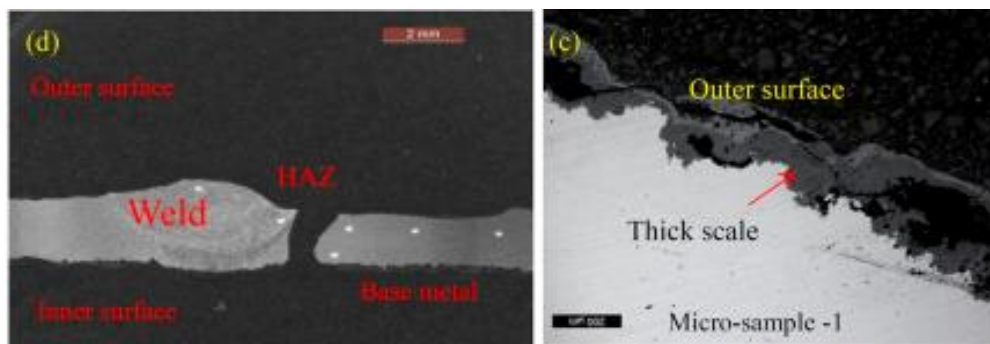
(Pal, Kishore, Mukhopadhyay, Mukhopadhyay, & Bhattacharya, 2020) telah melakukan penelitian pada tabung economizer pembangkit listrik. Kegagalan yang terjadi disebabkan oleh korosi sehingga menyebabkan terjadinya masalah produksi. Pal (2020) memberikan analisis tentang penyebab korosi pada pembangkit listrik, mekanisme dan kemungkinan tindakan untuk pencegahan kegagalan yang terjadi.



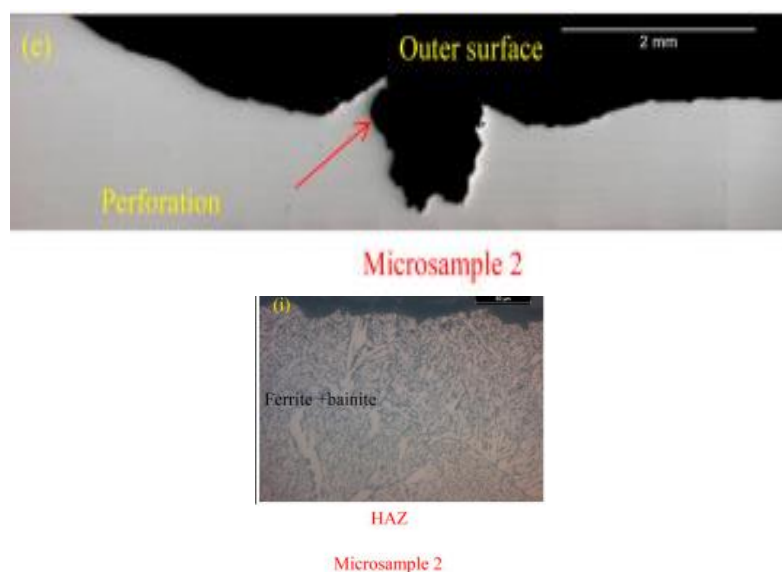
Gambar 2. 7. Sample *tube* yang mengalami kegagalan (Pal dkk, 2019)

Pada penelitian ini menggunakan beberapa pemeriksaan laboratorium diantaranya pengamatan visual, analisis kimia, struktur makro dan struktur mikro, uji EDS, uji

kekerasan. Komponen yang gagal dikumpulkan dari pabrik untuk dilakukan pengujian. Sampel dibersihkan dengan aseton untuk menghilangkan kotoran untuk pemeriksaan visual sebelum persiapan sampel metalografi. Sampel untuk evaluasi mikrostruktur dibuat dari lokasi perforasi sampel yang gagal. Sampel-sampel ini dipasang secara individual dalam pemasangan konduktif dan dipoles dengan teknik metalografi konvensional untuk mendapatkan permukaan yang bebas goresan. Sampel yang dipoles digores dalam larutan Nital 3% (3ml HNO₃ dalam 98ml etil alkohol). Sampel yang tidak tergores dan tergores diperiksa. Uji metalografi dilakukan dengan mikrofotografi stereo dan mikroskop optik. Komposisi diperoleh dengan bantuan Spektroskopi Emisi Optik dengan model no Thermo ARL 4460 dan mikroskop elektron pemindaian yang dilengkapi dengan detektor EDS di ZEISS SUPRA -25.



Gambar 2. 8. Hasil strukturmikro sample-1 (Pal dkk, 2019)



Gambar 2. 9. Hasil strukturmikro sample-2 (Pal dkk, 2019)

Struktur mikro dari sampel 1 yang diamati pada mikroskop stereo menunjukkan permukaan yang menipis dan tidak rata. Permukaan yang tidak rata disebabkan oleh erosi sedangkan penipisan di dekat daerah yang berlubang disebabkan oleh korosi. Struktur mikro terukir dari sampel 2 menunjukkan struktur las dekat zona berlubang tanpa kelainan las. Struktur mikro matriks dasar yang tergores menunjukkan perlit yang hancur. Ini karena periode paparan yang lebih lama pada suhu tinggi. Lokasi HAZ dan las menunjukkan ferit.

Tabel 2. 4. Hasil dari chemical analysis (Pal dkk, 2019)

Material	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo
Tube sampel yang gagal	0.18	0.63	0.008	0.015	0.21	0.13	0.1	0.28
ASTM SA 210 Gr.A1	0.27	0.93	0.035	0.035	0.10	-	-	-

Komposisi kimia sampel yang gagal pada analisis sangat cocok dengan ASTM SA 210 Gr 1 yang digunakan untuk baja kelas boiler. Sesuai standar itu adalah baja pipa.

Tabung *economizer* terbuat dari baja Karbon ASTM A-210 bocor karena perforasi dari antarmuka las (-HAZ) dan perforasi terjadi karena korosi titik embun asam sulfat. Economizer beroperasi pada suhu rendah di bawah 150 °C dan sulfur yang ada dalam gas buang di tabung economizer bereaksi dengan uap air dan membentuk asam sulfat, memberikan kondisi dasar korosi titik embun sulfat. Tabung *economizer* diamati bocor setelah 21 tahun digunakan. Selama pengamatan visual, perforasi terlihat di tabung *economizer* sebagian besar di dekat daerah las di sisi dan juga sampai batas tertentu dimulai dari daerah las. Erosi tanpa perforasi juga diamati pada sisi tabung *economizer*. Hal ini terjadi karena gas yang lewat terus menerus di atas tabung. Studi mikrostruktur menunjukkan penipisan dan skala tebal pada struktur mikro yang tidak tergores dari sampel yang gagal. Struktur mikro yang tergores menunjukkan perforasi di dekat lasan meskipun tidak ada kelainan las yang diamati. Selain itu perlit yang hancur diamati yang menegaskan periode paparan yang lama (21 tahun) pada suhu tinggi. Analisis EDS pada timbangan menunjukkan bahwa kerak adalah oksida besi dengan adanya sulfur dan ini menunjukkan bahwa penipisan terjadi karena korosi.

(Dehnavi, 2017) telah melakukan penelitian pada *tube* superheater sekunder dari unit boiler di pembangkit listrik tenaga uap. Material *tube* yaitu DIN-16CrMo4 yang mengalami kegagalan pecah dan mengembang setelah sekitar tiga tahun beroperasi.

Analisis metalurgi dilakukan dengan melakukan pemeriksaan visual, analisis kimia, uji mikro struktur dan uji kekerasan. Mekanisme kegagalan *tube* yang dipelajari terletak di baris atas superheater, bersentuhan langsung dengan aliran gas buang yang panas dan mengoksidasi sehingga sangat rentan terhadap panas berlebih dan oksidasi. Dari beberapa pengujian yang telah dilakukan degradasi mikrostruktur yang parah terjadi pada permukaan *tube* (yaitu posisi jam 12) dari *tube* superheater. Dan juga *long term overheating* diidentifikasi sebagai penyebab utama kegagalan dari *tube* superheater. Dan penipisan *tube* yang terjadi dikarenakan oksidasi dan hilangnya kekuatan karena degradasi struktur mikro yang merupakan salah satu penyebab pecahnya *tube* superheater

(Sunandrio dkk, 2017) telah melakukan penelitian pada *tube* ASTM A 335 grad P91 yang mengalami kegagalan. *Tube* mengalami kegagalan berupa pecah dengan bentuk *fishmouth* disertai dengan menggelembung. Analisis yang dilakukan berupa elemen hingga yang meniru dengan kondisi lapangan yang sebenarnya. Objek penelitian ini dipilih dari beberapa *tube* coil yang mengalami kegagalan pada *tube* superheater, karena semua tabung mengalami kegagalan yang sama maka hanya satu tabung yang di ambil untuk evaluasi rinci. Selanjutnya fraktografi berdasarkan ASTM E340, metalografi berdasarkan E407 dan Analisis komposisi kimia berdasarkan E751, serta simulasi dilakukan dengan elemen hingga. Dari pengujian yang telah dilakukan bahwa *tube* yang mengalami kegagalan karena *long term overheating* yang disebabkan oleh deposit internal dan eksternal dari amorphous karena oksidasi. Hasil dari analisis elemen hingga juga mendukung diagnosis

(Nugroho, Sulardjaka & Hadid, 2017) Penelitian ini menjelaskan tentang kegagalan sambungan las pipa *venting isolation high pressure superheater* yang sudah beroperasi selama kurang lebih 20 tahun pada temperatur dan tekanan masing-masing 5250C dan 111 bar pada Heat Recovery Steam Generator (HRSG) di sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU). Kegagalan ini mengakibatkan adanya kebocoran pipa pada ruang HRSG yang dapat menimbulkan bencana yang tidak diharapkan. Kegagalan ini berupa keretakan pada sambungan T las (T-joint) antara pipa venting dan pipa header. Penyebab dan mekanisme kegagalan diinvestigasi dalam bentuk pengujian laboratorium yaitu pengujian visual, komposisi kimia, makrografi, kekerasan, dan mikrografi. Hasil pengujian komposisi kimia, kekerasan, dan mikrografi didapatkan bahwa material telah sesuai menggunakan standar ASTM A213 Grade T2 untuk seamless ferritic superheater

tube. Hasil pengujian visual dan makrografi ditemukan adanya deformasi plastis yang terjadi pada base metal pipa dan takik atau notch di ujung kaki las. Penelitian ini menyimpulkan mekanisme kegagalannya adalah deformasi plastis yang terjadi akibat fenomena mulur atau creep dimana pipa menerima beban dan suhu tinggi yang konstan dalam periode waktu yang lama dan dengan adanya takik pada ujung kaki las mengakibatkan konsentrasi tegangan sehingga dapat menimbulkan cacat las yaitu toe crack.

(Aini, Widyawati & Nusyirwan, 2019) Permasalahan pada Pembangkit X adalah terjadinya kegagalan pada pipa boiler. Kegagalan pipa yang terjadi diketahui dengan indikasi kebocoran pada boiler unit 7 berupa kelainan suara berada pada daerah economiser serta dengan kebocoran berada pada area Soot Blower No 7 – 11 area Secondary Superheater (SSH out) dengan make up water sudah mencapai 20-22 Ton/Jam. Pengamatan di lapangan menunjukkan adanya deformasi dan pecah pada pipa SSH Out. Tujuan dilakukan penelitian ini diharapkan dapat mengetahui penyebab utama dari kegagalan pipa boiler dan mekanisme kegagalannya, serta mengetahui solusi untuk mengatasinya agar kegagalan serupa tidak terjadi lagi. Metode pada penelitian ini menggunakan metode *Root Cause Failure Analysis* (RCFA). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kebocoran pipa boiler disebabkan oleh kegagalan pipa berupa long term *overheating*. *Overheating* ini diketahui dengan bukti berupa bentuk pecahan pipa seperti *fish mouth*. Pada pengecekan secara visual serta pengecekan menggunakan boroscope pada permukaan dalam pipa, menunjukkan adanya kerak yang menempel pada permukaan luar dan dalam *tube* boiler SSH unit 7. Pada pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) ditemukan pula kerak hasil proses oksidasi setebal 619 μm . Selain itu, dilakukan pula hasil pemindaian Electron Dispersive Spectroscopy (EDS) (spektrum 9) membuktikan bahwa kerak itu adalah hasil dari proses oksidasi pada temperatur tinggi dengan kadar Fe sebesar 6.2 % berat. Adanya kerak yang melekat pada pipa – pipa mengakibatkan perpindahan panas dari api ke air atau uap di dalam superheater menjadi terganggu. Tidak lancarnya perpindahan panas menyebabkan dinding pipa sangat tinggi temperaturnya dan material melunak sehingga pipa pecah dan bocor.

(Wicaksono & Noer Ilman, 2018) Kebocoran pipa boiler memerlukan waktu yang panjang dan biaya pemeliharaan yang mahal dalam perbaikannya. Unit pembangkit juga harus shutdown dalam perbaikannya. Sehingga kegagalan pada pipa boiler harus dapat

segera diatasi dan dilakukan pencegahan agar jangan sampai terjadi. Untuk itu perlu diketahui penyebab kebocoran pipa boiler. Pengujian yang dilakukan antara lain pengamatan visual, uji tarik, uji komposisi, uji keras dan struktur mikro. Dari penelitian tentang kebocoran pipa waterwall boiler, disimpulkan bahwa pipa waterwall boiler yang bocor disebabkan oleh korosi oksidasi. Pada tahun 2019 diprediksi ketebalan pipa waterwall boiler tinggal 71% dari tebal awal, sehingga perlu segera dipersiapkan untuk retubing.

(Daffa, Ekayuliani & Wijayanti, 2020) Ditemukan adanya kebocoran pada *tube* outlet header LP evaporator HRSG. Kebocoran tersebut terjadi di lokasi pipa masuk ke header sisi keluar dan pada belokan pipa menuju header. Kebocoran pada pipa dapat menyebabkan steam drum tidak mampu memenuhi syarat minimum level air sehingga mengakibatkan sistem proteksi pada HRSG memberikan sinyal untuk trip dan sistem menjadi open cycle yang berdampak pada penurunan daya mampu atau derating. Hal tersebut apabila tidak ditangani maka dapat menyebabkan kerugian, dimana seharusnya gas hasil pembakaran dapat dimanfaatkan secara maksimal. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan metode pemecahan masalah sampai ke akarnya menggunakan Ishikawa Diagram. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui akar penyebab terjadinya kerusakan *tube* outlet header LP evaporator HRSG dan mengetahui solusi untuk mengatasi kebocoran HRSG agar tidak terulang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari kajian 5M yang memiliki faktor paling berpengaruh dalam kaitan terjadinya kebocoran adalah karena faktor material; nilai kriteria fleksibilitas pipa melebihi batas yaitu sebesar 0,04, ketebalan pipa telah mendekati batas minimum yaitu sebesar 2,58 mm; pengoperasian fluktuatif, dan management; waktu pemeliharaan melewati batas equivalent operating hour (EOH). Untuk mengatasi kebocoran yang terjadi pada pipa HRSG dapat dilakukan pengecekan terhadap distribusi aliran gas hasil pembakaran, menjaga kualitas air, mengoperasikan HRSG secara base load dan pemeliharaan sesuai EOH.

