

TESIS

**ANALISA KEGAGALAN MATERIAL PIPA *SUPERHEATER*
PADA *BOILER* TYPE CFB (*CIRCULATING FLUIDIZED BED*)**

*Failure Analysis Of Superheater Pipe Materials In a CFB
(Circulating Fluidized Bed) Type Boiler*

**MUHAMMAD FACHERUDDIN BJ
D022202001**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

**ANALISA KEGAGALAN MATERIAL PIPA *SUPERHEATER*
PADA *BOILER TYPE CFB (CIRCULATING FLUIDIZED BED)***

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

**MUHAMMAD FACHERUDDIN BJ
D022202001**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS

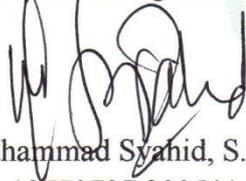
ANALISA KEGAGALAN MATERIAL PIPA *SUPERHEATER* PADA *BOILER* TYPE CFB (*CIRCULAZING FLUIDIZED BED*)

MUHAMMAD FACHERUDDIN BJ
D022202001

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
pada tanggal 08 Februari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

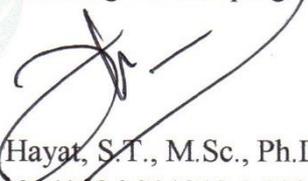
Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T.
NIP. 19770707 200511 1 001

Pembimbing Pendamping



Azwar Hayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 19840126 201212 1 002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin




Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin




Dr. Eng. Novriany Amaliyah, S.T., M.T.
NIP. 19791112 200812 2 002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Muhammad Facheruddin BJ
Nomor mahasiswa : D022202001
Program studi : Magister Teknik Mesin (Material)

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Analisa Kegagalan Material Pipa *Superheater* Pada *Boiler* Type CFB (*Circulating Fluidized Bed*)” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Dr. Muhammad Syahid, ST., MT. dan Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph.D. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding The 6th EPI International Conference on Science and Engineering (EICSE 2022) sebagai artikel dengan judul “*Failure Analysis of Superheater Tube on Boiler Type Circulating Fluidized Bed*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 08 Februari 2023

Yang menyatakan



Muhammad Facheruddin BJ

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmatnya sehingga tesis ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama penyusunan tesis yang berjudul “**Analisa Kegagalan Material Pipa Superheater pada Boiler Type CFB (Circulating Fluidized Bed)**” adalah kerusakan dan kegagalan komponen boiler terkhusus pada pipa – pipa yang sering terjadi di banyak pembangkit yang diakibatkan berbagai faktor.

Bukan hal yang mudah untuk menuangkan analisis penyebab utama kegagalan material boiler tersebut dalam sebuah susunan tesis, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M. Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin
2. Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, M.A., selaku Rektor Universitas Hasanuddin (Periode 2018-2022).
3. Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T., Ketua Komisi Penasehat dan Azwar Hayat, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Sekretaris Komisi Penasehat sekaligus sebagai pembimbing kami, yang selama ini senantiasa memberikan bimbingan dan arahan sampai terselesaikannya penulisan ini.
5. Prof. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, S.T., M.T., Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T., dan Dr. Eng. LukmanulHakim Arma, S.T., M.T., selaku Anggota Tim Penguji atas waktu yang diberikan sertasegala saran yang bermanfaat dalam penyusunan penulisan tesis ini.
6. Dr. Eng. Novriany Amaliyah, S.T., M.T, selaku Ketua Program Studi Magister Jurusan Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
7. Dr. Eng. Jalaluddin, S.T., M.T., selaku Kepala Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
8. Seluruh staf pengajar/dosen pada Program Pascasarjana Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.

9. Direktur Pascasarjana Universitas Hasanuddin beserta staf manajemen.
10. Ria Indrawan selaku Manager PLTU Barru 2 x 50 MW beserta manajemen PT. Cogindo DayaBersama
11. Rekan-rekan kerja di PLTU Barru terkhusus Regu C yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tulisan ini
12. Rekan-rekan Mahasiswa S2 Pascasarjana yang tidak dapat penulis menyebut namanya satu – persatu yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tesis ini.

Akhirnya, kepada orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada istri tercinta dan keluarga besar atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis sangat menyadari bahwa penyusunan penulisan tesis ini masih sangat jauh dari kesempurnaan, maka dari itu kritik dan saran yang sifatnya membangun sangat kami harapkan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat. Wassalam.

Gowa, 08 Februari 2023

Penulis

Muhammad Facheruddin BJ

ABSTRAK

MUHAMMAD FACHERUDDIN BJ. Analisa Kegagalan Material Pipa *Superheater* pada *Boiler* Type CFB (*Circulating Fluidized Bed*). (dibimbing oleh **Muhammad Syahid dan Azwar Hayat**).

Salah satu komponen utama pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) adalah *Boiler*, dimana *boiler* ini bekerja pada temperatur dan tekanan yang tinggi. Temperatur kerja yang tinggi dalam waktu yang lama sangat beresiko menyebabkan terjadinya kegagalan. Kegagalan material pada boiler secara umum 30% disebabkan oleh creep dan 35% disebabkan oleh *overheating*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu studi lapangan, studi literatur, dan penelitian di laboratorium. Pengujian dilaboratorium dilakukan untuk mendapatkan data yang representatif dengan dilakukan pengambilan sampel pengujian pada bagian pipa yang mengalami *fracture* dan dibandingkan dengan sampel pipa yang tidak mengalami *fracture*. Dari hasil pengamatan visual, ditemukan *bulging* pada area *fracture* dan bentuk *fracture* adalah *thick lip fishmouth*. *Thickness* pipa masih mendekati *thickness* design tidak ditemukan indikasi terjadinya abrasi/erosi akibat dari *bed material/fly ash*. Hasil pemeriksaan mikrostruktur pada area *fracture*, fasa yang terbentuk adalah fasa *ferrite* dan *pearlite*, dimana fasa *pearlite* telah mengalami *sphereodized carbide*. Uji SEM menunjukkan ketebalan inner deposit pada pipa yang mengalami *fracture* maksimal adalah 201 mikron. Sedangkan hasil uji XRD deposit ditemukan unsur-unsur Na, Cl, dan Si dimana unsur-unsur ini tergolong berbahaya bagi material baja karbon. Pada sampel pengujian material telah terjadi penurunan nilai *hardness* dari nilai new material 20G, dimana nilai acuan new material adalah 140 sd 155 HB, sedangkan hasil uji pada area *fracture* menunjukkan nilai 81 HB. Penyebab utama kegagalan material superheater adalah konsisten dengan *Long Term Overheating*.

Kata kunci: *Boiler, Superheater, Kekerasan, Mikrostruktur, Overheating*

ABSTRACT

MUHAMMAD FACHERUDDIN BJ. Failure Analysis of Superheater Pipe Materials in CFB (Circulating Fluidized Bed) Boilers. (supervised by **Muhammad Syahid** and **Azwar Hayat**).

One of the main components of the steam generator power plant (PLTU) is the boiler, which works at high temperatures and pressures. High temperatures for an extended period of time are dangerous and can lead to failure. Material failure in boilers is generally 30% caused by creep and 35% caused by overheating. The methods used in this research are field studies, literature studies, and laboratory research. Laboratory tests were carried out to obtain representative data by taking test samples from fractured pipe sections and comparing them with pipe samples that did not experience fractures. From the results of visual observations, bulging was found in the fracture area, and the shape of the fracture was a thick lip fish mouth. The thickness of the pipe is still close to the thickness of the design, and there are no indications of abrasion/erosion due to bed material/fly ash. The results of microstructural examination in the fracture area show that the phases formed are ferrite and pearlite phases, where the pearlite phase has undergone spheroidized carbide. The SEM test showed that the thickness of the inner deposit on the pipe that experienced the maximum fracture was 201 microns. While the results of the deposit XRD test found elements of Na, Cl, and Si, these elements are classified as dangerous for carbon steel materials. In the material testing sample, there has been a decrease in the hardness value from the 20G new material value, where the new material reference value is 140 to 155 HB, while the test results in the fracture area show a value of 81 HB. The main cause of material superheater failure is consistent with Long Term Overheating.

Keywords: Boiler, Superheater, Hardness, Microstructure, Overheating

DAFTAR ISI

	<u>Halaman</u>
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTARA TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xvi
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Teori <i>Boiler</i>	4
2.2. Dasar Pemilihan Material <i>Boiler</i>	9
2.3. Kegagalan Pada System <i>Boiler</i>	14
2.4. Pengaruh Kualitas Air Terhadap Material <i>Boiler</i>	26
2.5. Konsep Dasar Analisa Kegagalan Material	32
2.6. Penelitian Sebelumnya	40
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	44
3.1. Metodologi Umum.....	44
3.2. Teknik Analisis	45
3.3. Metode Analisis	45
3.4. Tahap Analisis.....	46

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	50
4.1. Kondisi dan Data Operasi	50
4.2. Spesifikasi Material.....	54
4.3. Data Kualitas Air dan Uap	55
4.4. Analisa <i>Fraktografi</i>	57
4.5. Pengujian Komposisi Kimia Material	59
4.6. Pengujian Kekerasan.....	61
4.7. Pengujian Mikrostruktur (Metalografi).....	63
4.8. Pengukuran Inner Deposit dengan metode <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	66
4.9. Pengujian Deposit Dengan <i>Metode X-Ray Diffraction (XRD)</i>	67
4.10. Analisa dan Simulasi Tegangan	70
4.11. Summary:	73
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	74
5.1. Kesimpulan	74
5.2. Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA	76
LAMPIRAN	80

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
Gambar 2. 1 <i>Pulverized Coal Boiler</i>	5
Gambar 2. 2 <i>Circulated Fluidized Bed Boiler</i>	6
Gambar 2. 3 <i>Stroker Fired Boiler</i>	6
Gambar 2. 4 <i>Heat Recovery Steam Generator</i>	7
Gambar 2. 5 <i>Tube Superheater</i>	8
Gambar 2. 6 Mekanisme kegagalan erosi.....	16
Gambar 2. 7 Fase Kegagalan <i>Fatigue</i>	16
Gambar 2. 8 <i>Tube</i> yang mengalami <i>corrosion fatigue</i>	19
Gambar 2. 9 <i>Tube</i> yang mengalami thermal fatigue	20
Gambar 2. 10 <i>Tube</i> yang mengalami SCC	20
Gambar 2. 11 SCC Transgranular dan Intergranular.....	21
Gambar 2. 12 <i>Tube</i> yang mengalami <i>short-term overheating</i>	22
Gambar 2. 13 <i>Tube</i> yang mengalami <i>Long-term overheating</i>	23
Gambar 2. 14 <i>Tube</i> yang mengalami <i>hydrogen damage</i>	24
Gambar 2. 15 kurva perilaku <i>creep</i> suatu material (ASM handbook vol 1)	26
Gambar 2. 16 Deposit Pada <i>Tube</i>	28
Gambar 2. 17 Korosi pada <i>tube Boiler</i>	28
Gambar 2. 18 <i>Carryover</i>	29
Gambar 2. 19 <i>Oxygen pitting</i> pada <i>tube Boiler</i>	31
Gambar 2. 20 <i>Tube Platen Superheater</i>	40
Gambar 2. 21 Hasil pengujian metalografi pada penampang dengan pembesaran 200X (A). Hasil pengujian metalografi pada penampang dengan perbesaran 500X (B).....	41
Gambar 2. 22 Pengelembungan pada <i>U-Bend Superheater tube</i> (A). Penumpukan deposit pada bagian dalam <i>U-Bend Superheater tube</i> (B).....	42
Gambar 2. 23 Bekas endapan deposit pada <i>U-bend Superheater tube Boiler 31F-</i> <i>28</i>	42
Gambar 2. 24 <i>Tube Superheater Boiler</i> kelapa sawit.....	42

Gambar 2. 25 Foto makro <i>tube Superheater</i> yang mengalami kegagalan.....	43
Gambar 2. 26 Struktur mikro berupa a) Ferit dan b) butir karbida perlit (speroidisasi perlit)	43
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	44
Gambar 3. 2 <i>Fishbone</i> diagram <i>Root Cause Failure Analysis</i>	45
Gambar 3. 3 Mesin uji spektroskopi PMI-MasterPro.....	46
Gambar 3. 4 Alat Uji SEM (<i>Scenning Electron Microscope</i>)	47
Gambar 3. 5 <i>Stereo microscope</i>	47
Gambar 3. 6 Alat Uji XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	48
Gambar 3. 7 Alat Uji Kekerasan	48
Gambar 3. 8 Alat uji makroskopik dan fraktografi. (a) Kamera digital Canon, (b) <i>Stereomicroscope</i> , dan (c) <i>Scanning Electrone Microscope</i>	49
Gambar 3. 9 <i>Software SIMULIA ABAQUS</i>	49
Gambar 4. 1 Grafik Temperatur <i>Inlet Flue Gas Secondary Superheater</i> (22 April – 23 Mei 2021).....	50
Gambar 4. 2 Grafik Temperatur <i>Inlet Flue Gas Secondary Superheater</i> , 20 Mei – 20 Juni 2021 (A), 5 Juli – 5 Agustus 2021 (B), 5 Agustus – 5 September 2021 (C).....	51
Gambar 4. 3 Grafik Temperatur <i>Inlet Flue Gas Secondary Superheater</i> tanggal 6 Oktober – 6 November 2021	52
Gambar 4. 4 Grafik <i>Temperature, Pressure Main Steam</i> dan <i>total Coal Flow</i> tanggal 22 – 26 Nov 2021	52
Gambar 4. 5 Grafik <i>Flow Main Steam</i> Tanggal 22 Oktober – 22 November 2021	53
Gambar 4. 6 Pipa yang mengalami kegagalan	57
Gambar 4. 7 Bentuk Pipa yang mengalami kegagalan.....	58
Gambar 4. 8 Area titik pemeriksaan <i>Thickness</i>	58
Gambar 4. 9 Diameter pipa <i>fracture</i>	59
Gambar 4. 10 Dimensi panjang dan lebar <i>Area fracture</i>	59
Gambar 4. 11 Acuan penggunaan material berdasarkan temperatur operasi	60
Gambar 4. 12 Titik pengujian kekerasan.....	61
Gambar 4. 13 Grafik hubungan kekerasan dengan kekuatan Tarik	62

Gambar 4. 14 Area pengujian Mikrostruktur	63
Gambar 4. 15 Foto Mikrostruktur <i>New Material</i> 20G.....	64
Gambar 4. 16 Foto Mikrostruktur Area <i>non fracture</i>	64
Gambar 4. 17 Foto Mikrostruktur; Area <i>non fracture</i> (A), Area 2 luar pipa (B), Area 2 dalam pipa (C)	65
Gambar 4. 18 Foto Mikrostruktur; Area <i>non fracture</i> (A), Area 4 luar pipa (B), Area 4 dalam pipa (C)	65
Gambar 4. 19 Ketebalan Inner Deposit pada Pipa fracture	66
Gambar 4. 20 Deposit pada area <i>Fracture</i> yang akan diuji XRD	67
Gambar 4. 21 Grafik Hasil XRD pada Deposit	68
Gambar 4. 22 Hasil pengujian XRD Deposit pada luar pipa	68
Gambar 4. 23 Deposit (<i>Solvent</i>) Pada <i>Governor Valve</i>	69
Gambar 4. 24 Hasil Pengujian XRD Deposit pada <i>Governor Valve</i>	70
Gambar 4. 25 Simulasi awal pipa <i>Superheater</i> sebelum diberi tekanan	72
Gambar 4. 26 Simulasi pipa <i>Superheater</i> setelah diberi tekanan	72

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel 2. 1 Standar Material <i>Boiler</i>	10
Tabel 2. 2 Komposisi kimia material <i>Boiler</i>	11
Tabel 2. 3 Komposisi kimia <i>Austenitic stainless steel</i>	11
Tabel 2. 4 komposisi kimia Material GB5310	11
Tabel 2. 5 <i>Steel Category ASTM/ASME standard</i>	14
Tabel 2. 6 Mekanisme kegagalan <i>Boiler</i>	15
Tabel 2. 7 <i>ASME Boiler water guidelines</i>	26
Tabel 2. 8 Permasalahan dalam kegagalan komponen.....	33
Tabel 2. 9 kasus kegagalan material akibat perawatan komponen.....	33
Tabel 2. 10 penyebab kegagalan pada komponen.....	33
Tabel 4. 1 Spesifikasi material pada komponen <i>Boiler</i>	54
Tabel 4. 2 Batasan Kualitas Air dan Uap	55
Tabel 4. 3 Kualitas Air dan Uap Bulan November 2021	55
Tabel 4. 4 Thickness Pada pipa <i>fracture</i>	58
Tabel 4. 5 Hasil Uji Komposisi Kimia pada Pipa <i>fracture</i>	60
Tabel 4. 6 <i>Mechanical Properties Material 20G</i>	60
Tabel 4. 7 <i>Allowable deviation of outer diameter and wall thickness</i>	61
Tabel 4. 8 Hasil pengujian kekerasan.....	61
Tabel 4. 9 Nilai Kekuatan Tarik	63

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
Lampiran 1. Laporan Kerusakan	81
Lampiran 2. Diagram skema <i>Boiler</i> dan parameter normal operasi di beban Maksimal 50 MW	83
Lampiran 3. Skema Diagram <i>Main Steam Boiler</i> dan parameter normal operasi di beban Maksimal 50 MW	84
Lampiran 4. Line Pipa <i>Boiler</i>	85

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti	Keterangan
σ_L	<i>Longitudinal Stress</i>	Mpa
σ_H	<i>Hoop Stress</i>	Mpa
p	<i>Internal Pressure</i>	Mpa
D	<i>Diameter</i>	mm
T/t	<i>Thickness</i>	mm
OD	<i>Outside Diameter</i>	mm
ID	<i>Inside Diameter</i>	mm
TS	<i>Tensile Strength</i>	Mpa/Psi
YS	<i>Yield Strength</i>	Mpa/Psi
SCC	<i>stress cracking corrosion</i>	-
HB	<i>Hardness Brinnel</i>	-
HV	<i>Hardness Vicker</i>	-
DWD	<i>Deposit Weight Density</i>	-
LOI	<i>loss of ignition</i>	-
SEM	<i>Scanning electron microscope</i>	-
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>	-
TEM	<i>Transmission Electron Microscope</i>	-
CFB	<i>Circulated Fluidized Bed</i>	-

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Salah satu komponen utama pada PLTU adalah *Boiler*, dimana *Boiler* ini bekerja pada *temperature* dan *pressure* yang tinggi. *Temperature* kerja yang tinggi dalam waktu yang lama sangat beresiko menyebabkan terjadinya kegagalan material (Aini et al.). Penyebab kegagalan yang signifikan pada pipa superheater adalah *overheating*, kerusakan mulur, kelelahan termal, tekanan termal yang berlebihan, korosi air dan api, erosi, dll (Gupta & Chattopadhyaya, 2017). *Overheating* kebanyakan disebabkan oleh pendinginan pipa tidak memadai karena terhalangnya laju aliran uap internal, penebalan oksida, atau perawatan termomekanis selama perawatan dan pemasangan pipa (Dehnavi et al., 2017).

Kegagalan material pada komponen *Boiler* secara umum 30% disebabkan oleh *creep* (Jones, 2004), dan 35% disebabkan oleh *overheating* (Shokouhmand et al., 2015). Pada salah satu pembangkit X kegagalan pipa *Boiler* disebabkan oleh kerak hasil oksidasi yang menempel pada permukaan luar dan dalam pipa sehingga menyebabkan pipa mengalami *long term overheating* (Aini et al.). Paparan panas terus – menerus mengakibatkan material mengalami perubahan fasa sehingga mempengaruhi kekuatan material sehingga mudah terkorosi (Antono, 2014). Pelunakan yang terjadi akibat *temperature* dan *pressure* yang tinggi menyebabkan material cepat mengalami erosi oleh fluida yang mengalir di dalam pipa sehingga menyebabkan penipisan pada dinding pipa, berkurangnya ketebalan pada dinding pipa mengakibatkan pipa tidak bisa lagi menahan beban kerja dan akhirnya terjadi kegagalan (Fahrizal, 2013).

Air *Boiler* juga memiliki peran penting terhadap terjadinya permasalahan pada *Boiler*, dimana kualitas air sangat berpengaruh terhadap permasalahan *Boiler*. Kualitas air yang buruk dapat menyebabkan deposit. Deposit merupakan salah satu penyebab terjadinya *overheating* pada pipa *superheater* dimana deposit yang terdapat di dalam pipa menyebabkan laju *steam* terhambat sehingga perpindahan panas jadi lambat (Permana, 2014).