(Husen, Setiadi & Alfarizi) Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis Efisiensi thermal Low Pressure dan High Pressure HRSG pada saat Combine Cycle untuk mengetahui nilai Efisiensi thermal pada setiap waktu di tanggal 14 Agustus 2018. Dari hasil analisis di dapat nilai efisiensi thermal yang tidak signifikan di karenakan adanya gangguan-gangguan yang mempengaruhi besarnya efisiensi thermal. Penurunan efisiensi

thermal pada setiap waktu disebabkan oleh penurunan temperatur maupun tekanan yang biasanya terjadi karena adanya kebocoran pada isolator yang ada pada dinding-dinding HRSG sehingga laju perpindahan kalornya menyebar keluar, dan adanya kebocoran-kebocoran pada pipa-pipa economizer, evaporator, maupun superheater. Penurunan efisiensi thermal juga dapat disebabkan karena kinerja dari demper tidak maksimal, yang menyebabkan proses laju aliran kalor terhambat. Untuk mengurangi potensi penurunan Efisiensi thermal pada HRSG perlu meminimalkan kebocoran-kebocoran yang terjadi pada pipa-pipa economizer, evaporator, maupun superheater, dan juga melakukan pengecekan kondisi isolator dinding HRSG, penyumbatan, korosi, serta kondisi diverter demper. Melakukan perbaikan pada komponen - komponen yang berindikasi mempengaruhi penurunan nilai temperatur maupun tekanan.

2.2. Dasar Teori

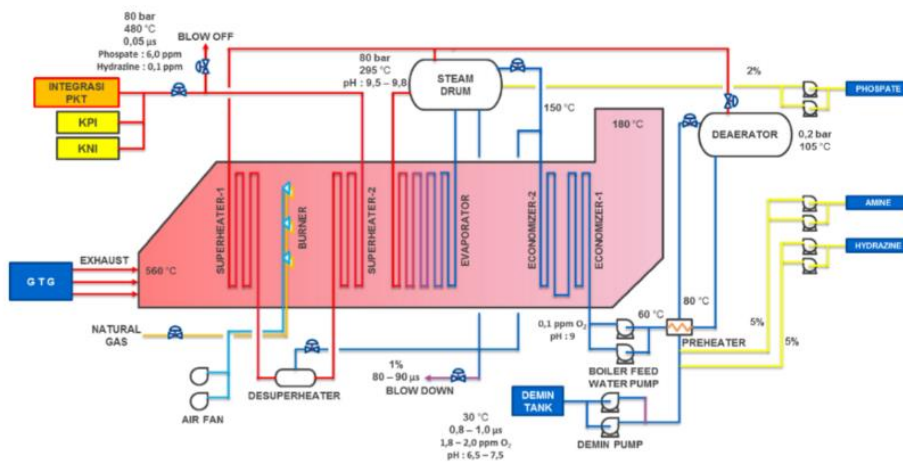
2.2.1. HRSG

HRSG atau *Heat Recovery Steam Generator* merupakan komponen utama dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU). HRSG ini memanfaatkan gas buang turbin gas untuk menghasilkan uap yang akan digunakan sebagai penggerak turbin uap. Komponen – komponen HRSG memiliki prinsip kerja yang sama dengan boiler pada umumnya, namun pada HRSG fluida panas yang digunakan untuk memanaskan air adalah gas buang dari turbin gas yang memiliki temperatur sekitar 450 °C - 630 °C (Rayaprolu, 2009).

Unit HRSG juga membutuhkan supply air umpan yang akan dijadikan steam. Air umpan ini berasal dari Unit Demin. Karena spesifikasi air umpan harus tanpa mineral untuk menghindari terbentuknya kerak-kerak pada pipa steam. Unit HRSG memiliki kapasitas 156 ton/jam steam dengan tekanan steam 80 barg dan temperatur 480 °C sesuai kebutuhan di customer. Unit HRSG merupakan boiler tipe *Water-Tube*, karena air berada dalam pipa tubing dan media pemanas berupa gas panas ataupun api burner berada diluar pipa tubing. Proses produksi steam pada Unit GTG menggunakan bahan baku berupa air demin. Air demin dengan temperatur 25 °C akan dirubah menjadi steam superheated dengan temperatur 480 °C pada tekanan 80 barg. Sehingga secara umum terjadi 3 tahap perubahan jenis

panas, yaitu: 1. Panas Sensible untuk menaikkan temperatur air demin dari 25 °C menjadi 295 °C.

Pada proses ini air demin hanya mengalami kenaikan temperatur. Pada tekanan 80 barg titik didih air pada temperatur 295 °C. Proses pemanasan ini terjadi pada *Preheater*, *Economizer-1*, dan *Economizer-2*. 2. Panas laten untuk merubah fase air pada temperatur 295 °C dari cair ke gas. Pada proses ini hanya terjadi perubahan fase dengan sedikit kenaikan temperatur. Proses pemanasan ini terjadi pada *Evaporator* sehingga terbentuk steam saturated atau bisa disebut steam basah. 3. Panas Sensible untuk menaikkan temperatur steam basah dari temperatur 295°C menjadi steam superheated atau disebut steam kering pada temperatur 480 °C.



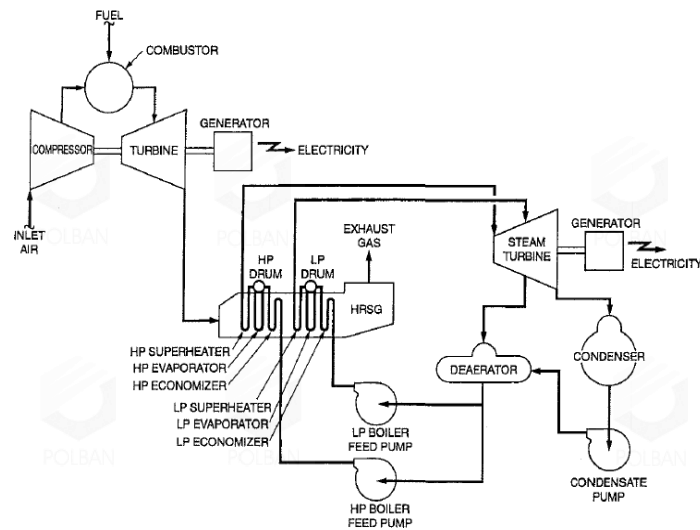
Gambar 2. 10. Diagram proses HRSG (Sumber: Kaltim Daya Mandiri)

Proses ini terjadi pada Superheater-1 dan Superheater-2. Produksi steam Unit HRSG KDM dengan temperatur 480 °C pada tekanan 80 barg dengan konduktivitas 0,06 µs dikontrol dan akan didistribusikan kepada customer melalui sistem integrasi. (Sumber: Kaltim Daya Mandiri).

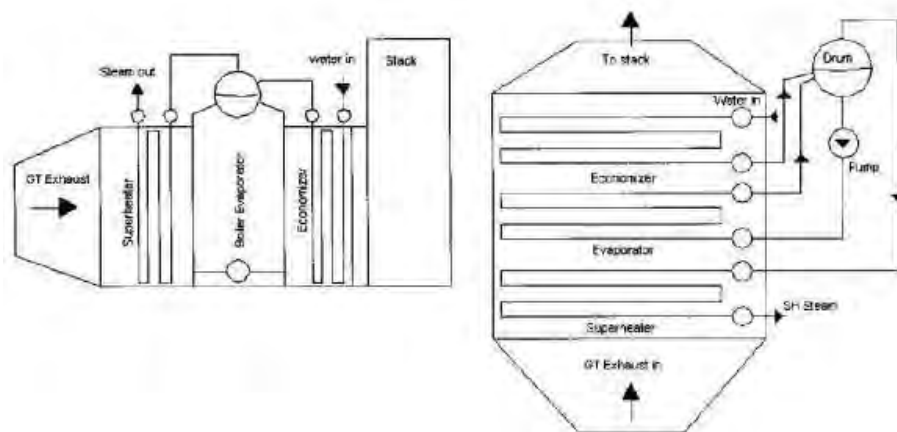
Apabila dilihat dari sumber panasnya, HRSG ini dibagi menjadi dua jenis yaitu HRSG *unfired* dan HRSG *fired* (*auxiliary burner* atau *supplementary burner*). HRSG *unfired* adalah HRSG yang seluruh sumber panasnya diperoleh dari gas buang turbin gas. Sedangkan HRSG *fired* adalah HRSG yang dilengkapi dengan peralatan pembakaran bahan bakar (*burner*) sehingga sumber panasnya

bukan hanya diperoleh dari gas buang turbin gas tetapi diperoleh juga dari hasil pembakaran pada *burner*. Pada umumnya HRSG yang terdapat pada PLTGU merupakan HRSG *unfired* karena HRSG pada PLTGU memiliki tujuan untuk memanfaatkan gas buang dari turbin gas.

Selain itu, ditinjau dari tingkatannya, HRSG terbagi menjadi dua yaitu HRSG horizontal dan HRSG vertikal. HRSG horizontal adalah HRSG yang sirkulasinya terjadi secara natural, sedangkan HRSG vertikal adalah HRSG yang sirkulasinya dipaksa. Dengan kata lain, HRSG vertikal membutuhkan pompa yang dapat menjaga tekanan fluida kerja tetap pada kondisi yang ditentukan dan dapat mensirkulasikan air umpan menuju masukan HRSG yang berada di bagian paling tinggi dari HRSG tersebut



Gambar 2. 11. Skema sistem pada PLTGU (Black and Veatch, 1996)



Gambar 2. 12. Horizontal dan Vertical HRSG (V, Ganapathy, 2015)

2.2.2. Komponen HRSG

Di dalam HRSG terdapat 3 komponen yang memiliki karakteristik dan fungsi yang berbeda, walaupun secara fisik relatif sama yaitu berbentuk pipa - pipa (*tube*). Komponen komponen tersebut adalah ekonomiser, evaporator dan superheater.

2.2.2.1. Economizer

Economizer merupakan elemen pipa - pipa penerima air umpan atau air kondensat yang berasal dari elemen pemanas *feed water heater*. Air umpan atau air kondensat ini masuk ke dalam ekonomiser dengan cara dipompakan oleh *feed water pump* dan kemudian dipanaskan. Temperatur air umpan yang keluar ekonomiser tidak akan sampai ke temperatur saturasinya. Hal ini bertujuan untuk menghindari terjadinya *steaming* dan *water hammering*. Perbedaan temperatur antara keluaran *economizer* dan temperatur saturasi air umpan ini disebut dengan *approach temperatur*. Besarnya *approach temperatur* ini berkisar antara 8 – 14 °C (Rayaprolu, 2009)

Fungsi dari *economizer* adalah untuk memperingan proses penguapan pada evaporator. Air umpan yang masuk ke dalam evaporator sudah pada temperatur yang tinggi sehingga evaporator yang akan menguapkan air umpan hanya membutuhkan sedikit panas untuk proses penguapan tersebut. Dampaknya, panas atau energi yang dibutuhkan untuk proses penguapan menjadi lebih hemat. Selain itu *economizer* juga dapat menjaga evaporator agar tidak mudah rusak karena perbedaan temperatur yang terlalu tinggi anatara fasa cair dan fasa uap.

2.2.2.2. Evaporator

Evaporator pada *HRSG* berfungsi menguapkan air dan menghasilkan uap jenuh, yang nantinya uap jenuh ini akan dipanaskan kembali oleh superheater dan akan menghasilkan uap superheat yang akan digunakan untuk memutar turbin uap. Pipa evaporator pada *HRSG* tersusun dari *steam drum* (*drum* bagian atas) hingga ke drum bagian bawah dan akan dilewati

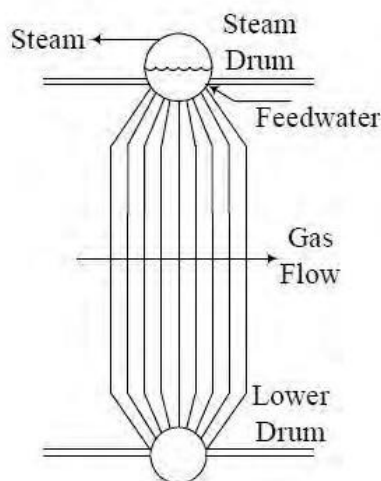
oleh *exhaust gas* dari turbin gas PLTG. Air umpan disuplai dari ekonomiser ke *steam drum* (*drum* bagian atas) dan disirkulasikan dari drum bagian atas ke drum bagian bawah, kemudian dari drum bagian bawah kembali ke drum bagian atas oleh proses konveksi di dalam pipa. Air umpan menguap dan mendidih pada temperatur konstan, yang disebut dengan temperatur saturasi, yang sifatnya berbeda untuk setiap tekanan. Adapun Gambar penampang pipa evaporator seperti di tunjukkan oleh gambar 2.12 di bawah ini.

2.2.2.3. Superheater

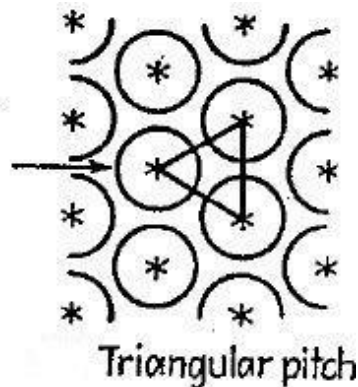
Superheater merupakan suatu komponen yang berfungsi pemanas lanjut yang merubah *saturated vapor* menjadi *superheated vapor*, hal ini agar kondisi uap masuk turbin dalam kondisi kering untuk mencegah pengembunan yang dapat menyebabkan kerusakan pada turbin akibat *water hammer*

2.2.3. Fin

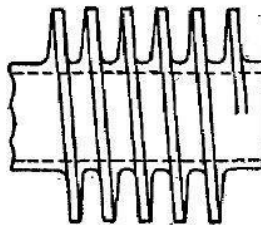
Susunan pipa – pipa pada HRSG baik itu *ekonomiser*, *evaporator* dan *superheater* menggunakan susunan pipa *triangular pitch*. *Triangular pitch* ini sering digunakan karena susunan ini dapat memaksimalkan aliran fluida panas dari gas buang. Susunan pipa *triangular pitch* digunakan untuk turbin gas yang menggunakan bahan bakar *Natural Gas* (Rayaprolu, 2009). Oleh karena itu perancangan pipa – pipa pada HRSG ini menggunakan susunan pipa *triangular pitch* karena gas buang yang masuk HRSG berasal dari natural gas yang merupakan bahan bakar dari PLTGU.



Gambar 2. 13. Penampang Evaporator pada HRSG (rayapolu, 2009)



Gambar 2. 15. Susunan pipa *triangular* (Kern, 1950)



Gambar 2. 14. *Helical fins* (Kern, 1950)

Tipe pipa yang digunakan pada perancangan ini adalah itu *fin tube* (pipa bersirip). Sirip akan memaksimalkan perpindahan panas antara gas buang di sisi luar pipa dan air umpan atau uap di sisi dalam pipa karena sirip yang digunakan pada pipa akan mempengaruhi luas perpindahan panas pada pipa HRSG. Jenis sirip yang digunakan pada perancangan ini adalah sirip jenis *helical fins*. Sirip jenis *helical* ini banyak digunakan untuk pipa – pipa *heat exchanger* pada boiler conventional. Oleh karena itu jenis sirip yang digunakan pada perancangan ini menggunakan sirip jenis *helical fins*.