Dimana pada salah satu unit *Boiler* di PLTU Barru mengalami kegagalan berupa kebocoran pipa *Superheater* pada *Boiler*, kegagalan ini sangat berdampak besar terhadap kinerja *Boiler* yang mengakibatkan penurunan *temperature* dan *pressure Steam* di *Boiler* sehingga *temperature* dan *pressure* tidak tercapai. Penurunan *temperature* dan *pressure* yang terjadi mengakibatkan pembangkit *shutdown* / berhenti beroperasi secara keseluruhan karena proses untuk menggerakkan turbin tidak bisa tercapai karena penurunan *temperature* dan *pressure* pada *steam*. Akibatnya berdampak pada kurangnya suplai listrik yang diberikan kepada masyarakat dan akan terjadi kerugian ekonomi bagi perusahaan (Yue, 2012).

Kegagalan pipa *superheater* dapat muncul dari berbagai penyebab seperti: desain, komposisi material, kualitas air, dan kondisi pengoperasian yang tidak tepat (Shokouhmand et al., 2015), sehingga kasus kegagalan ini menjadi dasar pembuatan penelitian ini, dari hasil penelitian ini akan digunakan sebagai data rekomendasi perbaikan perawatan dan pengoperasian pada *Boiler*.

1.2. Rumusan Masalah

Masalah yang terjadi dan diidentifikasi pada penelitian ini adalah:

1. Faktor apa yang menyebabkan terjadinya kegagalan dan bagaimana mekanisme kegagalan material pada pipa *Superheater*?
2. Bagaimana tindakan yang harus dilakukan agar tidak terjadi lagi kegagalan material dengan mekanisme yang sama?

1.3. Batasan Masalah

Untuk menentukan penyebab kegagalan yang terjadi pada pipa *Superheater*, maka diterapkan suatu metodologi analisis terpadu melalui pengujian-penjujian sampel material yang mengalami kegagalan di laboratorium. Secara garis besar ruang lingkup penelitian adalah sebagai berikut:

1. Melakukan uji *metalografi* / mikrostruktur sampel material
2. Melakukan analisis komposisi kimia material
3. Melakukan uji kekerasan material
4. Melakukan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

5. Melakukan pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)
6. Analisis *Fraktografi* dan visual kondisi kegagalan yang terjadi

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian analisa kegagalan material *Superheater* adalah:

1. Untuk mengetahui dan menganalisa faktor penyebab kegagalan serta mekanisme kegagalan material yang terjadi pada pipa *Superheater*.
2. Memberikan rekomendasi yang tepat agar tidak terjadi lagi kegagalan Material dengan mekanisme yang sama dikemudian hari

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan agar diperoleh dan memberikan manfaat yaitu:

1. Manfaat bagi penulis
Manfaat penelitian ini untuk penulis adalah sebagai penambah wawasan serta dapat dijadikan pedoman untuk dapat menghadapi masalah kegagalan material yang sering terjadi di banyak pembangkit.
2. Manfaat bagi perusahaan
Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan dan referensi buat perusahaan untuk meminimalisir terjadinya kegagalan material yang sama dikemudian hari.
3. Manfaat bagi pembaca
Bagi pembaca diharapkan dapat memahami dan mengaplikasikan ilmu yang terdapat pada penelitian ini sebagai alat bantu untuk penelitian lain yang terkait dengan kegagalan material dikemudian hari.
4. Manfaat bagi Universitas
Penelitian ini akan menjadi sumber referensi akademis dalam hal pengembangan Teknik Mesin Universitas Hasanuddin

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Teori *Boiler*

Boiler adalah mesin kalor yang mengkonversi energi kimia menjadi energi gerak. *Boiler* atau ketel uap adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan steam. Steam diperoleh dari air yang dipanaskan di dalam bejana, bahan bakar untuk memanaskan air pada *Boiler* bermacam-macam dari yang populer batubara dan minyak bakar, listrik, gas, biomasa, nuklir dan lain-lain. *Boiler* mengubah energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja.

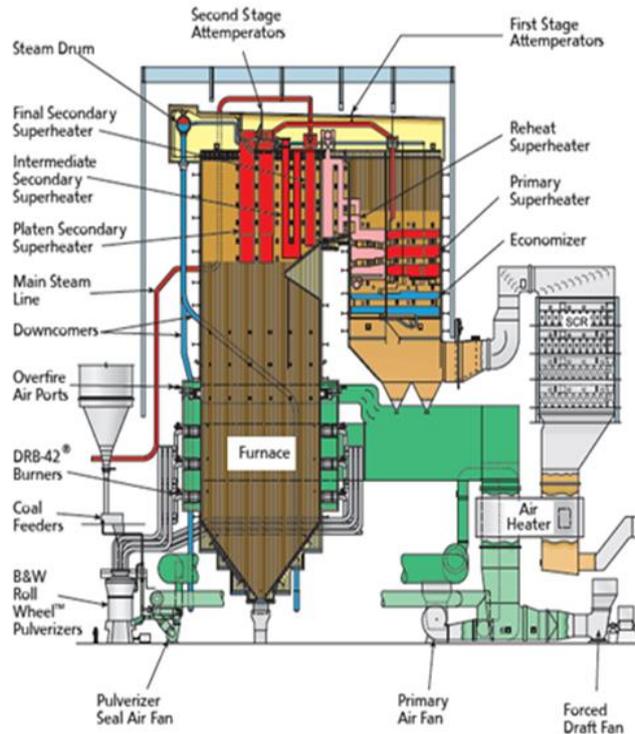
Pada umumnya *Boiler* merupakan bejana tertutup yang dilengkapi dengan *tube – tube*, baik *tube* api maupun *tube* air. Air yang bersirkulasi didalam *tube –tube* melewati dinding ruang bakar kemudian dipanaskan. Kemudian air yang telah dipanaskan tersebut mengalir menuju *Boiler* drum melalui *riser wall tube* untuk menghasilkan uap yang masih tercampur dengan air (uap basah). Campuran air dan uap ini kemudian dipisahkan menggunakan separator. Uap dan air yang telah terpisah kembali melewati proses lanjutan dimana air akan kembali ke drum untuk kemudian di panaskan lagi di ruang bakar sedangkan uap akan melewati *steam separators* untuk menjadi uap kering, uap kering ini akan melewati beberapa komponen seperti reheater dan *superheater* untuk menaikkan temperature uap sebelum masuk ke turbin.

2.1.1. Jenis – jenis *Boiler*

Secara prinsip kerja *Boiler* di klasifikasikan beberapa jenis *Boiler* antara lain:

1. *Pulverized Coal Boiler*

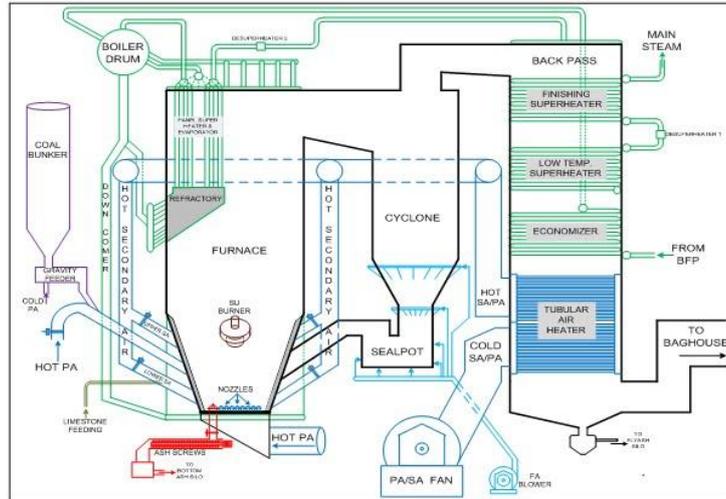
Boiler ini merupakan type *Boiler* yang paling banyak digunakan di pembangkit listrik karena memiliki banyak kelebihan. Kelebihan *Boiler* jenis ini seperti respon terhadap pengaturan pembebasan cepat, menggunakan bahan bakar batubara dari berbagai kualitas baik yang kualitas rendah samapai kualitas yang tinggi.



Gambar 2. 1 *Pulverized Coal Boiler*

2. *Circulated Fluidized Bed Boiler*

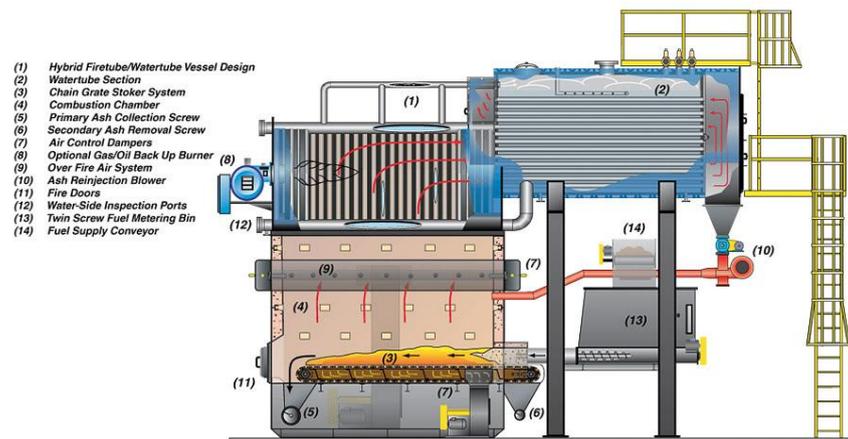
Boiler jenis ini menggunakan proses aliran (*fluidized*) berupa material bed dalam pembakarannya, material bed tersebut disembur dengan udara bertekanan tinggi dari *Primary Air Fan* sehingga batu bara dan material bed tetap melayang didalam *furnace*. *Furnace* berfungsi sebagai ruang bakar dimana pada *furnace* terdapat komponen seperti *wall tubu*, panel *superheater*, dan panel *evaporator*. Sisa batu bara yang belum habis terbakar bersirkulasi menuju *cyclone* yang berfungsi untuk memisahkan batu bara yang belum terbakar dengan abu (*ash*), batubara yang belum terbakar akan diteruskan ke *furnace* untuk kembali dibakar. Komponen utama *cyclone* terdiri dari *sealpot* dan *sealpot dutch*. Gas dari hasil pembakaran akan menuju ke *back pass* yang berfungsi sebagai tempat pemanfaatan panas dari gas buang / *flue gas*. *Back pass* sendiri terdiri dari komponen *Economizer*, *finishing superheater*, *low temperature superheater*, dan *tubular air heater*.



Gambar 2. 2 *Circulated Fluidized Bed Boiler*

3. *Stoker Fired Boiler*

Prinsip kerja jenis *Boiler* ini dimana *garate* yang bergerak sepanjang tungku sebagai tempat pengumpulan batu bara, batu bara akan habis terbakar sebelum jatuh dari ujung *grate*, *grate* juga berfungsi untuk mengatur kecepatan batu bara yang diumpungkan ketungku dengan mengendalikan ketebalan batubara. Untuk menghasilkan pembakaran yang bersih dan jumlah karbon yang terbakar seminimal mungkin maka dibutuhkan keterampilan dalam mengatur kecepatan *grate* dan pengaturan damper udara pada jenis *Boiler* ini.