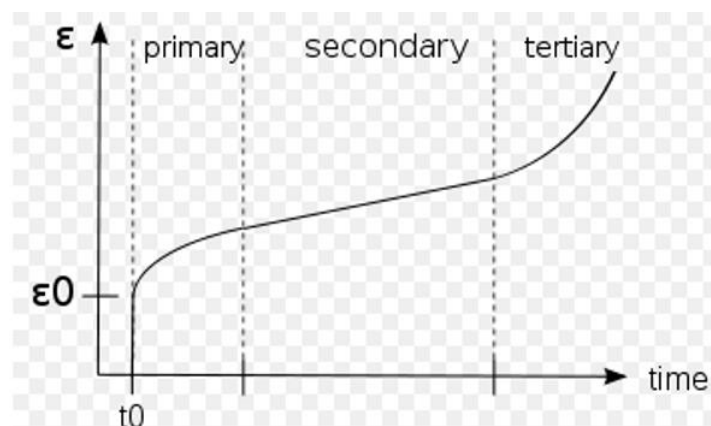
2.2.4. Fenomena Creep Temperatur Tinggi

Salah satu faktor penting dalam menentukan integritas komponen dalam suatu sistem pada aplikasi temperatur tinggi adalah perilaku *creep*. Pada proses termal, suatu material yang mengalami deformasi secara lambat dan kontinu dalam fungsi waktu dengan beban atau tegangan konstan, hingga patah, maka perilaku tersebut dinamakan *creep*. Pengaruh temperatur pada material logam didasarkan pada T_m , yaitu temperatur lebur absolut, dimana ketika diekspos pada rentang $0,3 - 0,6 T_m$ tersebut atau di atasnya, proses *creep* akan terjadi. Sehingga,

material yang dioperasikan dalam jangka waktu yang lama dan mendekati temperatur leburnya cenderung mengalami *creep*.

Akibat deformasi tersebut, suatu material dapat mengalami perubahan bentuk ataupun perpatahan yang tidak diinginkan. *Creep* dapat terjadi pada suatu cacat/retak yang telah ada, dan dengan adanya konsentrasi tegangan mempercepat perambatan retak yang berakhir pada kegagalan.

Perilaku *creep* suatu material dapat diketahui melalui pengujian terhadap suatu spesimen yang diberikan pembebanan atau tegangan konstan yang menghasilkan besaran regangan dalam fungsi waktu. Bentuk kurva yang dihasilkan memiliki karakteristik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16. Kurva *creep* terdiri dari fase-fase yang menunjukkan perilaku material pada kondisi temperatur tinggi, yaitu:



Gambar 2. 16. Kurva deformasi Creep (Callister W.D, 2001)

1. *Primary region/transient creep regions/primary creep*

Tahapan ini terjadi sesaat setelah pembebanan, benda uji mengalami peningkatan regangan plastis dengan menurunnya laju regangan terhadap waktu. Besarnya laju creep akan berkurang pada akhir tahap ini, karena terjadi penyusunan ulang cacat kristal. Terjadinya penyusunan ulang cacat kristal ini merupakan awal dari tahap kedua.

2. *Secondary creep regions/secondary creep/steady state creep*

Tahap ini pada dasarnya adalah kondisi kesetimbangan antara mekanisme *work hardening* dan *recovery*. Benda uji tetap berada di bawah pembebanan dan tetap bertambah Panjang, namun tidak secepat yang terjadi pada tahap pertama. Pada

tahap ini sangat bergantung pada besarnya temperatur dan tingkat pembebanan yang diberikan pada benda uji. Kenaikan regangan (laju *creep/creep rate*) pada tahap ini pun akan konstan.

3. *Tertiary creep regions*

Pada tahap terakhir ini laju kenaikan regangan berjalan dengan cepat sehingga terjadi penambahan panjang pada benda uji secara cepat pula yang akan mengakibatkan perpatahan. Tahap ini merupakan hasil dari perubahan metalurgi dalam logam, yang di maksud adalah pengkasaran partikel endapan, rekristalisasi atau perubahan difusi yang memungkinkan peningkatan deformasi secara cepat. Pada tahap ini terjadi pengurangan luas penampang akibat adanya *necking* yang mengakibatkan bertambahnya tegangan dalam beban yang konstan, sehingga menambah deformasi.

2.2.5. Korosi Temperatur Tinggi

Korosi adalah salah satu faktor yang menjadi penyebab terjadinya penghentian atau *shutdown* suatu operasi dalam suatu fasilitas industri, yang juga dapat terjadi dalam sistem steam turbine. Pemeliharaan terhadap material akibat korosi membutuhkan biaya besar yang dapat menjadi permasalahan utama, dimana kerusakan oleh korosi dapat berakibat pada penggantian komponen yang mempengaruhi keberlangsungan operasi. Pemahaman teori korosi sangat diperlukan untuk mengurangi dampaknya terhadap material. Perolehan data empiris dalam memperhitungkan tingkat korosi dapat mencegah terhentinya operasi. Proses identifikasi dilakukan melalui pemeriksaan terhadap lingkungan yang mempengaruhi korosi.

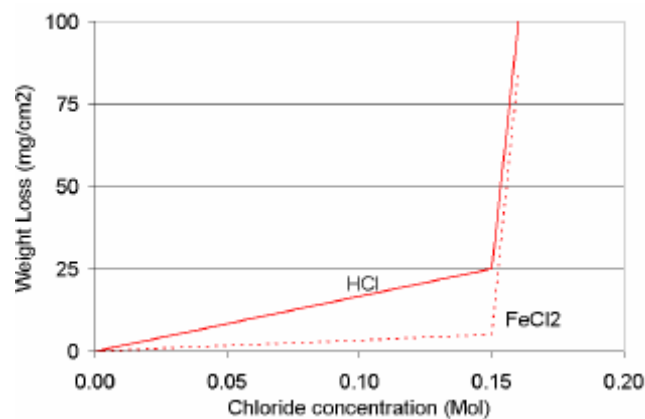
Secara spesifik, Huijbregts dan Leferink mendefinisikan beberapa jenis korosi yang terjadi pada temperatur tinggi berupa:

1. SICC (*Strain Induced Corrosion Cracking*)
2. Korosi akibat kondisi *heat-flux*
3. Korosi Erosi akibat wet steam (uap basah)
4. SCC (*Stress Corrosion Cracking*)

Proses korosi pada SICC dipengaruhi oleh regangan oleh deformasi creep akibat

rendahnya ketahanan material terhadap temperatur tinggi. Perubahan struktur mikro terutama akibat proses creep menjadi penyebab utama jenis korosi ini. Model dalam menjelaskan proses yang terjadi yaitu: anodic dissolution dan hydrogen embrittlement, yang dapat terjadi secara berkesinambungan. Umumnya proses korosi ini terjadi secara lokal pada daerah-daerah tertentu, seperti pit, retakan kecil, atau daerah lasan.

Proses korosi akibat kondisi *heat-flux* dipengaruhi oleh pembentukan deposit karena proses oksidasi (*metal oxide*), dimana air yang melewati lapisan porous oksida tersebut akan terjebak, dan membuat pemanasan lokal (*local boiling*). Proses boiling ini mengakibatkan pembentukan deposit sulfat atau silikat yang menaikkan temperatur permukaan logam. Dengan kehadiran klorida yang bisa berasal dari bocornya kondenser atau lainnya, akan membentuk lapisan korosi akibat reaksi dengan logam. Peningkatan konsentrasi klorida dapat meningkatkan terjadinya weight loss secara signifikan, dimana akan berpengaruh pada terjadinya kegagalan akibat korosi. Gambar 2.17 memperlihatkan hubungan konsentrasi klorida dan pengaruhnya terhadap *weight loss*.



Gambar 2. 17. Hubungan konsentrasi klorida terhadap Weight Loss pada baja; konsentrasi di atas titik kritis meningkatkan Weight Loss secara tajam

Korosi Erosi terjadi akibat kondisi tekanan seperti pada wet steam dimana aliran fluida mengakibatkan weight loss. Ketahanan material menjadi faktor penting dalam mencegah terjadinya korosi erosi ini. Penambahan elemen seperti Cr dapat meningkatkan kemampuan material terhadap proses korosi erosi.

$$\text{Cr-equivalent} = \text{Cr} + 1.4 \text{ Cu} + 0.3 \text{ Mo} - 0.3 \text{ C} > 0.09$$

Huijbregts dan Leferink merumuskan Cr-equivalent dalam komposisi material, untuk ketahanan korosi erosi, dengan perumusan:

SCC adalah korosi intergranular yang terjadi dalam kondisi lingkungan tertentu, seperti nitrat. Definisi serangan korosi pada batas butir dapat dilihat melalui kedalaman penetrasinya, yaitu hingga kedalaman tiga butir. Terjadinya retak akibat korosi yang terjadi pada batas butir tersebut, disebutkan juga oleh Parkins dapat dipengaruhi oleh regangan.

Pada steam boiler, berbagai jenis korosi dapat terjadi akibat pengaruh kondisi operasi dan pemilihan material. Kandungan fluida gas dan kondisi lingkungan lain juga menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan penyebab terjadinya korosi, dan faktor-faktor tersebut disimpulkan dalam beberapa hal yaitu:

1. Kontaminasi klorida dari gas ataupun air, munculnya klorida dapat disebabkan air atau fluida gas yang terkontaminasi, dimana reaksi kimia terjadi terhadap material pada dinding permukaan.
2. Temperatur permukaan, tingginya temperatur permukaan disebabkan oleh radiasi akibat pembentukan deposit metal klorida yang dapat meningkatkan laju korosi.
3. Temperatur gas, perbedaan temperatur gas dan permukaan logam dapat menyebabkan terjadinya kondensasi dan kontamina seperti metal klorida yang mengendap di dinding *tube*. Semakin besar temperatur maka laju pengendapan semakin tinggi, dan konsentrasi klorida meningkat sementara titik lebur deposit menurun.
4. Fluktuasi temperatur, komposisi bahan bakar sisa yang tidak homogen dan tidak meratanya profil temperatur gas pembakaran dapat menyebabkan fluktuasi temperatur, dimana meningkatkan laju korosi.
5. *Scaling deposition*, semakin tebal deposit, laju korosi semakin tinggi. Dengan hadirnya gas korosif, mempengaruhi karakteristik sifat mekanis dari deposit seperti permeabilitasnya.

2.2.6. Tube Pecah karena Overheating

Apabila air dipanaskan di dalam *tube* dengan *flux* panas yang aliran panasnya merata 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.

Pada unit pembangkit uap telah direncanakan agar keseimbangan (*balance*) panas yang masuk dari hasil pembakaran dengan uap evaporator. Di dalam dapur temperatur gas panas cukup tinggi, panas tersebut diserap oleh dinding dapur dan uap di dalam *tube* evaporator sehingga temperatur turun. Untuk menjaga panas dan meningkatkan *overall thermal efficiency* air dan *feed water* dipanaskan dulu di ekonomiser.

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. 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*.

2.2.6.1. Thick lip rupture

Pecah *thick lip rupture* ditandai dengan permukaan pecahnya yang tebal, sedikit liat dan terjadi *swelling* atau menggelembung. Pecahnya yang normal terjadi dibagian yang sejajar dengan sumbu *axis* atau pada sisi longitudinal, dikenal dengan pecah *fishmouth* seperti ditunjukkan pada

gambar 2.18. Struktur mikro permukaan pecah menunjukkan creep, kavitas, pemisahan batas butir dan terjadinya retak intergranular pada bagian *inside* dan *outside* diameter atau *oxide* penetrasi pada batas butir.



Gambar 2. 18. Pecah *thick lip* (Ghosh, 2021)

Pecah *thick lip* disebabkan oleh *overheating* dalam waktu lama (*long term overheating*) pada temperatur diatas temperatur aman dari material *tube*. Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya peningkatan temperatur melebihi kondisi *design (overheating)* adalah:

1. Terjadinya bloking pada laluan gas panas
2. Terjadinya *flux* panas di *tube* 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* dibagian sisi uap dan akan meningkatkan temperatur material.

3. Faktor dalam kerak (*faktor internal scale*)

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

4. 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 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*).

5. Faktor *burner adjustment*

Ketidak sempurnaan bahan bakar gas atau *oxygen* yang di distribusikan tidak sesuai dengan *burner*, pengaruhnya akan meningkatkan *flux* panas.

6. Faktor aliran uap yang tidak sempurna

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

2.2.6.2. Thin lip rupture

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

Pada gambar 2.19 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* makan pembengkokan lateral semakin besar.



Gambar 2. 19. Kegagalan *short term overheating*

Pecah *thin lip* dapat tunjukkan dengan penipisan dinding *tube* yang disebabkan oleh tegangan luluh (*yield*) di daerah pecah, kadang-kadang permukaan pecahnya menjadi tajam seperti gambar 2.19, penipisan juga terjadi didaerah *swilling* dekat daerah pecah. Faktor penyebab *short term overheating* dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Terjadinya bloking didalam *tube* karena terkumpulnya kondensat pada laluan uap
2. Terjadi bocor halus pada *tube*

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

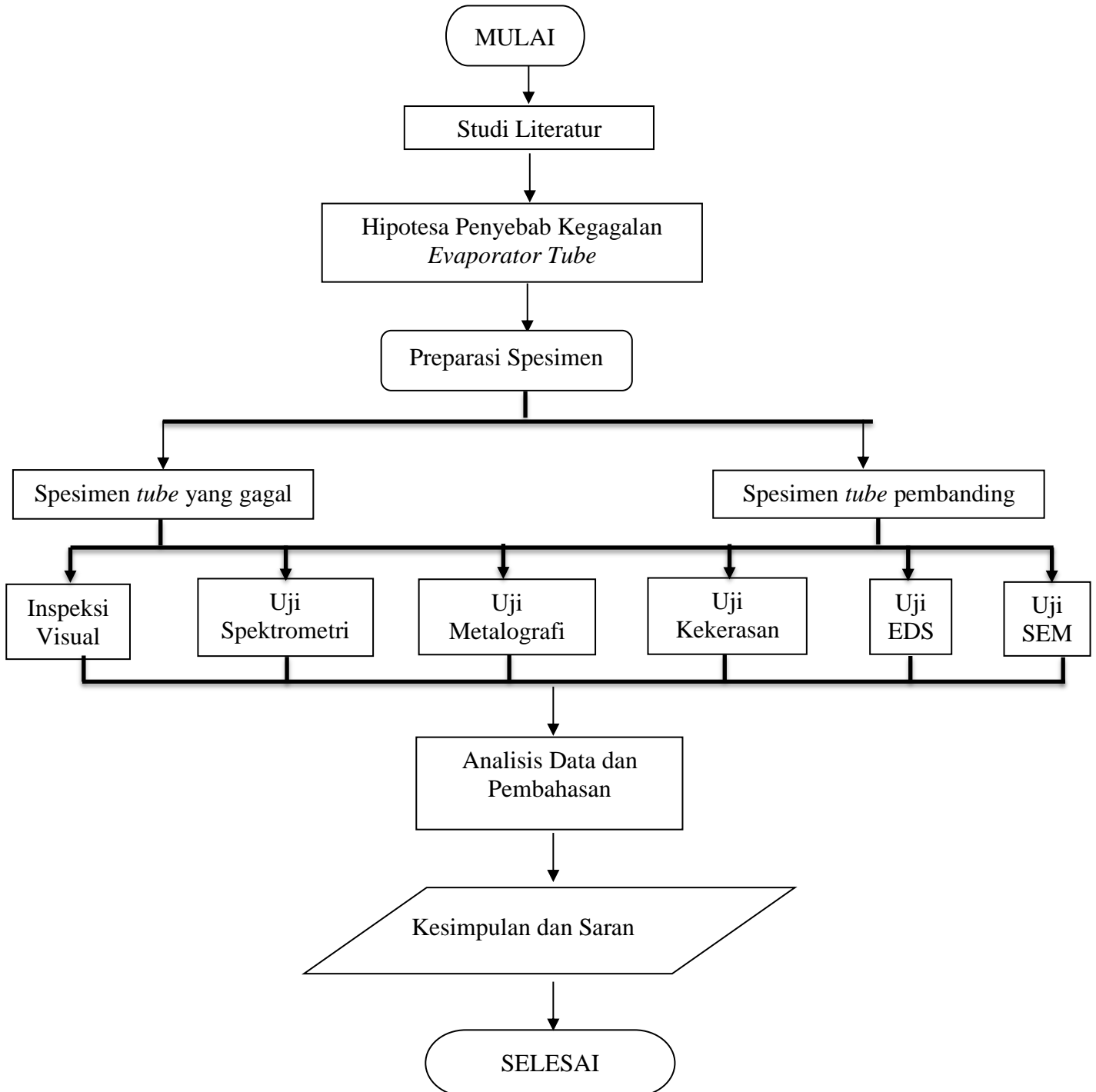
Penipisan dinding *tube* adalah salah satu karakteristik dari kegagalan *short term overheating*, namun tidak selali kegagalan tersebut mengakibatkan penipisan dinding.