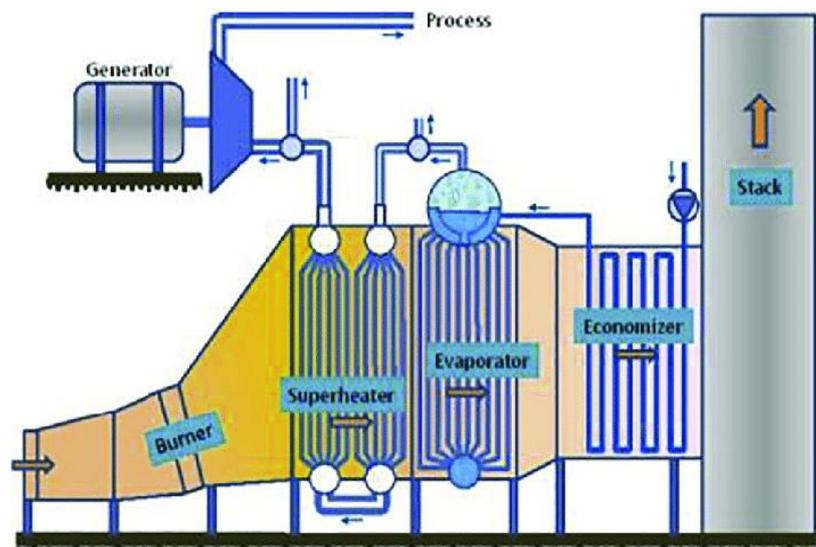


Gambar 2. 3 *Stoker Fired Boiler*

4. *Heat Recovery Steam Generator*

Pada *Boiler* jenis HRSG untuk memanaskan air yang berada dalam *tube* menjadi uap air bertekanan dengan memanfaatkan gas bekas / buang

dari turbin. Selanjutnya flue gas yang temperaturnya masih tinggi digunakan untuk memanaskan peralatan seperti *economiser*, *preheater* dan *superheater* sama dengan *Boiler* jenis lain dimana panas dari flue gas dimanfaatkan sebelum keluar menuju cerobong. Tidak jauh berbeda dengan jenis *Boiler* lain pada industri Pemilihan perlengkapan pada *Boiler* jenis ini dari segi perancangan harus memperhatikan penataan yang berkaitan dengan instalasi pembangkit listrik



Gambar 2. 4 *Heat Recovery Steam Generator*

2.1.2. *Superheater*

Superheater adalah komponen heat exchanger pada *Boiler* yang berfungsi untuk menaikkan *temperature steam* jenuh menjadi *steam* panas lanjut dan menjaga *temperature steam* sebelum masuk ke turbin dengan cara memanfaatkan panas sisa dari gas buang / flue gas hasil pembakaran. Akibat kerja pada *temperature dan pressure* yang tinggi ditambah dengan paparan panas secara terus menerus membuat komponen *superheater* sangat beresiko mengalami kegagalan.



Gambar 2.5 *Tube Superheater*

Ada beberapa kondisi yang menyebabkan komponen *superheater* mengalami kegagalan baik secara mekanikal maupun kimia. Kerusakan *tube superheater* pada beberapa kasus kebanyakan disebabkan oleh deposit. Pada titik kerusakan, endapan oksida magnetik merupakan tanda yang jelas bahwa logam *tube* telah teroksidasi. Logam bereaksi langsung dengan uap untuk membentuk oksida besi magnetik dan melepaskan hidrogen selama *overheating*, ketika suhu logam melebihi suhu desain.

Oksidasi dapat terjadi ketika panas yang masuk melebihi batas operasi atau laju aliran uap melalui *tube* melambat. Pembatasan dapat disebabkan oleh kondisi umum selama transisi *start-up* ke *shutdown* jika aliran uap tidak mencukupi. Jika tindakan pencegahan yang tepat tidak dilakukan untuk mencegah kegagalan *tube superheater* selama transisi, hal ini dapat terjadi. Kondisi *overheating* dapat terjadi selama aktivitas beban rendah ketika pengangkutan uap basah yang memadai di sepanjang jalur yang berkumpul di *header* belum tercapai.

Sebagai akibat dari uap yang memasukkan terlalu banyak padatan ke dalam air ketel, endapan garam terlarut dapat terbentuk di saluran masuk *superheater*. Akibatnya, aliran *tube* mungkin melambat. Namun, *overheating* dan kerusakan oksidasi langsung dapat terjadi di area yang terpisah dari penyumbatan, seperti bagian bawah tumpukan atau area garis yang paling panas. Kadang-kadang terlihat sangat jelas item oksidasi di daerah panas dan endapan garam di daerah *inlet*. Sebagian besar waktu, deposit garam natrium didapatkan di bagian "panas" bersama dengan

produk oksidasi. Ada sedikit keraguan bahwa masalah ini disebabkan oleh *carryover*.

Kontrol suhu tungku yang buruk selama *start-up* dan *shutdown* biasanya menghasilkan endapan yang tebal dan pelepuhan dengan bukti kegagalan mulur pada *superheater* yang sering terjadi *overheating*. Ketika aliran dibatasi untuk waktu yang singkat dan suhu *tube superheater* dengan cepat mendekati suhu aliran plastik, *tube* air akan cepat rusak.

2.2. Dasar Pemilihan Material *Boiler*

2.2.1. Pemilihan material *Boiler* berdasarkan area

Pada setiap area yang ada di *Boiler* memiliki kondisi lingkungan, temperature, tekanan yang berbeda-beda. maka dari itu diperlukan konsep pemilihan material dan standar material yang akan digunakan pada setiap area pada *Boiler*. Dalam memilih bahan yang akan digunakan, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, yaitu :

1. Aspek dan pengaruh lingkungan
2. Perpatahan pada temperatur tinggi
3. Deformasi temperatur dan tahanan tinggi
4. Intabilitas plastis pada temperature tinggi

Mekanisme deformasi dan perpatahan yang mungkin terjadi saat beroperasi pada suhu tinggi menjadi perhatian utama saat memilih dan merancang setiap komponen di area suhu tinggi, di mana logam dan paduan biasanya berfungsi sebagai bahan utama.

Hasilnya, tabel 2.1 merinci pemilihan dan penerapan bahan komponen *Boiler* standar di setiap area *Boiler*. Dilihat dari tabel 2.1 pemilihan Material untuk komponen *Superheater* paling banyak didominasi dengan material yang mengandung unsur paduan dari chromium (Cr) dan molybdenum (Mo).

Tabel 2. 1 Standar Material *Boiler*

Steel grade	Compositions	Our own developed steel	Applicable Standards (abbreviation)				Application						
			ATSM (U.S.)	EN (U.K.)	DIN (DE)	JIS (JP) Thermal power standard (T)	(1)Economizer tube	(2)Evaporator	(3)Superheater tube	(4)Reheater tube	(5)Main steam tube	(6)Reheat pipe	(7)Feed water heater tube
High chrome ferritic steel	9Cr-1Mo		T9 P9		X12CrMo91	STBA26 STPA26							
	HCM9M* (9Cr-2Mo)	○	—	—	—	STBA27 STPA27							
	9Cr-1Mo-V-Nb		T91 P91	—	X10CrMoV Nb9-1	KA-STBA28 KA-STPA28							
	NF616 (9Cr-1.8W-V-Nb)	○	T92 P92 (ASME CC2179)	VdTÜV 552/2	X10CrWMoV Nb9-2	KA-STBA29 KA-STPA29							
	HCM12A* (11Cr-0.3Mo-2W-V-Nb)	○	T122 P122 (ASME CC2180)		—	KA-SUS410J3TB KA-SUS410J3TP KA-SUS410J3DTB							
	HCM12* (12Cr-1Mo-1W-V-Nb)	○	—	VdTÜV 510/2	—	KA-SUS410J2TB							
	12Cr-1Mo-0.3V			—	X20CrMoV121								
Austenitic stainless steel	18Cr-8Ni		TP304 TP304H		X5CrNi89 X6CrNi1810	SUS304 SUS304H							○
	18Cr-8Ni-Ti		TP321 TP321H		X6CrNiTi189 X8CrNiTi1810	SUS321 SUS321H							
	18Cr-8Ni-Nb		TP347, TP347H TP348, TP348H		X6CrNiNb189	SUS347 SUS347H							
	TP347HFG (18Cr-11Ni-0.6Nb)	○	TP347HFG	VdTÜV 547/2	X8CrNiNb1811								
	SUPER304H™ (18Cr-9Ni-3Cu-V-Nb)	○	UNS 30432 (ASME CC2328)	VdTÜV 550/2	X10CrNiCuNb 189	KA-SUS304J1HTB							
	XA704 (18Cr-9Ni-2W-V-Nb-N)	○	UNS S34705 (ASME CC2475)	VdTÜV 554/2		KA-SUS347J1TB							
	16Cr-14Ni-2.5Mo		TP316 TP316H		X5CrNiMo 17132	SUS316 SUS316H							
	NF709 (22Cr-25Ni-1.5Mo-Nb-N)	○	TP310MoCbN (ASME CC2581)	VdTÜV 563/2	X6CrNiMo 17132	KA-SUS310J2TB							
	HR3C (25Cr-20Ni-Nb-N)	○	TP310HCbN (ASME TP310HCbN)	VdTÜV 546/2	X8CrNiNbN 2620	KA-SUS310J1TB							
	YUS™170	○				KA-SUS309J1TB							
MN25*	○	TP309LMoN (ASME CC2639)			KA-SUS309J3TB								
Sulfuric acid corrosion-resistant steel	S-TEN™1 (0.3Cu-0.1Sb)	○	A423, Gr.3 (ASME CC2494)			KA-STB380J2	○ (Economizer and air preheater)						
	CR1A (1.25Cr-0.3Cu)	○				KA-STBA10	○ (Economizer and air preheater)						
Carbon steel	0.15-0.25C		A53-Gr.A, B A106-Gr.A, B A178-Gr.A, C A192 A210-Gr.A-1		S145 S145.4 S145.8 C22	STB340(STB35) STB410(STB42) STB510(STB52) STPT370(STPT38) STPT410(STPT42)							
	0.25-0.35C		A106-Gr.C A210-Gr.C		S155 S155.4	STPT480(STPT49)							○ ○
Low-alloy steel	0.3-0.5Mo		T1, T1a P1		15Mo3 16Mo5	STBA12, 13 STPA12							○
	0.5Cr-0.5Mo-V				14MoV63								
	0.5Cr-0.5Mo		T2 P2			STBA20 STPA20							
	1Cr-0.5Mo		T12 P12		13CrMo44	STBA22 STPA22							
	2.25Cr-1Mo		T22 P22		10CrMo910	STBA24 STPA24							
HCM2S™* (2.25Cr-1.6W-V-Nb)	○	T23 P23 (ASME CC2199)	—	—	KA-STBA24J1 KA-STPA24J1								

2.2.2. Unsur Kimia Pada Material *Boiler*

Bahan diperlukan untuk kondisi kerja yang ekstrem, seperti beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi. Akibatnya, pemilihan material untuk setiap komponen *Boiler* harus tepat. Selain itu, komposisi kimia material sangat berpengaruh terhadap kondisi operasi *Boiler*, sehingga diperlukan standar material untuk setiap komponen *Boiler*. Susunan kimia standar bahan ditunjukkan pada Tabel 2.2. Selain

itu, komposisi kimia bahan untuk aplikasi *tube* dan *tube* baja tahan karat suhu tinggi dan tekanan tinggi digambarkan pada tabel 2.3.