Halaman ini sengaja di kosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian

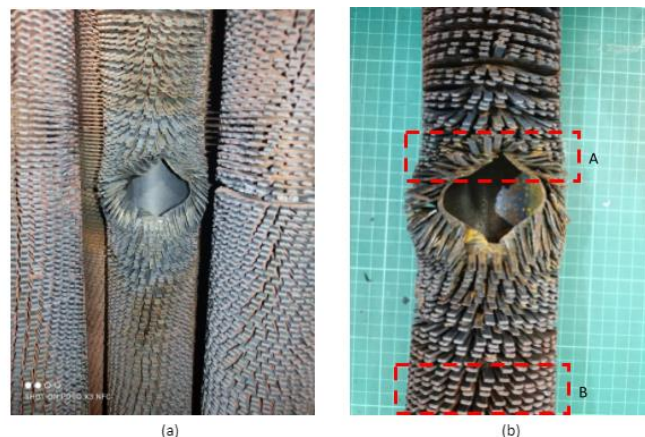
3.2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini di antaranya adalah studi literatur, hipotesa kegagalan pada evaporator *tube* dan pengujian. Berikut adalah penjelasan masing – masing metode:

1. Studi literatur Metode ini mencakup pengumpulan materi yang diperoleh dari buku – buku, jurnal – jurnal penelitian, dan referensi industri mengenai analisis kegagalan pada *evaporator tube*.
2. Membuat hipotesa kegagalan pada *evaporator tube* mencakup mencari penyebab dan faktor apa saja yang menyebabkan terjadinya kegagalan serta menjelaskan mekanisme terjadinya kegagalan pada *evaporator tube*.
3. Pengujian Metode ini mencakup pengujian – pengujian yang dilakukan di laboratorium untuk mendukung proses analisis sesuai dengan metode yang ada. Pengujian – pengujian tersebut diantaranya adalah pengujian kekerasan dan pengujian tarik pada spesimen pembanding serta pengujian metalografi dan pengujian SEM-EDS pada *spesimen tube* yang gagal dan spesimen *tube* pembanding.

3.3 Tahap indentifikasi Awal

Dalam memperoleh data yang representative, dilakukan metodologi pengambilan sampel pada material yang mengalami failure dan membandingkannya dengan bagian yang tidak mengalami failure (utuh) pada komponen *evaporator tube*. Pengujian dilakukan dalam Laboratorium di Departemen Teknik Mesin ITS dan Laboratorium Kimia PPNS sesuai dengan standart.



Gambar 3.2. (a) Posisi kebocoran pada evaporator tube, (b)potongan sisi A (spesimen tube yang gagal), potongan sisi B (spesimen tube pembanding)

3.4. Uji Metalografi (Makro dan Mikro)

Metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang ada pada sampel. Spesimen dipotong menggunakan jigsaw dengan kecepatan rendah dan pendingin untuk mencegah perubahan struktur. Permukaan spesimen kemudian diratakan dan dihaluskan hingga grid 2000, sebelum kemudian dipoles. Spesimen kemudian di etsa menggunakan nital.

Pengujian ini dilakukan dengan melakukan pengamatan pada struktur mikro spesimen dan dengan menggunakan alat bantu mikroskop optik yang selanjutnya dilakukan analisis fasa, bentuk serta ukuran butir struktur mikronya. Hal ini digunakan untuk mengetahui proses manufaktur yang terjadi pada material tersebut. Pengamatan metalografi dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus BX51M-RF yang berada di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

3.5. Uji SEM-EDS

Selain uji metalografi nantinya juga akan dilakukan uji SEM yang bertujuan untuk melihat morfologi topografi dari sampel yang mengalami kegagalan. Pengujian SEM dilakukan pada Laboratorium SEM, Departemen Teknik Mesin ITS menggunakan alat HITACHI FLEXSEM 100. Pengujian EDS dilakukan untuk mengetahui unsur yang terkandung pada sampel serta untuk mengetahui sebaran unsur (mapping) pada sampel. Hasil dari pengujian EDS ini berupa gambar profil elemen secara kuantitatif yang terkandung dalam material sampel.

3.6. Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen. Pengujian ini dilakukan baik pada spesimen yang gagal maupun pada spesimen pembanding yang selanjutnya akan dibandingkan hasil yang didapatkan pada kedua spesimen tersebut. Untuk pengujian kekerasan yang dilakukan menggunakan metode Vickers sehingga nilai kekerasan nanti yang didapatkan digunakan untuk mendeskripsikan sifat mekanik.

3.7. Uji Spektrometri

Pengujian dilakukan dengan menggunakan metode *Optical Emission Spectroscopy* (OES) tipe *Foundry Master Smart* untuk mengetahui komposisi kimia sampel.

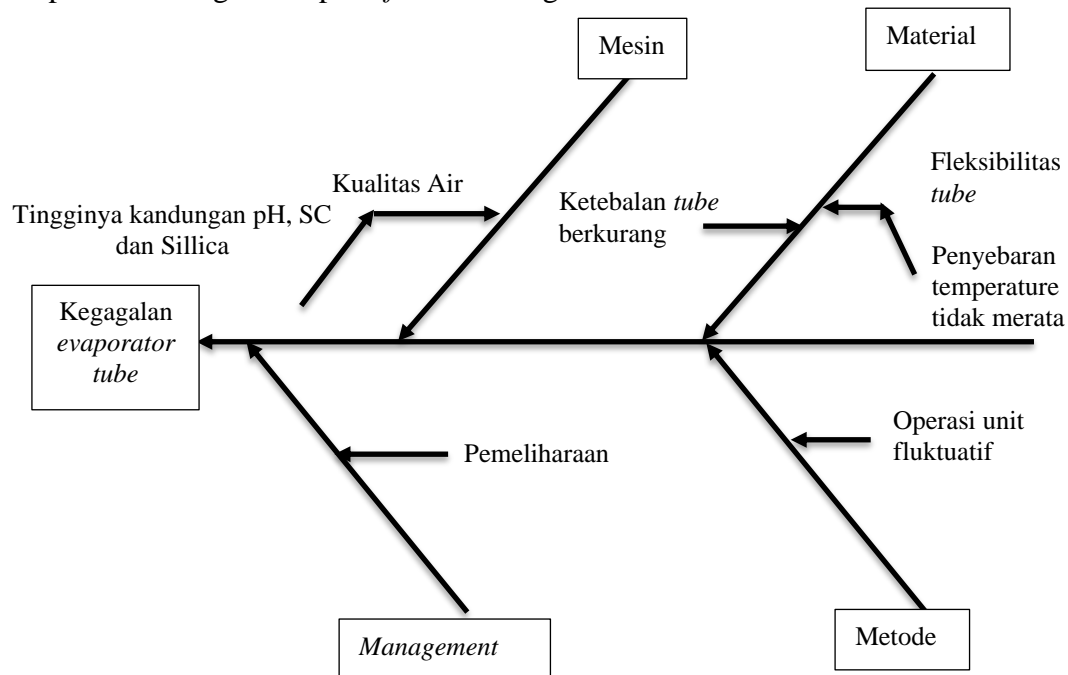
Komposisi	C (max)	Mn	P (Max)	S (Max)	Si (Max)	Cr (Max)	Cu (Max)	Mo (Max)	Ni (Max)	V (max)
ASTM A106 Gr.B	0.3	0.29- 1.06	0.035	0.035	0.10	0.40	0.40	0.15	0.40	0.08

BAB 4

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

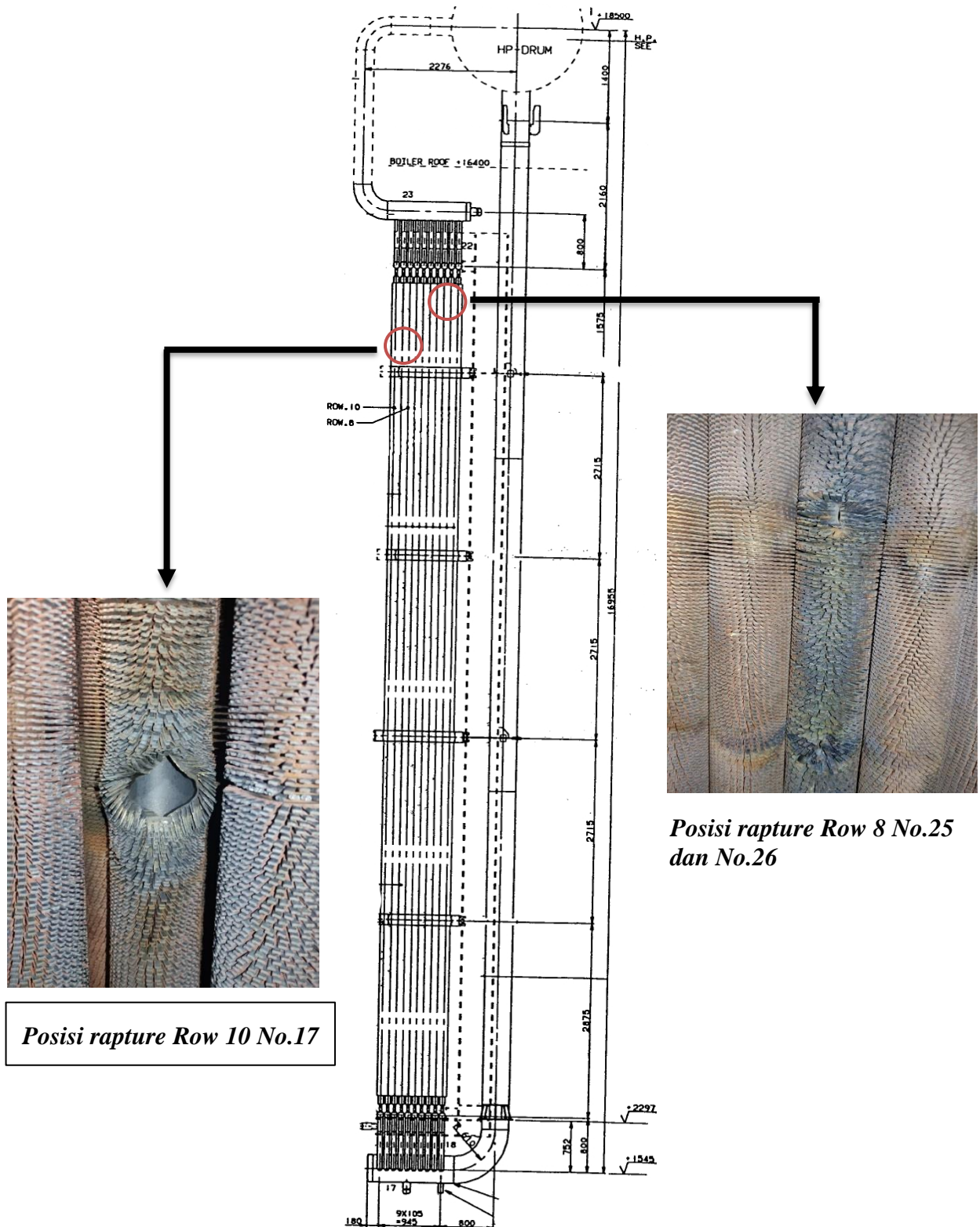
4.1. Fishbone Diagram Analisis

Kegagalan suatu sistem di definisikan 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. Meskipun faktor-faktor penyebab kegagalan ini tidak distandarisasikan, namun pada umumnya faktor-faktor penyebab kegagalan suatu komponen dikategorikan pada *fishbone* diagram dibawah ini.



Gambar 4. 1. Fishbone Diagram Kegagalan Evaporator Tube

4.2. Lokasi Kegagalan



Gambar 4. 2. Lokasi kegagalan *Evaporator Tube*

Tabel 4. 1. Detail posisi *tube* yang gagal dan kondisi operasional

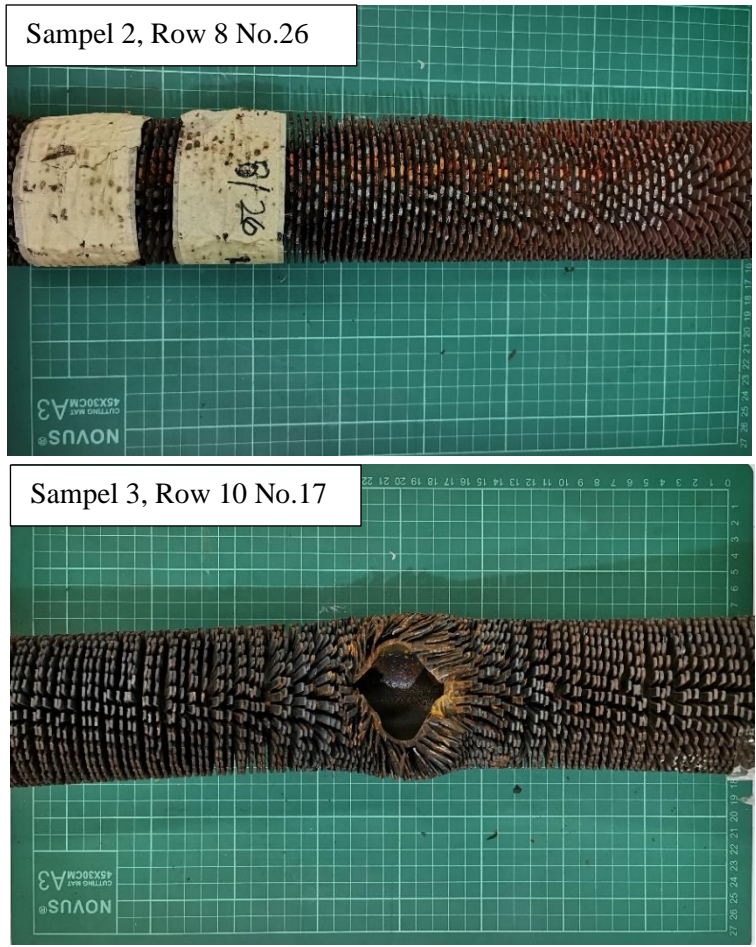
Parameter	Detail
Lokasi kegagalan <i>tube</i>	Row 8 No. 25 terjadi pada elevasi 2 meter dibawah roof Row 8 No.26 terjadi pada elevasi 2 meter dibawah roof Row 10 No. 27 terjadi pada elevasi 2 meter dibawah header atas
Spesifikasi Material Kegagalan <i>tube</i>	SA/A-106 Grade B
Kondisi Operasi	<i>Steam Flow</i> : 88.9 ton/hour <i>Dream Pressure</i> : 1220 psig <i>Superheater Outlet Pressure/Temperatur</i> : 82 barg/530°C <i>Reheater Outlet Pressure/Temperatur</i> : 80 barg/480°C

Pengamatan yang dilakukan secara visual kegagalan *tube* menunjukkan bahwa *tube* mengalami pemanasan yang berlebih (*overheating*). Ini ditandai dengan terjadinya *rapture* yang mengembung “*bulging*” dan berbentuk “*fishmouth effect*” yang dapat dilihat pada gambar 4.3

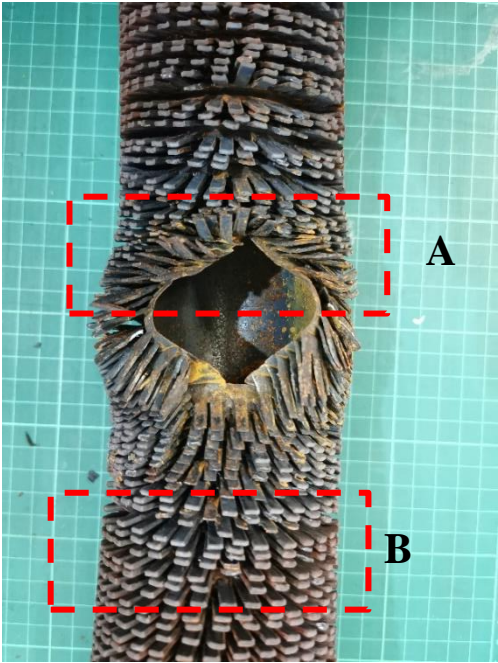
4.3. Pengamatan Visual

Pada gambar 4.2 menunjukkan tampilan *tube* saat masih di dalam sistem. Gambar 4.3 merupakan sampel tiap *tube* yang mengalami kegagalan. Sampel kemudian di potong untuk dilakukan analisis berdasarkan bagian yang telah ditandai seperti pada gambar 4.4. Untuk spesimen A dan B masing-masing diukur ketebalannya untuk memahami fenomena yang terjadi. Hasil pengukuran ditunjukkan pada tabel 4.1. Bagian *tube* yang dari gambar 4.4 yang jauh dari kegagalan juga dibelah untuk diamati seperti gambar 4.5 dan hasil pengukuran ditunjukkan pada tabel 4.2.





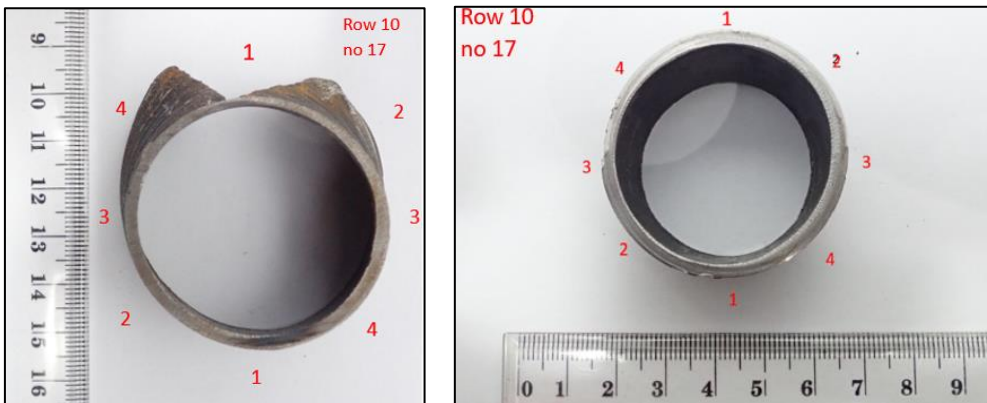
Gambar 4. 3. Sampel *Evaporator Tube*



Gambar 4. 4. Potongan A untuk spesimen tube yang mengalami kegagalan dan potongan B untuk tube pembeding

Tabel 4. 2. Diameter Spesimen Penelitian

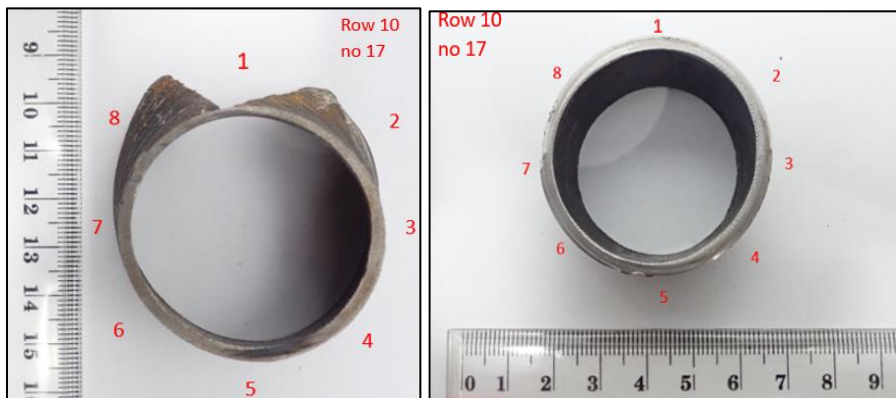
Titik	Diameter spesimen pecah		Diameter spesimen tidak pecah	
	Inner d (mm)	Outer (mm)	Inner d (mm)	Outer (mm)
1	40.80	45.86	35.15	40.11
2	41.52	46.48	35.53	40.47
3	40.49	45.31	36.04	40.68
4	40.04	44.19	35.64	40.25
5	41.27	45.77	35.20	40.05



Gambar 4. 5. Spesimen penelitian

Tabel 4. 3. Thickness spesimen penelitian

Titik	Thickness spesimen pecah	Thickness spesimen tidak pecah
1	2.33	2.53
2	2.36	2.33
3	2.50	2.11
4	2.43	2.16
5	2.15	2.31
6	1.48	2.53
7	1.40	2.56
8	2.16	2.55




Gambar 4. 6. Spesimen Penelitian

Tabel 4. 4. *Thickness* potongan melintang

<i>Thickness</i>				
Titik	Potongan 1		Potongan 2	
	Sisi 1	Sisi 2	Sisi 1	Sisi 2
1	2.61	2.49	2.52	2.41
2	2.48	2.43	2.49	2.46
3	2.61	2.42	2.44	2.36
4	2.60	2.30	2.51	2.30
5	2.53	2.16	2.56	2.29

Lokasi



Hasil pengukuran *thickness* pada spesimen yang mengalami kegagalan dan spesimen pembanding menunjukkan bahwa ada sedikit penipisan ketebalan. Dan untuk pengukuran pada spesimen yang dipotong secara melintang yang diambil dari daerah yang jauh dari kegagalan tidak mengalami penipisan.

4.4. Uji Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan pada tiga sample *evaporator tube*. Pengujian komposisi kimia dilakukan sebagai langkah konfirmasi penggunaan material ASTM A106 Grade B pada aplikasi *evaporator tube*. Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa material *tube* yang mengalami kegagalan merupakan jenis baja Cr-Mo yang umum dipakai pada aplikasi temperatur tinggi. Jenis material tersebut sesuai dengan komposisi kimianya masuk dalam spesifikasi ASTM A106 Grade B.

Tabel 4. 5. Hasil Uji Komposisi Kimia

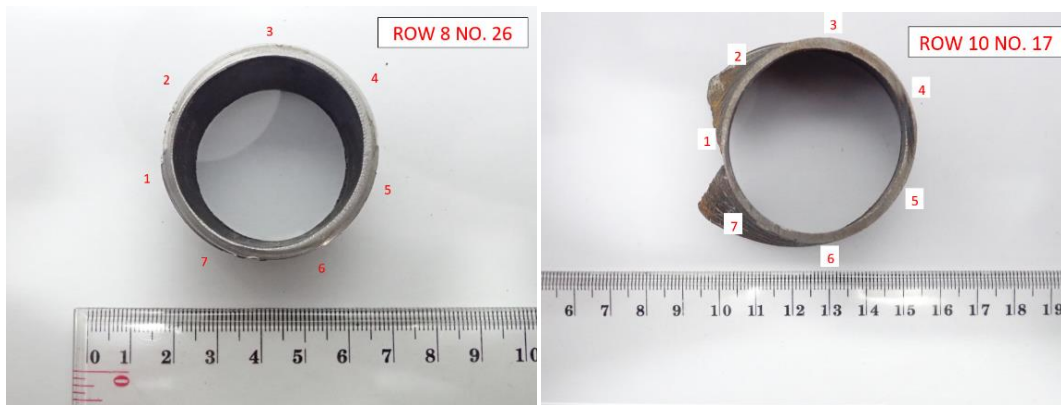
Komposisi	Hasil (wt %)			Standartd ASTM A-106 Gr.B
	Row 8 No.	Row 8 No.	Row 10 No.	
	25	26	17	
C	0.0821	0.0794	0.118	0.30 max
Si	0.285	0.272	0.219	0.1 min
Mn	0.595	0.593	0.553	0.29 – 1.06 max
P	<0.0030	<0.0030	<0.0030	0.035 max

4.5. Uji Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan dilakukan pada 7 titik daerah pengujian seperti pada gambar 4.7.

Tabel 4. 6. Hasil Uji Kekerasan

No	Spesimen	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Titik 6	Titik 7
1	Row 8 No. 26	147	149	135	134	133	131	139
2	Row 10 No. 17	291	288	179	176	171	172	286



Gambar 4. 7. Lokasi titik pengujian



Gambar 4. 8. Lokasi titik pengujian

Hasil uji kekerasan suatu material jika nilai kekerasan itu tinggi akan mengakibatkan material tersebut bersifat *brittle*. Pada hasil uji kekerasan didapatkan nilai kekerasan tertinggi di material Row 10 No.17 pada yaitu sebesar 291 HV. Pada bagian kekerasan yang memiliki nilai kekerasan tertinggi mengalami kegagalan. Kekerasan meningkat diindikasikan oleh jumlah komposisi karbon pada material Row 10 No. 17 yang tinggi. Hal tersebut didukung dengan hasil uji komposisi kimia yaitu sebesar 0.118, nilai karbon di material Row 10 No. 17 lebih tinggi dibandingkan dengan material yang lain. Jadi semakin tinggi kekerasan kandungan karbon juga semakin meningkat.

4.6. Uji Metalografi

Pengujian dilakukan pada potongan melintang untuk tiap jenis *tube* dan bagian yang dekat dengan lokasi kegagalan. Pada tabel 4.7 dilampirkan hasil pengujian pada Row 8 No. 26 terlihat untuk keseluruhan sample, struktur mikro terdiri dari *ferrite* dan *pearlite* yang mana dilihat dari struktur mikronya jumlah ferrite lebih banyak daripada pearlite, bisa disimpulkan bahwa tidak ada degradasi (penurunan/perubahan signifikan) struktur mikro. Hasil dari struktur mikro di ujung patahan menunjukkan bahwa struktur mikro mengalami degradasi pearlite yaitu *elongation grains* karena deformasi. Pemeriksaan struktur mikro yang jauh dari kegagalan terdiri dari ferrite dan pearlite,

namun ada pertumbuhan batas butir terlihat pada perbesaran 1000x yang ditunjukkan pada gambar 4.12. Pada *evaporator tube* terdapat fin, ditemukan fin yang terbakar dan yang tidak terbakar kemudian diambil sampel untuk dilakukan uji metalografi. Hasil uji metalografi pada fin untuk yang dekat dengan area terbakar mengalami pertumbuhan batas butir dibandingkan dengan area yang tidak terbakar ditunjukkan pada gambar 3.4



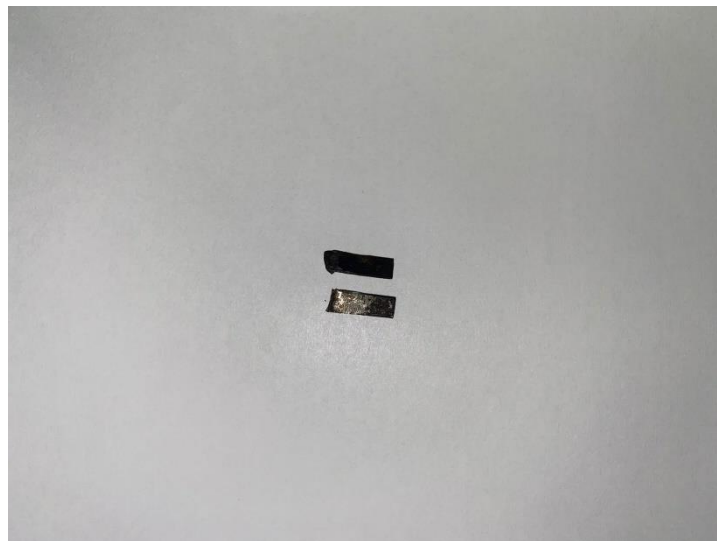
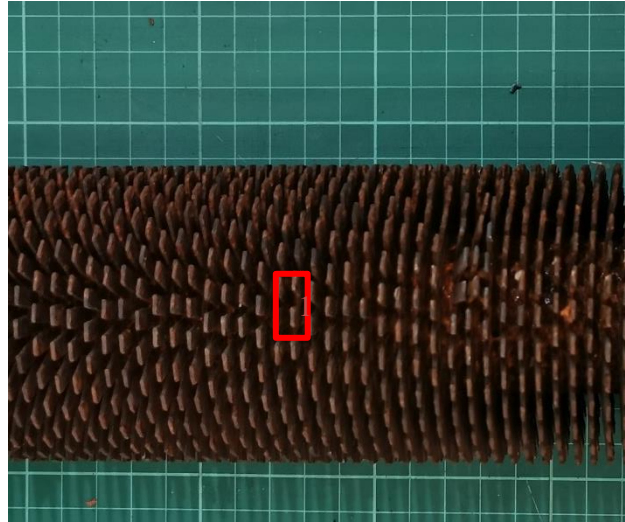
Gambar 4.9. Lokasi pengambilan gambar uji metalografi *tube* row 10 no. 17