Tabel 2. 2 Komposisi kimia material *Boiler*

Chemical Composition:

Item	Grade	Standard	Chemical Composition (%)										
			C	Si	Mn	P≤	S≤	Cu≤	Ni≤	Cr	Mo	V	Other
1	10	GB3087	0.07-0.13	0.17-0.37	0.35-0.65	0.035	0.035	0.25	0.3	≤0.15	-	-	
2	20	GB3087	0.17-0.23	0.17-0.37	0.35-0.65	0.035	0.035	0.25	0.3	≤0.25	-	-	
3	20G	GB5310	0.18~0.23	0.17~0.35	0.50~0.65	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	≤0.10	≤0.08	Al≤0.015
4	20MnG	GB5310	0.18~0.23	0.17~0.35	0.75~0.95	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	≤0.10	≤0.08	
5	25MnG	GB5310	0.23~0.27	0.17~0.35	0.75~0.95	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	≤0.10	≤0.08	
6	12CrMoG	GB5310	0.09~0.14	0.17~0.35	0.45~0.65	0.02	0.01	0.15	0.2	0.45~0.65	0.42~0.52	≤0.08	
7	15CrMoG	GB5310	0.13~0.18	0.17~0.35	0.45~0.65	0.02	0.01	0.15	0.2	0.85~1.05	0.42~0.52	≤0.08	
8	12Cr1MoVG	GB5310	0.09~0.14	0.20~0.35	0.45~0.65	0.02	0.008	0.15	0.2	0.95~1.15	0.27~0.35	0.17~0.28	
9	P195GH	EN10216-2	0.08~0.13	0.17~0.35	0.35~0.60								Al: 0.020~0.050
10	P235GH	EN10216-2	0.10~0.16	0.17~0.35	0.45~0.65	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	≤0.08	≤0.02	Nb≤0.01, Ti≤0.03
11	P265GH	EN10216-2	0.15~0.20	0.17~0.35	0.45~0.65								Cu+Ni+Cr+Mo≤0.70
12	S135.8	DIN17175	0.10~0.16	0.17~0.35	0.45~0.65	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	≤0.10	≤0.08	
13	S45.8	DIN17175	0.15~0.20	0.17~0.35	0.45~0.65	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	≤0.10	≤0.08	
14	15Mo3	DIN17175	0.15~0.20	0.17~0.35	0.55~0.75	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	0.27~0.35	≤0.08	Al≤0.030
15	13CrMo44	DIN17175	0.12~0.17	0.17~0.35	0.45~0.65	0.02	0.01	0.2	0.2	0.80~1.00	0.47~0.57	≤0.08	Al≤0.030
16	A106C	ASTMA106M	0.20~0.25	0.17~0.35	1.10~1.30	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	≤0.10	≤0.08	CE≤0.50
17	A192	ASTMA192M	0.07~0.13	0.10~0.25	0.35~0.55	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	≤0.10	≤0.08	
18	A210C	ASTMA210M	0.20~0.25	0.17~0.35	0.70~0.90	0.02	0.01	0.2	0.2	≤0.25	≤0.10	≤0.08	
19	T1	ASTMA209M	0.13~0.18	0.17~0.35	0.40~0.60	0.02	0.01	≤0.15	≤0.20	≤0.25	0.47~0.57	≤0.08	
20	T1a	ASTMA209M	0.17~0.23	0.17~0.35	0.40~0.60	0.02	0.01	≤0.15	≤0.20	≤0.25	0.47~0.57	≤0.08	
21	T2	ASTMA213M	0.13~0.18	0.10~0.30	0.35~0.55	0.02	0.01	≤0.15	≤0.20	0.55~0.75	0.47~0.57	≤0.08	
22	T5	ASTMA213M	0.09~0.14	0.20~0.40	0.35~0.55	0.02	0.01	≤0.15	≤0.20	4.40~5.60	0.47~0.57	≤0.08	
23	T9	ASTMA213M	0.09~0.14	0.30~0.60	0.35~0.55	0.02	0.01	≤0.15	≤0.20	8.20~9.00	0.92~1.05	≤0.08	Al≤0.020
24	T11	ASTMA213M	0.09~0.14	0.60~0.90	0.35~0.55	0.02	0.01	≤0.15	≤0.20	1.10~1.40	0.47~0.57	≤0.08	Al≤0.020
25	T12	ASTMA213M	0.09~0.14	0.20~0.40	0.35~0.55	0.02	0.01	≤0.15	≤0.20	0.90~1.10	0.47~0.57	≤0.08	Al≤0.020
26	T22	ASTMA213M	0.09~0.14	0.20~0.40	0.40~0.55	0.02	0.01	≤0.15	≤0.20	2.10~2.40	0.92~1.05	≤0.08	Al≤0.020
27	T23	ASTMA213M	0.05~0.09	0.20~0.40	0.30~0.50	0.017	0.008	≤0.15	≤0.20	2.00~2.40	0.10~0.25	0.22~0.30	W: 1.50~1.70 Ti: 0.035~0.060 Nb: 0.030~0.070 B: 0.001~0.005 Ti/Nb≥3.5, Al≤0.025

Tabel 2. 3 Komposisi kimia *Austenitic stainless steel*

Chemical Composition of Austenitic Stainless Steel Tubes and Pipes for Pressure Purposes and High Temperatures

Standard Designation	Grade, Class, Type, Symbol or Name	Steel Number	UNS Number	Weight, %, max. Unless Otherwise Specified										
				C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Others		
ASTM A 213/A 213M-03a	TP304	---	S30400	0.08	2.00	0.75	0.040	0.030	0.030	18.0-20.0	8.00-11.0	---	---	
ASTM A 249/A 249M-03	TP304	---	S30400	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	0.030	18.0-20.0	8.0-11.0	---	---	
ASTM A 312/A 312M-03	TP304	---	S30400	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	0.030	18.0-20.0	8.0-11.0	---	---	
ASTM A 358/A 358M-01	304	---	S30400	0.08	2.00	0.75	0.045	0.030	0.030	18.0-20.0	8.0-10.5	---	N 0.10	
ASTM A 376/A 376M-02a	TP304	---	S30400	0.08	2.00	0.75	0.045	0.030	0.030	18.0-20.0	8.00-11.0	---	---	
ASTM A 409/A 409M-01	TP304	---	S30400	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	0.030	18.0-20.0	8.00-11.0	---	---	
ASTM A 688/A 688M-03	TP304	---	S30400	0.08	2.00	0.75	0.040	0.030	0.030	18.00-20.00	8.00-11.00	---	---	
JIS G 3459-1997	SUS304TP	---	---	0.08	2.00	1.00	0.040	0.030	0.030	18.00-20.00	8.00-11.00	---	---	
JIS G 3463-1994	SUS304TB	---	---	0.08	2.00	1.00	0.040	0.030	0.030	18.00-20.00	8.00-11.00	---	---	
JIS G 3467-1988	SUS 304 TF	---	---	0.08	2.00	1.00	0.040	0.030	0.030	18.00-20.00	8.00-11.00	---	---	
JIS G 3468-1994	SUS304	---	---	0.08	2.00	1.00	0.045	0.030	0.030	18.00-20.00	8.00-10.50	---	---	
BS 3605-1:1991 AMD 2:1997	304S31	---	---	0.070	2.00	1.00	0.040	0.030	0.030	17.00-19.00	8.00-11.00	---	---	
BS 3605-2:1992 AMD 1:1997	304S31	---	---	0.070	2.00	1.00	0.04	0.03	0.03	17.00-19.00	8.00-11.00	---	---	
DIN 17457:1985	X 5 CrNi 18 10	1.4301	---	0.07	---	---	---	---	---	17.0-19.0	8.5-10.5	---	---	
DIN 17458:1985	X 5 CrNi 18 10	1.4301	---	0.07	---	---	---	---	---	17.0-19.0	8.5-10.5	---	---	
DIN 28180:1985	X 5 CrNi 18 10	1.4301	---	0.07	---	---	---	---	---	17.0-19.0	8.5-10.5	---	---	
DIN 28181:1985	X 5 CrNi 18 10	1.4301	---	0.07	---	---	---	---	---	17.0-19.0	8.5-10.5	---	---	
AFNOR NF A 49-217:1987	TU Z 6 CN 18 09	---	---	0.080	2.00	1.00	0.040	0.030	0.030	17.00-20.00	8.00-11.00	---	---	
AFNOR NF A 49-244:1993	X7CrNi18-9	---	---	0.070	2.00	0.75	0.040	0.015	0.015	17.0-19.0	8.0-10.0	---	---	
AFNOR NF A 49-247:1981	TS Z 6 CN 18-09	---	---	0.080	2.00	1.00	0.040	0.030	0.030	17-20.0	8-11.00	---	---	
ISO 2604-II:1975	TS 47	---	---	0.07	2.00	1.00	0.045	0.030	0.030	17.00-19.00	8.00-12.00	---	---	
ISO 2604-V:1978	TW 47	---	---	0.07	2.00	1.00	0.045	0.030	0.030	17.00-19.00	8.00-11.00	---	---	

Tabel 2. 4 komposisi kimia Material GB5310

Standard	Trademark	Chemical Composition									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	V
GB5310	20G	0.17~0.24	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.030	≤0.030	/	/	≤0.20	≤0.25	/
	20MnG	0.17~0.24	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.030	≤0.030	/	/	≤0.20	≤0.25	/
	15MoG	0.12~0.18	0.17~0.37	0.40~0.80	≤0.030	≤0.030	/	0.25~0.35	≤0.20	≤0.30	/
	15CrMoG	0.12~0.18	0.17~0.37	0.40~0.70	≤0.030	≤0.030	0.80~1.10	0.40~0.55	≤0.20	≤0.30	/
	12Cr2MoG	0.08~0.15	≤0.50	0.40~0.70	≤0.030	≤0.030	2.00~2.50	0.90~1.20	≤0.20	≤0.30	/
	12Cr1MoVG	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	≤0.030	≤0.030	0.90~1.20	0.25~0.35	≤0.20	≤0.30	0.15~0.35

2.2.3. Pengaruh Unsur Paduan Pada Material *Boiler*

Sifat dan karakteristik baja dapat diubah dengan menambahkan elemen paduan apa pun. Perluasan komponen paduan baja untuk tujuan yang berbeda termasuk:

1. Meningkatkan hardenability baja untuk meningkatkan sifat mekaniknya.
2. Mempertahankan kekuatan dan keuletan sambil menaikkan suhu tempering.
3. Meningkatkan sifat mekanik pada suhu rendah dan tinggi.
4. meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dan korosi pada suhu tinggi.
5. Meningkatkan sifat khusus seperti ketahanan terhadap kelelahan dan ketahanan aus.