Gambar 4.10. Lokasi pengambilan gambar uji metalografi *tube* row 8 no. 26

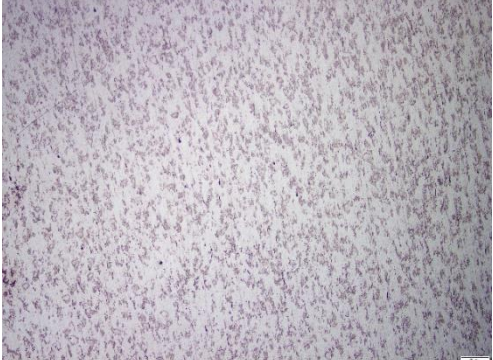
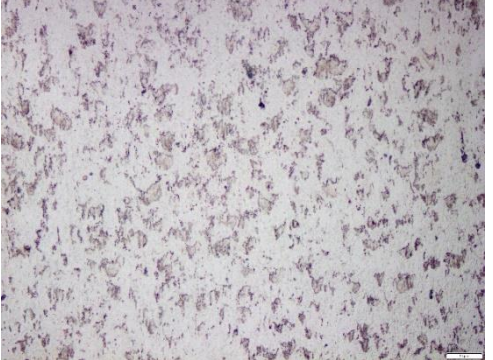

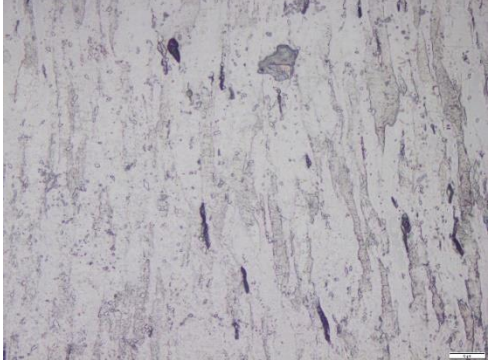


Gambar 4.11. Bagian fin dari tube yang terbakar

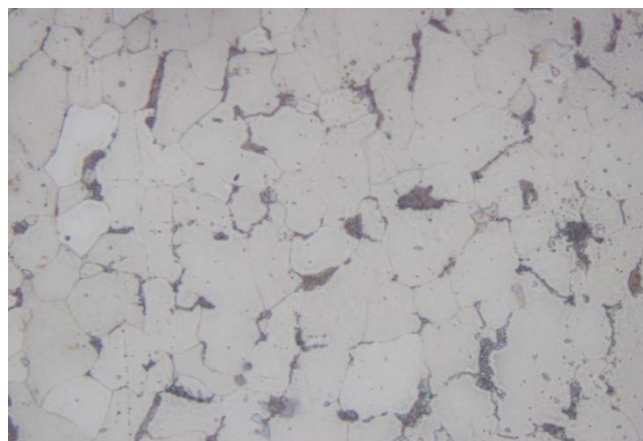


Gambar 4.12. Bagian fin dari tube yang tidak terbakar

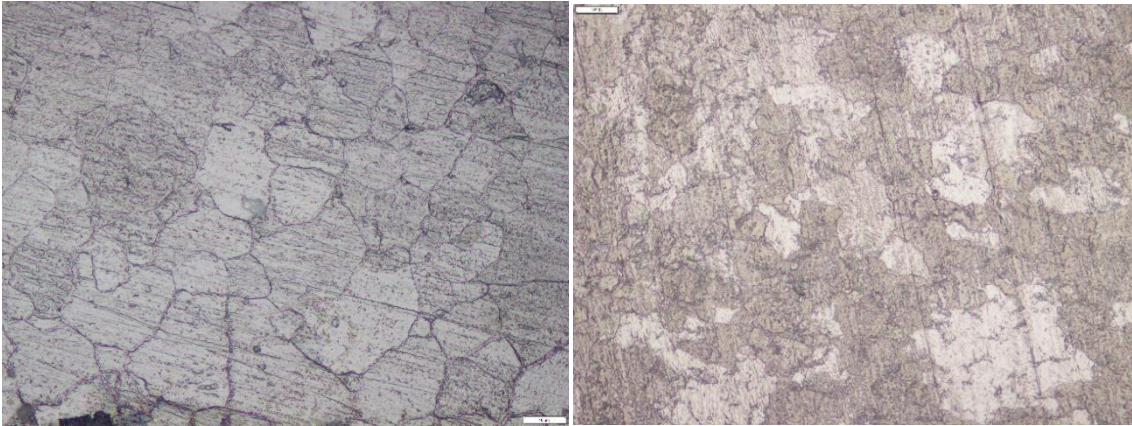
Tabel 4. 7. Hasil Uji Mikro

Spesimen	Perbesaran 200x	Perbesaran 500x
<p>Row 8 No. 26</p>		
<p>Row 10 No. 17</p>		

Pada *evaporator tube* terdapat fin, ditemukan fin yang terbakar dan yang tidak terbakar kemudian diambil sampel untuk dilakukan uji metalografi, lokasi pengambilan sampel fin ditunjukkan pada gambar 4.10. Hasil uji metalografi pada fin untuk yang dekat dengan area terbakar mengalami pertumbuhan batas butir dibandingkan dengan area yang tidak terbakar ditunjukkan pada gambar 4.12.



Gambar 4.13. Hasil Mikro Row 10 No.17 perbesaran 1000x



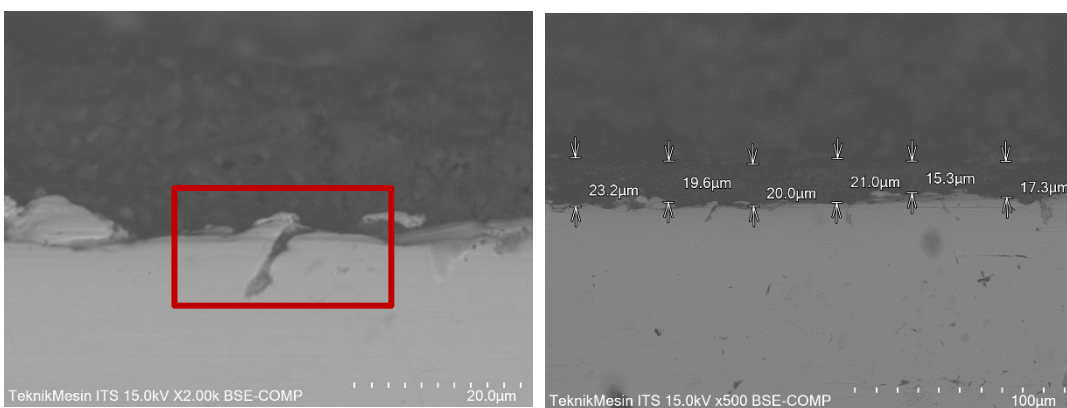
(a)

(b)

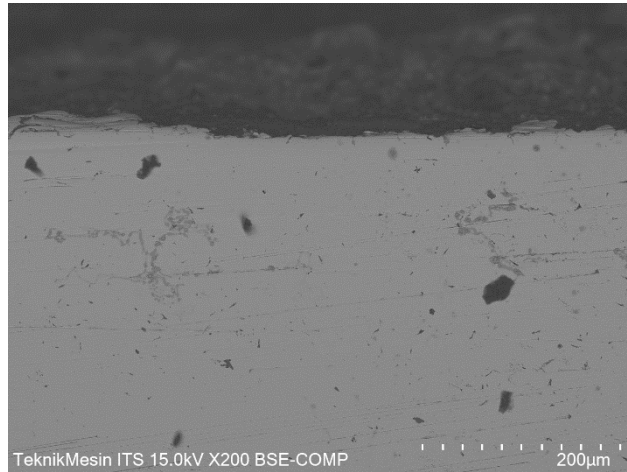
Gambar 4.14. Hasil Mikro Fin (a) Sisi yang terbakar dengan perbesaran 500x (b) Sisi yang tidak terbakar dengan perbesaran 500x

4.7. Uji SEM

Pada Row 10 lokasi luar yang pecah oksida masih relatif tipis dan terlihat adanya *micro cracks*, dilihat dari struktur mikro sebelumnya bahwa terjadi pertumbuhan pada batas butir pada sampel yang mengalami failure dan pada bagian fin. Kejadian ini akan mengurangi kekuatan material *tube*, jika terus berlangsung akan menyebabkan ruang kosong (*formation of void*) di sepanjang batas butir dan pemisahan butir akibat tegangan, maka yang terjadi *tube* akan pecah atau gagal.

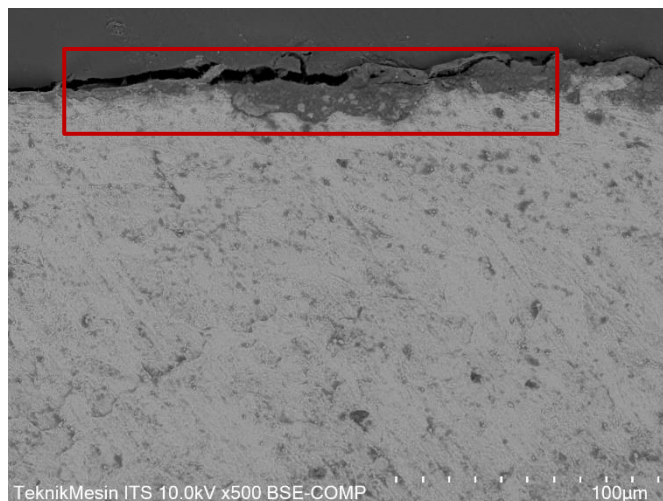


Gambar 4.15. Row 10 bagian luar



Gambar 4.16. Row 10 bagian luar

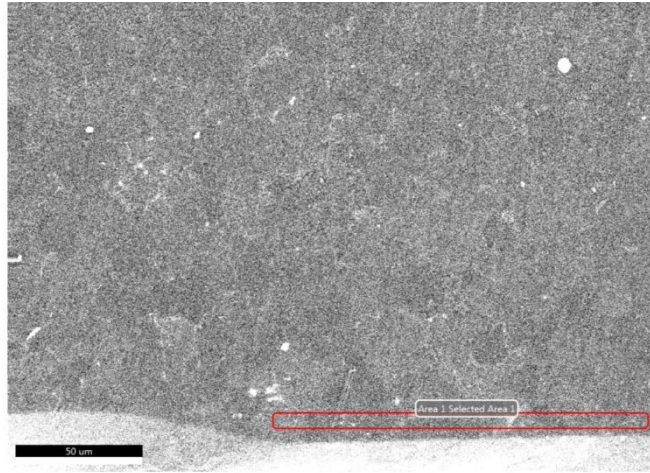
Hasil pengujian dilakukan di daerah bagian atas fin seperti ditunjukkan pada gambar terlihat struktur mengalami penebalan batas butir yang berbentuk tanah kering (*heat check*). Lekukan-lekukan pada *heat check* tersebut merupakan bagian yang mengalami oksidasi yang paling cepat



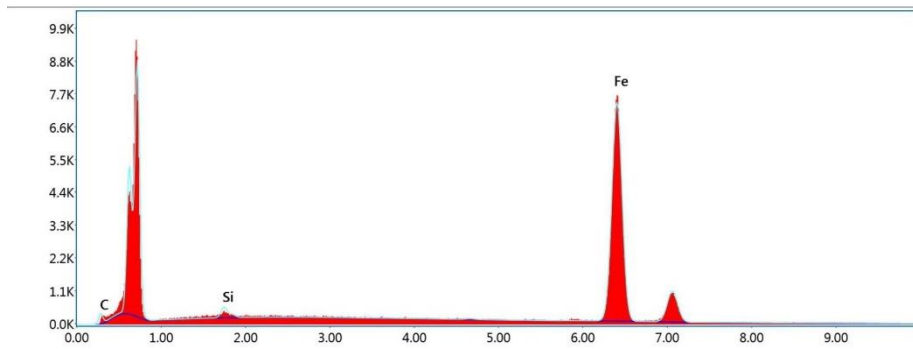
Gambar 4.17. Fin bagian atas

4.8. Uji EDS

Pengujian EDS digunakan untuk mengetahui komposisi kimia pada spesimen dititik lokasi tertentu

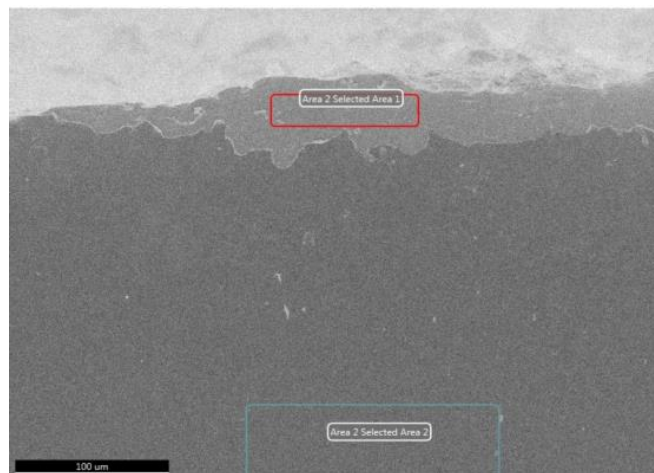


Gambar 4.18. Bagian dalam tube Row 8 No.26

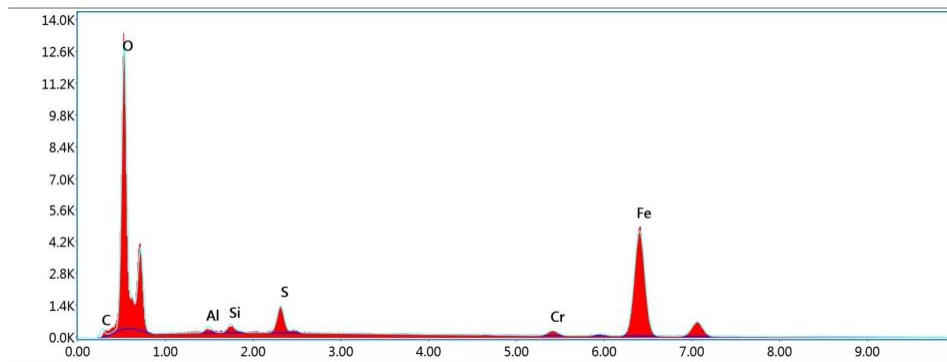


Gambar 4.19. Grafik Komposisi Kimia hasil uji EDS Bagian dalam tube Row 8 No.26

Pada pengujian EDS spesimen bagian dalam *tube* row 8 no. 26, hasil menunjukkan bahwa terdapat unsur C, Si dan Fe.

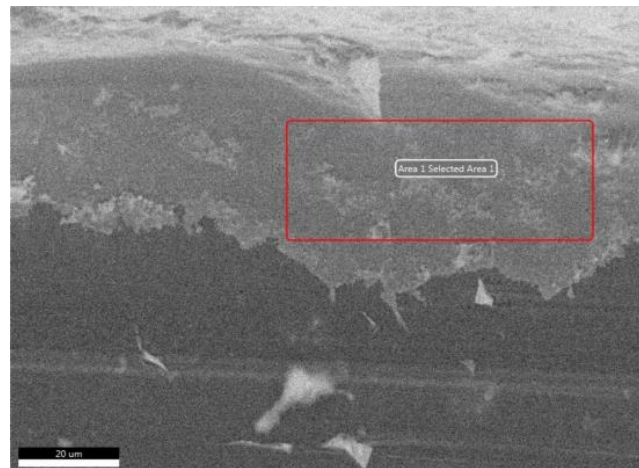


Gambar 4.20. Bagian luar tube Row 8 No.26

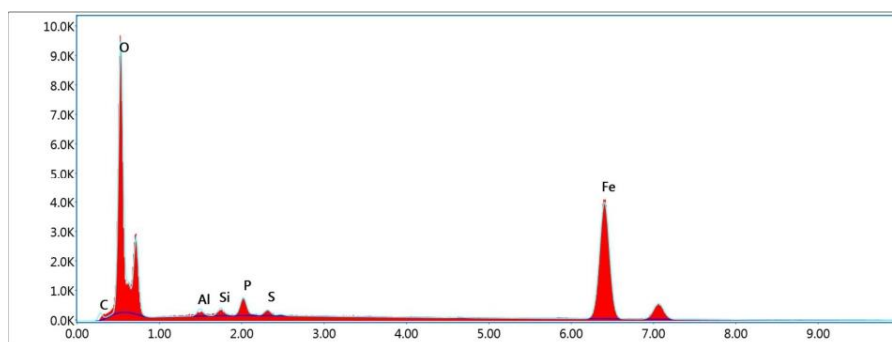


Gambar 4.21. Grafik Komposisi Kimia hasil uji EDS Bagian luar tube Row 8 No.26

Pada pengujian EDS Spesimen bagian luar *tube*, hasil menunjukkan bahwa terdapat unsur C, O, Al, Si, S, Cr dan Fe. Nilai unsur O sangat tinggi dapat diakibatkan dari adanya oksidasi pada permukaan luar *tube*.

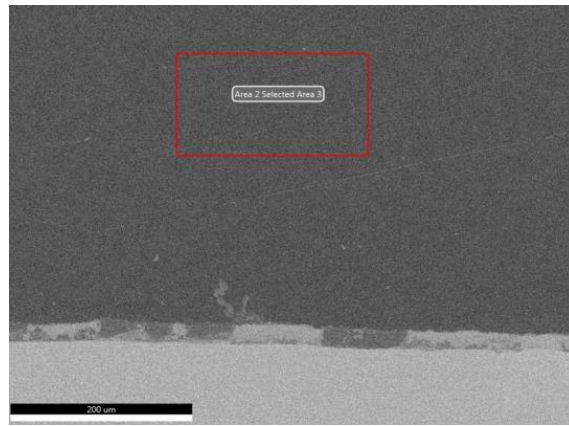


Gambar 4.22. Bagian luar tube Row 10 No.17

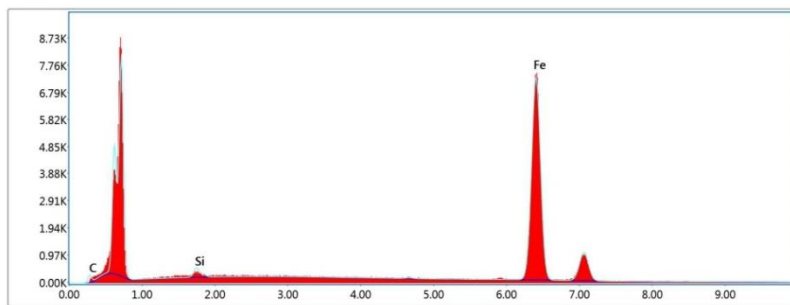


Gambar 4.23. Grafik Komposisi Kimia hasil uji EDS Bagian luar tube Row 10 No.17

Pada pengujian EDS Spesimen bagian luar *tube*, hasil menunjukkan bahwa terdapat unsur C, O, Al, Si, P, S dan Fe.

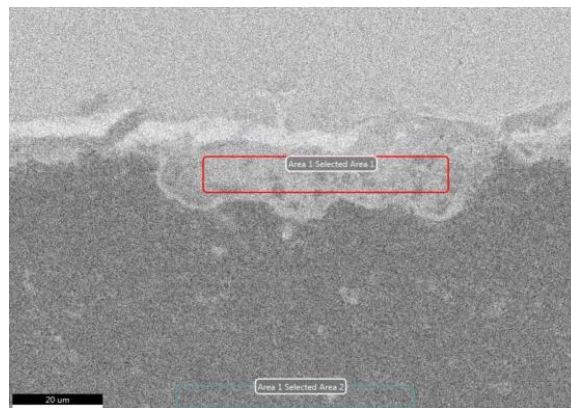


Gambar 4.24. Bagian dalam tube Row 10 No.17

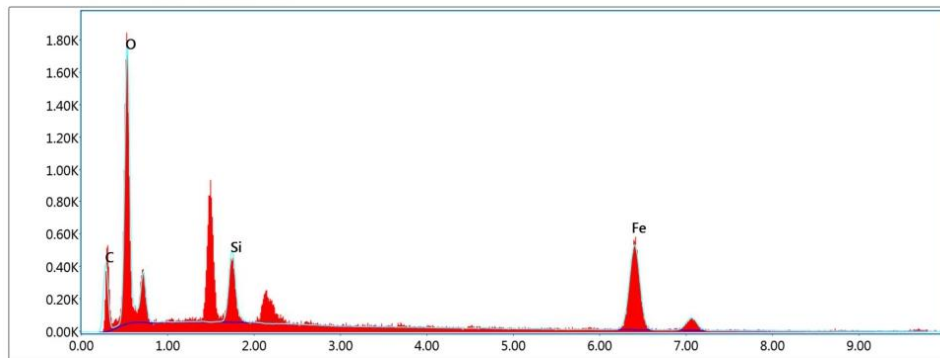


Gambar 4.25. Grafik Komposisi Kimia hasil uji EDS Bagian dalam tube Row 10 No.17

Pada pengujian EDS spesimen bagian dalam *tube*, hasil menunjukkan bahwa terdapat unsur C, Si dan Fe



Gambar 4.26. Bagian Fin



Gambar 4.27. Grafik Komposisi Kimia hasil uji EDS Bagian Fin

Pada pengujian EDS spesimen bagian dalam fin tube, hasil menunjukkan bahwa terdapat unsur C, O, Si dan Fe.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Penyebab terjadinya kegagalan *evaporator tube* adalah *short term overheating*.
2. Mekanisme kegagalan pada *evaporator tube* dikarenakan *overheating* sehingga mengakibatkan perubahan fasa dari *water-liquid* menjadi *vapor*. *Vapor* ini berbentuk buble yang meletup (*departure from nucleate boiling*) akan pecah dan terangkat oleh *flow rate* dari *water* karena *wall adhesion*. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya proses kavitasi akibat letupan secara terus menerus. Sehingga tube akan berlubang (*pitting-grooving*). *Grooving* akan menyebabkan luas perpindahan panas akan menjadi lebar. Berdasarkan hukum perpindahan panas jika luasan perpindahan panas semakin luas maka area tersebut akan mengalami perubahan fasa dan *bubble* ini akan terjebak di dalam *grooving*. Seiring dengan panas yang tersimpan maka *pressure* dari perubahan fasa akan meningkat sesuai dengan hukum termodinamika dari diagram P-v. *Pressure* ini akan menyebabkan pecah *tube* (*tube leak*). Hal ini juga dipengaruhi oleh penipisan *thickness* dari *tube*.
3. Hasil dari pengamatan visual *evaporator tube* memperlihatkan terjadinya mengembung (*bulging*) dan mulut ikan (*fish mouth*). Pengukuran *thickness* pada spesimen yang mengalami kegagalan menunjukkan adanya sedikit pengurangan penebalan. Uji komposisi kimia menunjukkan bahwa spesimen masih sesuai dengan standart ASTM A106 Grade B. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan material terjadi deformasi pada daerah yang pecah, ini menunjukkan bahwa kekuatan material menurun dengan kenaikan kekerasan. Dari hasil uji metalografi menunjukkan ada degradasi struktur mikro ditunjukkan pada pengambilan mikro di lokasi kegagalan yaitu stuktur mikro mengalami *elongation grain* dan pertumbuhan batas butir, bagian *fin* pada *tube* yang terbakar juga di lakukan uji metalografi dan dibandingkan pada bagian *fin* dari *tube* yang tidak terbakar, terlihat bahwa ada perbedaan signifikan pada batas butir. Hasil uji SEM

menunjukkan bahwa ada *micro crack* pada permukaan luar tube dan *heat check* pada permukaan luar fin. Pada hasil EDS tidak menunjukkan tanda-tanda korosi, Nilai unsur O sangat tinggi dapat diakibatkan dari adanya oksidasi pada permukaan luar *tube*.

5.2 Saran

1. Monitoring dilakukan terhadap *evaporator tube* pada saat shutdown.
2. Sebaiknya dilakukan evaluasi terhadap umur pakai dari semua material yang di aplikasikan pada temperatur tinggi sehingga bisa dilakukan *assessment* sisa umur pakainya sebagai tindakan preventive maintenance.
3. Setelah kejadian *evaporator tube* pecah, akan timbul gonjangan dan kerusakan pada sekitar tube yang pecah seperti *spacer* yang lepas, *tube* yang berubah posisi, maka hal itu harus di perbaiki seperti awal sebelum HRSG di operasikan kembali
4. Perlu dilakukan upgrade jenis material yang selama ini digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

Aini, N.N., Widiawaty, C.D., & Nusyirwan (2018). ANALISIS MEKANISME KEGAGALAN PADA PIPA BOILER MENGGUNAKAN METODE ROOT CAUSE FAILURE ANALYSIS (RCFA).

Basitha, D. I., Suwarta, P., Sutikno, S., Soeharto, S., & Sidharta, I. (2013). Analisis Dampak Overheating terhadap *Tube* Katalis HP-40 Modifikasi di Primary Reformer Pabrik Ammonia.

Daffa, M., Ekayuliana, A., & Wijayanti, F. (2020). Analisis Kebocoran *Tube* Outlet Header LP Evaporator HRSG dengan Metode RCFA. *Jurnal Mekanik Terapan*, 1(1), 35-44.

David N. French, Sc. D., Microstructural Degradation, The National Board of Boiler & Pressure Vessel Inspectors - National Board Bulletin, January, 1919.

Dehnavi, F., Eslami, A., & Ashrafizadeh, F. (2017). A case study on failure of superheater *tubes* in an industrial power plant. *Engineering Failure Analysis*, 80, 368-377.

Failure analysis and prevention, Vol. 11 ASM Metals Hand Book, 1986, pp. 606–607 Ninth Edn.

Felipe, G. B. U., Junca, E., Arnt, Â. B. C., Rocha, M. R. D., & Dal-Bó, A. G. (2020). Heat treatment analysis of ASTM A106 steel spheroidization and erosive wear at high temperatures. *REM-International Engineering Journal*, 73, 539-546.

Ganapathy, V. (2002). Industrial boilers and heat recovery steam generators: design, applications, and calculations. CRC Press.

Ghosh, D., Roy, H., & Subramanian, C. (2021). Metallurgical Failure Investigation of Premature Failed Platen Water Wall *Tube* in a Thermal Power Plant Boiler. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21(3), 733-737.

Gu, S., Zhao, M., Qiu, G., Wang, R., Liu, Y., & Li, J. (2020). Case study of failed feed water pump shaft in HRSG of 9F gas turbine generator unit. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104861.

Gupta, J., Kujur, A., Talukdar, M. K., Velusshami, S. K., Prasad, S. R., Bhatia, B., ... & Bhardwaj, A. (2019). Root cause analysis of evaporator *tubes* failure of a HRSG unit. *Engineering Failure Analysis*, 97, 322-330.

Husen, A., Setiadi, B., & Alfarizi, F. (2020). ANALISIS EFISIENSI THERMAL HIGH PRESSURE DAN LOW PRESSURE SUPERHEATER PADA HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR (HRSG) 2.1 PLTGU BLOK 2 TAMBAK LOROK. *Presisi*, 22(2), 31-38.

Husen, A., Setiadi, B., & Alfarizi, F. (2020). ANALISIS EFISIENSI THERMAL HIGH PRESSURE DAN LOW PRESSURE SUPERHEATER PADA HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR (HRSG) 2.1 PLTGU BLOK 2 TAMBAK LOROK. *Presisi*, 22(2), 31-38.

Jackson, B. N. (2017). Vertical *tube* natural circulation evaporators. In *Heat Recovery Steam Generator Technology* (pp. 65-80). Woodhead Publishing.

Luder, D., Erenburg, B., Iskevitch, E., Ariely, S., & Yalin, M. (2018). Investigation of failure of steel steam generating evaporator *tube* involving delamination defects and corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 84, 196-204.

Nugroho, S., Sulardjaka, S., & Al Hadid, G. (2017, September). Analisis Kegagalan Sambungan Las Pipa Venting Isolation High Pressure Superheater

pada Heat Recovery Steam Generator. In *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XVI-2017*.

Pal, U., Kishore, K., Mukhopadhyay, S., Mukhopadhyay, G., & Bhattacharya, S. (2019). Failure analysis of boiler economizer *tubes* at power house. *Engineering Failure Analysis*, 104, 1203-1210.

Perpustakaan Digital Polban. (2022). Retrieved 7 July 2022, from <http://digilib.polban.ac.id/gdl.php?mod=browse&op=read&id=jbtpolban-gdl-asepsopyan-9721>

Rayaprolu, K. (2009). *Boilers for power and process*. CRC press.


Sunandrio, H., Suhartono, H. A., & Prawoto, Y. (2017). Overheated pipe due to scale: Field failure investigation and finite element analysis. *Case studies in engineering failure analysis*, 8, 36-48

Wicaksono, R., & Ilman, M. N. (2018). INVESTIGASI KEBOCORAN PIPA BOILER PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP 65 MW. *Prosiding SENIATI*, 72-77.