Berikut ini adalah beberapa unsur paduan yang umum terdapat pada komponen material pada *Boiler* dan pengaruh dari unsur paduan tersebut. Material yang banyak digunakan pada pembangkit listrik dan industri paling banyak mengandung unsur paduan chromium (Cr) dan molybdenum (Mo) dan banyak terdapat pada komponen material, salah satunya pada *tube superheater*.

1. Chromium (Cr)

Sifat fisik baja sangat dipengaruhi oleh unsur kromium (Cr). Chromium dapat membantu baja mengeras dan menaikkan titik didihnya pada saat yang bersamaan dengan ditambahkan ke dalamnya. Komponen ini juga dapat meningkatkan kekuatan baja terhadap keausan dan karat. Baja memiliki kandungan kromium antara 10,5 – 13 %, menjadikannya baja tahan karat. Bagaimanapun, jika kandungan kromium yang berlebihan, itu dapat mengurangi daya tahan baja, menyebabkannya mudah pecah.

2. Molybdenum (Mo)

Senyawa pembentuk karbida yang tersusun dari karbon dan unsur dengan nilai keelektronegatifan rendah disebut unsur molibdenum (Mo). Biasanya, kromium (Cr), nikel (Ni), dan vanadium (V)

ditambahkan ke molibdenum. Kekuatan tarik baja dan ketahanan panas keduanya akan meningkat sebanding dengan kandungan molibdenumnya. Namun, kemampuan tempa baja akan berkurang jika kandungan molibdenum terlalu tinggi.

3. Mangan (Mn)

Mangan (Mn) merupakan unsur yang hampir identik dengan Si. Ini dapat ditemukan di semua bahan besi dan sering ditambahkan ke beberapa bahan, seperti baja yang dikeraskan dengan mangan, yang mengandung 13% mangan. Sifat-sifat ditingkatkan dengan penambahan unsur mangan seperti sifat: Kekerasan, daya tahan, ketahanan aus, dan penguatan selama pembentukan dingin juga mengurangi kemampuan material untuk mengelupas.

4. Nikel (Ni)

Ini adalah elemen paduan baja yang, jika hadir sebagai paduan, dapat dilas, disolder, dan dikerjakan dengan mesin hingga pengamplasan halus, dibentuk dalam kondisi dingin atau panas, dipoles, dan dimagnetisasi, di antara kemampuan lainnya. Selain itu kekuatan bertambah, keuletan, pengerasan sempurna, ketahanan terhadap karat, dan ketahanan listrik (untuk kawat pemanas). Juga lebih rendah: kecepatan pendinginan; regangan panas.

5. Vanadium (V)

Vanadium (V) adalah elemen yang, jika digabungkan dengan baja, akan memiliki efek yang sebanding dengan molibdenum (Mo); satu-satunya perbedaan adalah bahwa itu tidak mengurangi tekanan pada baja. Pada perlakuan panas, penambahan vanadium menaikkan suhu pijar, kekuatan, keuletan, dan kekuatan panas. Dan menurunkan: kepekaan terhadap sengatan panas selama perlakuan panas

6. Wolfram (W)

Ini adalah salah satu komponen dalam logam paduan untuk persiapan penanganan cepat dan logam keras, karena titik pelunakannya yang tinggi dapat digunakan untuk serat dan logam keras. Elemen paduan ini memiliki potensi untuk meningkatkan kekerasan, kekuatan, batas

rentang, kekuatan panas, ketahanan normalisasi, dan kekuatan tarik. Dan juga sedikit mengurangi regangan baja.

7. Kobalt (Co)

Ini adalah komponen yang ditambahkan ke baja yang paling keras dan paling cepat diproses. Sifat paduan ini meningkatkan: kekerasan, ketahanan aus, ketahanan karat, ketahanan panas, konduktivitas listrik, dan kejenuhan magnetis

8. Titanium (Ti)

Karena mempertahankan sifatnya hingga 400 °C dan memiliki kekuatan yang sama dengan baja, sering digunakan sebagai paduan dalam kawat las. Properti Titanium karbida memiliki kekerasan tinggi dan titik cair yang tinggi karena merupakan komponen logam keras.

Tabel 2. 5 *Steel Category ASTM/ASME standard*

Steel category	ASTM / ASME standard	
	Steel Plate	Steel Pipe
0.5%Mo steel	A204 Gr. A,B,C A336 Gr.F1	A209 Gr.T1 A335 Gr.P1
0.5%Cr-0.5%Mo steel	A387 Gr.2 Cl.1,2	A213 Gr.T2 A335 Gr.P2
1.25%Cr-0.5%Mo steel	A387 Gr.12 Cl.1,2 A387 Gr.11 Cl.1,2 A336 Gr.F11	A213 Gr.T11,12 A335 Gr.P11,12 A182 Gr.F11
2.25%Cr-1.0%Mo steel	A387 Gr.22 Cl.1,2 A336 Gr.F22	A213 Gr.T22 A335 Gr.P22 A182 Gr.F22
5.0%Cr-0.5%Mo steel	A387 Gr.5 Cl.1,2	A335 Gr.P5
9.0%Cr-1.0%Mo steel	A387 Gr.9 Cl.1,2	A335 Gr.P9

2.3. Kegagalan Pada System *Boiler*

Agar peralatan penghasil uap (*Boiler*) berfungsi secara efektif dan andal, strategi yang paling efektif untuk mencegah korosi dan pembentukan kerak harus digunakan. Sangat penting untuk menentukan dengan tepat penyebab kerusakan *Boiler* sehingga tindakan pencegahan yang tepat dapat diambil jika terjadi kerusakan lain.

Terkadang sulit untuk mengatakan apa yang menyebabkan *Boiler* gagal. Untuk mengetahui penyebabnya, diperlukan penyelidikan segera. Namun, sebagian

besar area masalah menunjukkan tanda-tanda yang jelas dan spesifik. Penyebab dan langkah-langkah yang harus diambil untuk penanganan menjadi jelas ketika karakteristik ini diinterpretasikan dengan benar. Sesuai sumber penelitian dari divisi evaporator Alstom Power (McIntyre, 2002) kerusakan yang paling banyak terjadi pada *Boiler* adalah sebagai berikut;

Tabel 2. 6 Mekanisme kegagalan *Boiler*

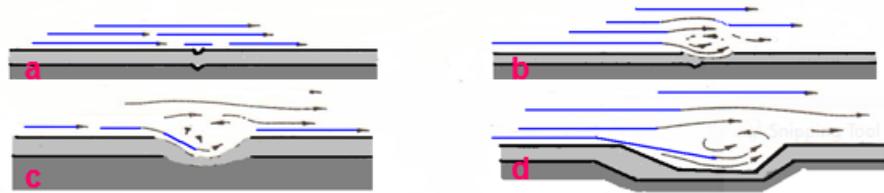
<i>Mechanism</i>	%
<i>Erosion</i>	23
<i>Corrosion fatigue</i>	10,5
<i>Thermal fatigue</i>	6
<i>Mechanical fatigue</i>	10,5
<i>SCC</i>	4
<i>Overheating</i>	44
<i>Other</i>	2

1. *Erosion*

Interaksi mekanis antara permukaan material dan cairan, cairan multi-komponen, cairan yang menempel, atau partikel padat yang menempel menyebabkan peristiwa kegagalan material yaitu erosi.

Proses erosi biasanya dipicu oleh abu atau debu, jelaga, terak jatuh, dan partikel pembakaran gas abrasif dalam aliran uap. Namun, sebagian besar kasus melibatkan partikel abu yang tersebar yang menempel pada *tube* ketel dan merupakan hasil dari uap yang disemprotkan dari jelaga. *Tube Boiler*, *tube* dinding air, turbin gas, sistem pengangkutan material padat, katup, dan nozel semuanya rentan terhadap erosi di industri pembangkit listrik tenaga uap.

Erosi *tube* ketel yang disebabkan oleh abu telah mendapat banyak perhatian. Dengan beban abu yang tinggi dan partikel abrasif serta kecepatan aliran gas lokal yang tinggi, erosi ini biasa terjadi. Setelah efek samping disintegrasi garis terjadi, sisi garis akan menjadi berbahaya. Hingga akhirnya terjadi kegagalan *tube* dengan pecahnya akibat erosi akibat peningkatan nilai regangan *tube*.



Gambar 2. 6 Mekanisme kegagalan erosi

2. *Fatigue*

Kerusakan material yang disebabkan oleh pemuatan berulang untuk waktu yang lama adalah *fatigue* atau kelelahan. Proses *fatigue* dapat dipecah menjadi tiga bagian dari perspektif desain, pengujian, dan analisis kegagalan:

- Permulaan retak (*initiation crack*)
- Penyebaran retak (*crack propagation*)
- Perpatahan akhir (*fracture failure*)



Gambar 2. 7 Fase Kegagalan *Fatigue*

Proses dimulainya patahan sebagian besar terjadi pada permukaan material yang lemah atau daerah di mana konsentrasi tekanan permukaan terjadi, seperti goresan, lubang, dan sebagainya, karena pembebanan yang terus menerus. Selain itu, awal retakan ini membentuk *microcracks*, perambatan atau perpaduan dari *microcracks* ini kemudian membentuk *macrocracks* yang akan memicu kegagalan. Maka dari itu bahan tersebut akan mengalami *last crack*, hal ini dikarenakan bahan tersebut telah mengalami pola regangan dan tahanan yang menimbulkan kerusakan yang berkepanjangan.