Halaman ini sengaja di kosongkan

LAMPIRAN

1. Hasil Uji Komposisi Kimia



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
UNIT LAYANAN BISNIS, JASA DAN PRODUKSI
 Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Sukolilo - Surabaya 60111
 TELP. (031) 5947186 - 5994444 FAX. (031) 5994444
 Laman : www.ppns.ac.id

LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 REPORT ON THE TEST RESULT

Nomor Number	: 1102 /PL19/BJP/2021
--------------	-----------------------

PELANGGAN / Customer	
1. Nama <i>Name</i>	: HANDI, Teknik Material ITS
2. Alamat <i>Address</i>	: Kampus ITS Sukolilo Surabaya

BENDA UJI / Test Specimen	
1. Tanggal Diterima <i>Date of Received</i>	: 28 Oktober 2021
2. Spesimen Uji <i>Test Specimen</i>	: ROW 8 No.25
3. Identifikasi Material <i>Identification of Material</i>	: Baja Paduan
4. Proses Las /Posisi Las/Juru Las <i>Weld Process/Position/Welder</i>	: -
5. Proyek <i>Project</i>	: -


PENGUJIAN / Testing	
1. Tanggal Pengujian <i>Date of Testing</i>	: 03 November 2021
2. Lokasi Pengujian <i>Location of Testing</i>	: Lab. Uji Bahan PPNS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya
3. Jenis Pengujian <i>Type of Testing</i>	: Chemical Composition Test
4. Kondisi Lingkungan <i>Environmental Condition</i>	: Suhu 27°C
5. Acuan <i>Reference</i>	: ASTM A751-14a

ALAT / Equipment		
1. Nama <i>Name</i>	: Optical Emission Spectroscope	-
2. Tipe/Model <i>Type/Model</i>	: Foundry Master Smart	-
3. Kapasitas <i>Capacity</i>	: Global	-
4. Merek/Buatan <i>Manufacturer</i>	: Hitachi - Oxford Instrument / Germany	-
5. Nomor Seri <i>Serial Number</i>	: 57X0031	-
6. Nilai Ketidak pastian <i>Number of uncertainty</i>	: -	-
7. Ketertelusuran <i>Traceability</i>	: LK-022-IDN	-

HASIL PENGUJIAN / <i>Result of Testing</i>	: (Terlampir) <i>(Attached)</i>
---	------------------------------------

DITERBITKAN TANGGAL <i>Date of Issue</i>	: 03 November 2021
---	--------------------

Kalab. Uji Bahan
 Head of IKT & NDT Laboratory



Hendri Budi Kurniawan, SST., MT
 NIP. 199003072019031010

Keterangan / Notes :

- Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS
 It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS
- Hasil pengujian ini tidak untuk disumunkan dan hanya berlaku untuk material yang diujikan dalam pengujian ini
 This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above

Halaman
1 dari 2



LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN
 ATTACHMENT OF THE TEST RESULT

Nomor : 1102 /PL19/BJP/2021
 Number

No. SPK. 32-X/PL19/BJP/2021

F.08-LUB-PPNS

PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA / CHEMICAL COMPOSITION TEST									
No.	KOMPOSISI (%)								
	Unsur	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
ROW 8	Nilai	98.9	0.0821	0.285	0.595	< 0.0030	< 0.0020	0.0332	0.0068
	Unsur	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
No. 25	Nilai	0.0186	0.0094	0.0090	0.0416	< 0.0020	< 0.0010	0.0018	< 0.0400
	Unsur	Pb	Sn	B	Zr	As	Bi		
	Nilai	< 0.0150	0.0036	< 0.0010	0.0055	0.0227	< 0.0100		

Surabaya, 03/11/2021
 Diuji oleh: 
 AGUS BUDI-F
 UNIT LAYANAN BISNIS DAN JASA PRODUKSI

Keterangan / Notes :
 1. Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS
 It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS
 2. Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk material yang diujikan dalam pengujian ini
 This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above



**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Optical Emission Spectroscopy Result

No. SPK : 32-X/PL19/BJP/2021 Penandaan : Row 8 No. 25
Pelanggan : HANDI T. MATERIAL ITS Material : Baja Paduan
Proyek : - Dimensi :
Kepala Lab. : Hendri Budi K, .S.ST., M.T. Heat No. : -
Program : FE_T_100 Keterangan : Row 8 No. 25

	Fe %	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %
1	98.9	0.0812	0.297	0.604	< 0.0030	< 0.0020	0.0330	0.0077
2	98.9	0.0820	0.274	0.586	< 0.0030	< 0.0020	0.0333	0.0058
3	98.9	0.0831	0.284	0.596	< 0.0030	< 0.0020	0.0334	0.0070
Ave	98.9	0.0821	0.285	0.595	< 0.0030	< 0.0020	0.0332	0.0068

	Ni %	Al %	Co %	Cu %	Nb %	Ti %	V %	W %
1	0.0195	0.0101	0.0090	0.0413	< 0.0020	< 0.0010	0.0020	< 0.0400
2	0.0189	0.0093	0.0087	0.0424	< 0.0020	< 0.0010	0.0016	< 0.0400
3	0.0174	0.0090	0.0092	0.0411	< 0.0020	< 0.0010	0.0018	< 0.0400
Ave	0.0186	0.0094	0.0090	0.0416	< 0.0020	< 0.0010	0.0018	< 0.0400

	Pb %	Sn %	B %	Zr %	As %	Bi %
1	< 0.0150	0.0031	< 0.0010	0.0051	0.0205	< 0.0100
2	< 0.0150	0.0036	< 0.0010	0.0057	0.0273	< 0.0100
3	< 0.0150	0.0040	< 0.0010	0.0058	0.0204	< 0.0100
Ave	< 0.0150	0.0036	< 0.0010	0.0055	0.0227	< 0.0100



Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo Surabaya (Indonesia)
Tel. : +62 31 5999444 Fax: +62 31 5999444



POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
UNIT LAYANAN BISNIS, JASA DAN PRODUKSI

Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Sukolilo - Surabaya 60111
TELP. (031) 5947186 - 5994444 FAX. (031) 5994444

Laman : www.ppns.ac.id

LAPORAN HASIL PENGUJIAN
REPORT ON THE TEST RESULT

Nomor : 1101 /PL.19/BJP/2021
Number

PELANGGAN / Customer

1. Nama Name	:	HANDI, Teknik Material ITS
2. Alamat Address	:	Kampus ITS Sukolilo Surabaya

BENDA UJI / Test Speciment

1. Tanggal Diterima Date of Received	:	28 Oktober 2021
2. Spesimen Uji Test Specimen	:	ROW 8 No. 26
3. Identifikasi Material Identification of Material	:	Baja Paduan
4. Proses Las /Posisi Las/Juru Las Weld Process/Position/Welder	:	-
5. Proyek Project	:	-

PENGUJIAN / Testing

1. Tanggal Pengujian Date of Testing	:	03 November 2021
2. Lokasi Pengujian Location of Testing	:	Lab. Uji Bahan PPNS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya
3. Jenis Pengujian Type of Testing	:	Chemical Composition Test
4. Kondisi Lingkungan Environmental Condition	:	Suhu 27°C
5. Acuan Reference	:	ASTM A751-14a

ALAT / Equipment

1. Nama Name	:	Optical Emission Spectroscope	-
2. Tipe/Model Type/Model	:	Foundry Master Smart	-
3. Kapasitas Capacity	:	Global	-
4. Merek/Buatan Manufacturer	:	Hitachi - Oxford Instrument / Germany	-
5. Nomor Seri Serial Number	:	57X0031	-
6. Nilai Ketidak pastian Number of uncertainty	:	-	-
7. Ketertelusuran Traceability	:	LK-022-IDN	-

HASIL PENGUJIAN / Result of Testing	:	(Terlampir) (Attached)
---	---	---------------------------

DITERBITKAN TANGGAL Date of Issue	:	03 November 2021
---	---	------------------

Kalab. Uji Bahan
Head of DSA/DTL Laboratory

Hendri Bud Kurniyanto, SST, MT
NIP. 199003072019031010



Keterangan / Notes :
1. Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS
It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS

Halaman
1 dari 2



LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN
 ATTACHMENT OF THE TEST RESULT

Nomor
 Number : 1101 /PL19/BJP/2021

No. SPK. 32-X/PL19/BJP/2021

F.08-LUB-PPNS

PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA / CHEMICAL COMPOSITION TEST									
No.	KOMPOSISI (%)								
	Unsur	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
ROW 8 No. 26	Nilai	98.9	0.0794	0.272	0.593	< 0.0030	< 0.0020	0.0342	0.0075
	Unsur	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
	Nilai	0.0195	0.0103	0.0071	0.0427	< 0.0020	< 0.0010	0.0020	< 0.0400
	Unsur	Pb	Sn	B	Zr	As	Bi		
	Nilai	< 0.0150	0.0039	< 0.0010	0.0071	0.0310	< 0.0100		

Surabaya, 03 November 2021
 Diuji oleh: *[Signature]*
 Diverifikasi oleh: *[Signature]*
 Ag...
 ...di F
 UNIT LAYANAN BISNIS DAN
 JASA PRODUKSI

Keterangan / Notes :
 1. Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS
 It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS
 2. Hasil pengujian ini tidak untuk dikonsumsi dan hanya berlaku untuk material yang diujikan dalam pengujian ini
 This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above

Halaman
 2 dari 2



**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Optical Emission Spectroscopy Result

No. SPK : 32-X/PL19/BJP/2021 Penandaan : Row 8 No. 26
Pelanggan : HANDI T. MATERIAL ITS Material : Baja Paduan
Proyek : - Dimensi :
Kepala Lab. : Hendri Budi K., S.ST., M.T. Heat No. : -
Program : FE_T_100 Keterangan : Row 8 No. 26

	Fe %	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %
1	98.9	0.0789	0.278	0.597	< 0.0030	< 0.0020	0.0342	0.0064
2	98.9	0.0785	0.267	0.590	< 0.0030	< 0.0020	0.0339	0.0080
3	98.9	0.0809	0.272	0.593	< 0.0030	< 0.0020	0.0344	0.0082
Ave	98.9	0.0794	0.272	0.593	< 0.0030	< 0.0020	0.0342	0.0075

	Ni %	Al %	Co %	Cu %	Nb %	Ti %	V %	W %
1	0.0187	0.0108	0.0067	0.0425	< 0.0020	< 0.0010	0.0022	< 0.0400
2	0.0201	0.0101	0.0079	0.0427	< 0.0020	< 0.0010	0.0018	< 0.0400
3	0.0195	0.0101	0.0068	0.0430	0.0033	< 0.0010	0.0019	< 0.0400
Ave	0.0195	0.0103	0.0071	0.0427	< 0.0020	< 0.0010	0.0020	< 0.0400

	Pb %	Sn %	B %	Zr %	As %	Bi %
1	< 0.0150	0.0035	< 0.0010	0.0071	0.0292	< 0.0100
2	< 0.0150	0.0037	< 0.0010	0.0063	0.0290	< 0.0100
3	< 0.0150	0.0045	< 0.0010	0.0079	0.0349	< 0.0100
Ave	< 0.0150	0.0039	< 0.0010	0.0071	0.0310	< 0.0100



Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo Surabaya (Indonesia)
Tel. : +62 31 5999444 Fax: +62 31 5999444



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 REPORT ON THE TEST RESULT

Nomor : 1105.B /PL19/BJP/2021
 Number

PELANGGAN / Customer	
1. Nama Name	: HANDI, Teknik Material ITS
2. Alamat Address	: Kampus ITS Sukolilo Surabaya

BENDA UJI / Test Specimen	
1. Tanggal Diterima Date of Received	: 28 Oktober 2021
2. Spesimen Uji Test Specimen	: ROW 10 No. 17
3. Identifikasi Material Identification of Material	: Baja Paduan
4. Proses Las /Posisi Las/Juru Las Weld Process/Position/Welder	: -
5. Proyek Project	: -

PENGUJIAN / Testing	
1. Tanggal Pengujian Date of Testing	: 03 November 2021
2. Lokasi Pengujian Location of Testing	: Lab. Uji Bahan PPNS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya
3. Jenis Pengujian Type of Testing	: Chemical Composition Test
4. Kondisi Lingkungan Environmental Condition	: Suhu 27°C
5. Acuan Reference	: ASTM A751-14a

ALAT / Equipment		
1. Nama Name	: Optical Emission Spectroscope	-
2. Tipe/Model Type/Model	: Foundry Master Smart	-
3. Kapasitas Capacity	: Global	-
4. Merek/Buatan Manufacturer	: Hitachi - Oxford Instrument / Germany	-
5. Nomor Seri Serial Number	: 57X0031	-
6. Nilai Ketidakpastian Number of uncertainty	: -	-
7. Keterelusuran Traceability	: LK-022-IDN	-

HASIL PENGUJIAN / Result of Testing	: (Terlampir) (Attached)
--	-----------------------------

DITERBITKAN TANGGAL Date of Issue	: 03 November 2021
--------------------------------------	--------------------

Kalab. Uji Bahan
 Head of DT & NDT Laboratory

 Hendri Budianto, S.T., M.T.
 NIP. 199003072019031010
 UNIT LAYANAN BISNIS DAN
 JASA P802/LHBI

Keterangan / Notes :
 1. Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS
 It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS
 2. Hasil pengujian ini tidak untuk dikonsumsi dan hanya berlaku untuk material yang diujikan dalam pengujian ini
 This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above



LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN
 ATTACHMENT OF THE TEST RESULT

Nomor
 Number : 1105.B/PL19/BJP/2021

No. SPK. 32-X/PL19/BJP/2021

F.08-LUB-PPNS

PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA / CHEMICAL COMPOSITION TEST									
No.	KOMPOSISI (%)								
ROW 10	Unsur	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	Nilai	98.9	0.118	0.219	0.553	< 0.0030	< 0.0020	0.0169	0.0049
No. 17	Unsur	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
	Nilai	< 0.0050	0.0294	0.0071	0.0131	0.0044	0.0011	0.0025	< 0.0400
	Unsur	Pb	Sn	B	Zr	As	Bi		
	Nilai	< 0.0150	0.0076	< 0.0010	0.0066	0.0758	< 0.0100		

Surabaya, 03 November 2021
 Diuji oleh, 
 Diverifikasi oleh, 
 UNIT LAYANAN BISNIS DAN
 JASA PRODUKSI

Keterangan / Notes :

- Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS
 It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS
- Hasil pengujian ini tidak untuk dikonsumsi dan hanya berlaku untuk material yang diujikan dalam pengujian ini
 This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above

Halaman
 2 dari 2



**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

Optical Emission Spectroscopy Result

No. SPK : 32-X/PL19/BJP/2021 Penandaan : Row 10 No. 17
Pelanggan : HANDI T. MATERIAL ITS Material : Baja Paduan
Proyek : - Dimensi :
Kepala Lab. : Hendri Budi K, .S.ST., M.T. Heat No. : -
Program : FE_T_100 Keterangan : Row 10 No. 17

	Fe %	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %
1	98.9	0.117	0.219	0.554	< 0.0030	< 0.0020	0.0170	0.0055
2	98.9	0.117	0.219	0.551	< 0.0030	< 0.0020	0.0172	0.0043
3	98.9	0.118	0.219	0.553	< 0.0030	< 0.0020	0.0164	0.0050
Ave	98.9	0.118	0.219	0.553	< 0.0030	< 0.0020	0.0169	0.0049

	Ni %	Al %	Co %	Cu %	Nb %	Ti %	V %	W %
1	< 0.0050	0.0301	0.0081	0.0135	0.0060	0.0012	0.0027	< 0.0400
2	< 0.0050	0.0292	0.0047	0.0129	0.0036	0.0010	0.0024	< 0.0400
3	< 0.0050	0.0288	0.0084	0.0130	0.0036	0.0011	0.0024	< 0.0400
Ave	< 0.0050	0.0294	0.0071	0.0131	0.0044	0.0011	0.0025	< 0.0400

	Pb %	Sn %	B %	Zr %	As %	Bi %
1	< 0.0150	0.0080	< 0.0010	0.0097	0.0707	< 0.0100
2	< 0.0150	0.0071	< 0.0010	0.0051	0.0756	< 0.0100
3	< 0.0150	0.0076	< 0.0010	0.0049	0.0811	< 0.0100
Ave	< 0.0150	0.0076	< 0.0010	0.0066	0.0758	< 0.0100



Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo Surabaya (Indonesia)
Tel. : +62 31 5999444 Fax: +62 31 5999444

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak terakhir dari 2 bersaudara, dilahirkan di Jember pada tanggal 31 Juli 1997 dengan nama Faradesil Yuliani. Penulis sebelumnya menempuh pendidikan D4 di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dengan program studi Teknik Desain dan Manufaktur pada tahun 2015 hingga 2019. Kemudian penulis melanjutkan studi S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di Departemen Teknik Mesin pada tahun 2020.

Halaman ini sengaja dikosongkan