Pada dasarnya *fatigue* dimulai dengan terjadinya pecah pada lapisan luar material. Ini menunjukkan bahwa sifat kelelahan sangat peka terhadap

keadaan permukaan, yang dipengaruhi oleh beberapa variabel, termasuk kekerasan permukaan, perubahan sifat permukaan, dan tekanan sisa permukaan. Oleh karena itu, sejauh mungkin sangat bergantung pada sifat penyelesaian permukaan. Perawatan permukaan dapat mengubah kondisi permukaan dan tegangan yang tersisa pada permukaan. Perawatan permukaan yang menghasilkan tekanan sisa tekan akan menyebabkan obstruksi kelelahan yang diperluas, sedangkan perawatan permukaan yang menghasilkan tekanan sisa yang lentur akan mengurangi ketahanan *fatiguenya*.

Pada lapisan luar material terdapat pengelompokan tegangan tekan atau yang dapat ditelusuri yang paling tinggi. Jika kondisi permukaan mendapatkan tekanan yang dapat dikendalikan, sisa beban tekan pada permukaan, permukaan akan menghasilkan tegangan tekan resultan yang lebih besar. Tegangan tekan akan menekan dimulainya patahan, sehingga ketahanan *fatigue* meningkat, dan sebaliknya dengan asumsi bahwa ada sisa beban elastis pada permukaan yang dangkal. Area dasar patahan pada bagian atau logam yang terkena penumpukan dinamis atau siklik berada di tempat area yang memiliki kekuatan dasar serta di tanda area yang mengalami tekanan terbesar.

Kegagalan bagian atau desain dapat dipisahkan menjadi dua kelas utama. Pertama, kegagalan kuasi-statis, di mana ketahanan terhadap kegagalan dinyatakan dengan kekuatan dan tidak bergantung pada waktu. Kedua, kegagalan yang bergantung pada waktu (ketahanan terhadap kegagalan ditentukan oleh usia atau *life time*). Fraktur kelelahan, juga dikenal sebagai kelelahan logam, adalah kegagalan yang bergantung pada waktu.

Faktor-faktor yang mempengaruhi kelelahan pada logam:

1. Pembebanan

- Jenis beban: torsi, tekuk, dan uniaksial
- Pola beban: acak, periodik;
- beban besar (tegangan);
- frekuensi siklus beban

2. Kondisi material (ukuran, kekuatan, struktur mikro, permukaan akhir, ukuran komponen, penguatan regangan, penguatan larutan padat, dan penguatan fase kedua)
3. Proses fabrikasi (siklus proyeksi, proses pembentukan, proses pengelasan, proses pemesinan, proses perlakuan panas)
4. Suhu operasi
5. Kondisi lingkungan

3. *Corrosion Fatigue*

Dalam lingkungan korosif, perubahan tegangan yang berfluktuasi menyebabkan kelelahan korosi, yang mempercepat pertumbuhan retak awal dan perambatan retak pada logam. Salah satu alasan kegagalan *Boiler* adalah kelelahan korosi. Material dan desain *tube Boiler* berdampak signifikan terhadap kegagalan. Mekanisme kegagalan semacam ini berkaitan dengan kelelahan korosi, air yang mengandung larutan kimia korosif, kadar oksigen dalam air *Boiler*, dan operasi *Boiler*. Kondisi terjadinya kelelahan akibat erosi adalah iklim yang merusak, siklus beban yang berulang, dan beban sisa yang tinggi. Umur material bisa dipersingkat oleh banyak kegagalan yang diakibatkannya.

Lasan undercut, korosi pitting, atau cacat lain pada las yang menyebabkan tegangan tinggi adalah contoh kegagalan jenis ini, yang dimulai pada permukaan material. Lapisan yang dilindungi mulai retak akibat pembebanan siklik, yang menyebabkan retakan mikro dan serangan pada logam yang tidak dilindungi oleh media korosif pada fase awal. Perambatan retakan adalah proses dimana logam yang diserang pada akar retakan akan teroksidasi dan retak pada siklus berikutnya. Pola retaknya transgranular dan memiliki bentuk yang tajam.



Gambar 2. 8 Tube yang mengalami *corrosion fatigue*

4. *Thermal Fatigue*

Menurut ASM Handbook, Vol.11, 1986, p11, kelelahan termal didefinisikan sebagai patah atau kegagalan yang disebabkan oleh perubahan suhu yang signifikan yang mengakibatkan tekanan siklus pada struktur material. Kelelahan termal terjadi ketika struktur material suatu logam mengalami perbedaan pemuaian panas (ekspansi termal) selama beberapa siklus pemanasan dan pendinginan yang cepat. Kegagalan dapat terjadi dalam waktu kurang dari sepuluh siklus tergantung pada arah kejutan panas yang disertakan. Permukaan material dengan retakan mikro juga dipengaruhi oleh tegangan biaksial atau triaksial. Ketika ada break yang mendasarinya, itu akan berlanjut dengan spread untuk setiap siklus.

Internal Scale biasanya terbentuk di *tube* uap *Boiler*, menghalangi perpindahan panas dan kapasitas pendinginan. Kelelahan termal terjadi pada *tube* air *Boiler* ketika permukaan *tube* yang panas berulang kali dibasahi atau didinginkan, mengakibatkan kebocoran katup yang memungkinkan uap panas mengalir. Kegagalan aliran uap dapat mengakibatkan konsekuensi yang sangat serius. Retak pada kelelahan korosi dan retak pada kelelahan termal sangat mirip.



Gambar 2. 9 Tube yang mengalami *thermal fatigue*

5. *Stress Corrosion Cracking*

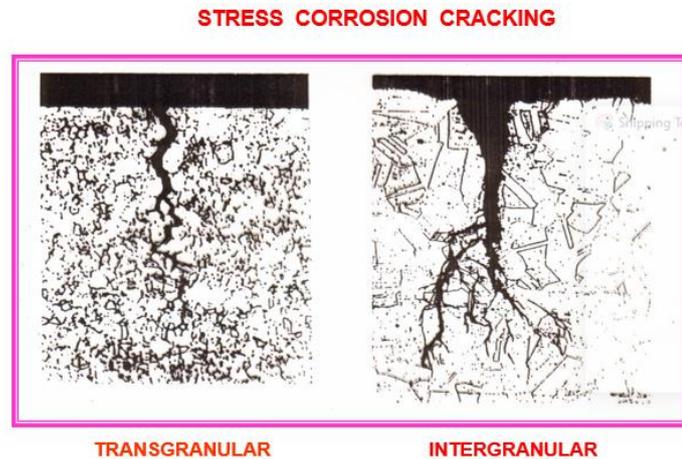
Tegangan tarik dan serangan dari lingkungan korosif adalah dua elemen yang membentuk mekanisme kegagalan material ini. Fraktur getas korosi ini, di mana material mengalami sedikit tekanan, adalah fitur yang membedakannya. Perpatahan getas terjadi di lokasi dengan cairan korosif dan tegangan tarik eksternal yang tinggi. Tegangan tarik dapat muncul dari tegangan yang diterapkan yang disebabkan oleh beban internal seperti ekspansi dan penarikan panas, atau dari sisa tekanan yang ditimbulkan oleh las atau gulungan. Kegagalan SCC selalu menghasilkan permukaan fraktur dengan dinding tebal. Area *water tube*, *Superheater tube*, *reheater tube*, dan komponen drum uap seperti baut merupakan lokasi kegagalan secara umum disebabkan oleh SCC.



Gambar 2. 10 Tube yang mengalami SCC

stress cracking corrosion dapat disebabkan oleh tiga kondisi simultan. Lingkungannya korosif, adanya paduan material alloy yang berpotensi

mengalami SCC, dan tegangan yang cukup tinggi. Bagian *tube Boiler* yang sering mengalami SCC adalah bagian dengan material baja temper Austenitik, misalnya *tube Superheater*. Perambatan retak *transgranular* atau *intergranular* dapat dihasilkan dari SCC di dalam *tube*.



Gambar 2. 11 SCC Transgranular dan Intergranular

6. *Overheating*

Salah satu penyebab paling umum dari kegagalan sistem *Boiler* adalah *overheating*. Hal ini terjadi saat menurun pendinginan pada material, biasanya karena endapan atau masalah dengan sistem operasi. Endapan komponen *Boiler* memperlambat laju pendinginan, menghasilkan panas material yang berlebihan. Ada dua bagian dari kegagalan ini:

a. *Short Term Overheating*

Overheating jangka pendek terjadi ketika suhu *tube* naik secara signifikan di atas batas desain (730°C) dalam waktu singkat. Ini menyebabkan kekuatan *tube* menurun sebelum lapisan oksida tumbuh secara signifikan. Sebagian besar kegagalan *Boiler* diakibatkan oleh pengoperasian di luar parameter desainnya. kondisi yang mengakibatkan panas berlebih parsial jangka pendek karena aliran cairan pendingin yang tidak memadai atau masukan panas yang berlebihan dalam kondisi yang tidak sesuai. Karena permukaan pecah pada ujung yang tipis, kegagalan yang disebabkan oleh *overheating* jangka pendek dikenal sebagai pola "mulut ikan".



Gambar 2. 12 Tube yang mengalami *short-term overheating*

Kegagalan *overheating* jangka pendek biasanya diakibatkan oleh: gangguan pada operasi *Boiler*, level air yang rendah, penyumbatan, gangguan pada aliran air, dan input panas yang berlebihan di sisi api. Dimana *Boiler* sering mengalami *overheating* jangka pendek: *Downcomer*, *superheater*, *reheater*, dan *water wall*. *Overheating* jangka pendek dapat terjadi selama *startup*, ketika aliran uap rendah, di *superheater* dan *reheater*.

b. Long Term Overheating

Kegagalan jenis *long term overheating* menyebabkan material gagal secara perlahan. Pengelupasan terak dan oksida yang disebabkan oleh ekspansi *tube* selama pengembangan dan tekanan yang diinduksi secara termal dapat mengindikasikan kegagalan yang disebabkan oleh panas berlebih yang berkepanjangan.

Tube dipaksa beroperasi di luar desain materialnya, yang mengakibatkan terjadinya mekanisme kegagalan ini. Struktur mikro kemudian mulai memburuk. Pearlite, lapisan struktur yang terdiri dari *Ferrite Iron Carbide* dan *Iron Carbide* (Fe_3C), menjadi tidak stabil saat suhu naik, mendorongnya mencari stabilitas. *Graphitizing* atau membuat besi karbida spheroids (*spheroidization*) adalah dua metode yang dapat digunakan untuk menstabilkan besi karbida. Degradasi yang terjadi akan ditentukan oleh suhu operasi yang harus di atas $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Menambahkan elemen lain seperti kromium dan molibdenum dapat meningkatkan toleransi material terhadap suhu. Spheroidisasi terjadi pada suhu yang lebih tinggi daripada grafitisasi. Waktu dan suhu di mana mekanisme terbentuk sangat penting. Kemudian timbul pada *tube* karena temperatur

yang tinggi, serta peningkatan nilai tegangan hingga akhirnya *tube* pecah (stress repture).

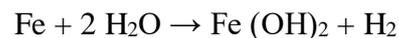


Gambar 2. 13 *Tube* yang mengalami *Long-term overheating*

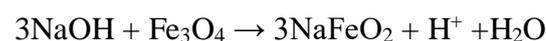
7. *Hydrogen Damage*

Reaksi korosi dengan PH rendah yang menghasilkan atom hidrogen dapat menyebabkan kerusakan hidrogen. Lapisan pelindung oksida besi magnetik, Fe_3O_4 , dihilangkan dengan NaOH . Atom hidrogen dilepaskan ketika besi bereaksi dengan air atau NaOH . Atom hidrogen yang berbeda berubah menjadi oksida besi, yang menghasilkan metana. Metana atau atom tidak dapat menghilangkannya, sehingga terdapat celah batas butir yang panjang dengan ujung yang tebal. Berikut penjelasan mekanisme *hydrogen damage*:

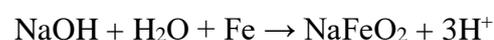
- a. sebuah Lapisan pelindung magnetit (Fe_3O_4) terbentuk ketika *tube* bersentuhan dengan uap melalui proses oksidasi:

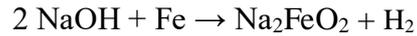


- b. Jika kandungan Na^+ (NaOH) berlebihan, dapat berbenturan dengan Fe , sehingga terjadi korosi. NaOH yang tidak mencukupi merusak lapisan besi magnetit (Fe_3O_4) di dalam ketel dengan menghasilkan kaustik bebas.



- c. Setelah lapisan magnetit (Fe_3O_4) ini dipecah, NaOH tambahan teriritasi dengan logam dasar, menghasilkan serangan yang disebut sebagai *caustic gouging*.





- d. Adanya H_2 , yang berpotensi menyebabkan *hydrogen damage* jika berdifusi lebih jauh ke dalam struktur batas butir baja.

Kadar sodium (Na^+) yang tinggi akibat kebocoran kondensor yang memungkinkan air laut masuk ke dalam *tube Boiler*.



Gambar 2. 14 Tube yang mengalami hydrogen damage

8. Creep

Creep pada material adalah hasil dari tekanan dan suhu tinggi. *Creep* adalah deformasi permanen. Waktu, suhu, dan tegangan semuanya mempengaruhi *creep*. Temperatur yang tinggi, seperti temperatur lebih besar dari $0,4 T_m$ ($T_m = \text{absolute melting temperature}$), ditambah dengan adanya tegangan pada material menimbulkan regangan (*strain*) yang bertambah seiring waktu (*time-dependent*) hingga akhirnya material tersebut pecah (*ruptures*). Perilaku *creep* atau mulur pada material digunakan sebagai faktor penting dalam umur desain pada aplikasi suhu tinggi karena mulur adalah fenomena yang bergantung pada waktu.

Creep akan terjadi pada semua material, logam dan non-logam, yang terkena suhu tinggi, dan mengalami tegangan,. Pada industri dengan kegagalan *creep* meliputi komponen-komponen berikut:

- Komponen *Boiler* bertekanan seperti *header* dan *tube*. yang beroperasi pada suhu tinggi, khususnya pada *creep regime*, disebabkan oleh adanya tegangan, yang mengakibatkan *hoop stress* dan *longitudinal stress*.

- Rotor turbin. Ini juga beroperasi pada suhu tinggi karena ketidakseimbangan dan rotasi sisa, yang menyebabkan tekanan sentrifugal.

Tiga tahap pengembangan creep adalah sebagai berikut:

1) Primary region/transient creep regions/primary creep

Tahap ini terjadi tepat setelah pembebanan dan dimana komponen mengalami peningkatan regangan plastis sekaligus mengalami penurunan laju regangan dari waktu ke waktu. Pada akhir tahap ini, penyusunan ulang cacat kristal akan menghasilkan penurunan besaran creep rate. Tahap kedua dimulai ketika cacat kristal ini mulai menyusun kembali.

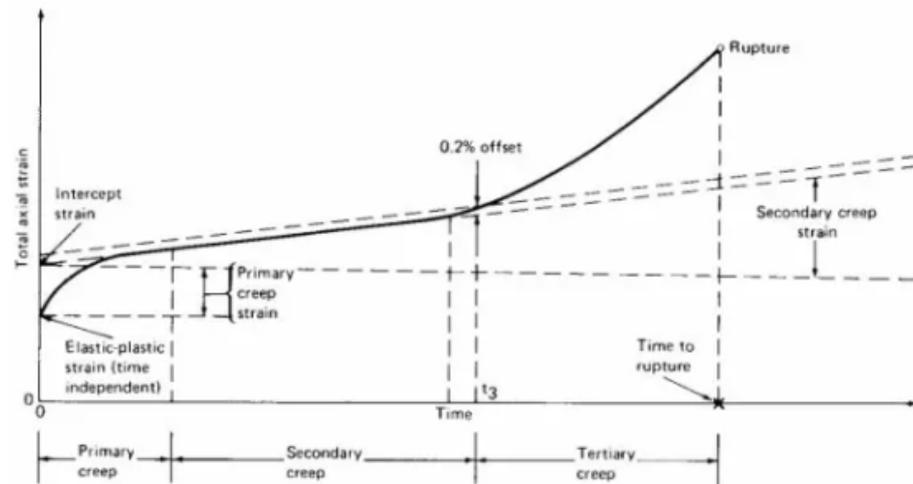
2) Secondary creep regions/secondary creep/steady state creep

Tahap ini pada dasarnya merupakan keadaan keseimbangan antara mekanisme pemulihan dan mekanisme pengerasan kerja. Komponen terus memanjang di bawah beban tetapi tidak secepat yang terjadi pada tahap pertama. Pada tahap ini sangat bergantung pada tingkat suhu dan tingkat pembebanan yang diberikan pada material. Pada titik ini, laju peningkatan regangan (creep rate) juga akan tetap konstan.

3) Tertiary creep regions

Selama tahap akhir ini, laju peningkatan regangan sangat cepat, menghasilkan pemanjangan benda uji yang cepat dan retakan. Pengkasaran partikel yang diendapkan, rekristalisasi, atau perubahan difusi yang memungkinkan peningkatan deformasi yang cepat pada tahap ini adalah semua perubahan metalurgi dalam logam. Karena penciutan, luas penampang berkurang pada titik ini, yang meningkatkan tegangan pada beban konstan dan meningkatkan deformasi.

Kurva regangan-waktu pada Gambar 2.15 menggambarkan perilaku creep material. Perilaku material di bawah beban konstan dan suhu tinggi ditunjukkan pada grafik.



Gambar 2. 15 kurva perilaku creep suatu material (ASM handbook vol 1)

2.4. Pengaruh Kualitas Air Terhadap Material *Boiler*

Kualitas air pengisi pada *Boiler* memiliki peranan yang sangat penting untuk kinerja *Boiler*. Ada beberapa kegagalan pada *Boiler* yang disebabkan oleh kualitas air pengisi yang kurang baik, temperatur kerja *Boiler* yang tinggi sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat pada air. Semakin tinggi temperatur kerja air maka semakin tinggi pula korosifitasnya, Sehingga semakin tinggi temperature dan tekanan air maka parameter batasan yang diizinkan pada air umpan *Boiler* juga semakin tinggi. berikut standar ASME yang dipakai sebagai pedoman kualitas air pada boiler.

Tabel 2. 7 ASME *Boiler water guidelines*

ASME Guidelines for Water Quality in Modern Industrial Water Tube Boilers for Reliable Continuous Operation						
Boiler feed water				Boiler Water		
Drum pressure (psi)	Iron (ppm Fe)	Copper (ppm Cu)	Total hardness (ppm CaCO ₃)	Silica (ppm SiO ₂)	Total alkalinity (ppm CaCO ₃)	Specific conductance (micro-ohms/cm) (un-neutralized)
0-300	0.100	0.050	0.300	150	700	7000
301-450	0.050	0.025	0.300	90	600	6000
451-600	0.030	0.020	0.200	40	500	5000
601-750	0.025	0.020	0.200	30	400	4000
751-900	0.020	0.015	0.100	20	300	3000
901-1000	0.020	0.015	0.050	8	200	2000
1001-1500	0.010	0.010	0.0	2	0	150
1501-2000	0.010	0.010	0.0	1	0	100

Kualitas air umpan *Boiler* merupakan salah satu penyebab permasalahan pada *Boiler*. Air pengisi *Boiler* tidak benar – benar bersih 100% dari pengotor yang terlarut pada air umpan walaupun sudah melalui *water treatment* masih ada sedikit padatan, ion – ion pengganggu dan pengotor lainnya. Akibat pengotor yang tercampur dengan air umpan yang masuk terus – menerus akan terakumulasi sehingga menimbulkan permasalahan yang serius pada *Boiler* jika tidak diatasi dengan tepat

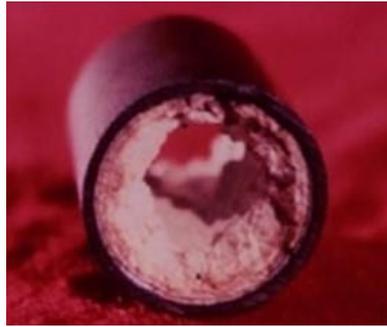
Ada beberapa problem utama yang sering dialami *Boiler* karena kualitas air yang kurang baik, yaitu:

1. Deposit

Pertumbuhan dan pengendapan kristal pada permukaan yang terkena air menghasilkan pembentukan kerak, yang merupakan jenis endapan yang paling umum. Ketika konsentrasi melebihi batas kelarutan, pengendapan terjadi. Pengendapan di ketel mengandung kalsium, magnesium, besi, tembaga, aluminium, silika, dan lumpur dan minyak. Sebagian besar endapan dapat diklasifikasikan kerak yang langsung mengeras di permukaan *tube* dan endapan kotoran yang mengendap di tempat lain dipindahkan ke permukaan logam dengan aliran air

Garam yang tidak sepenuhnya larut dalam air ketel tetapi memiliki kelarutan yang rendah menciptakan kerak. Ketika air dipekatkan dengan penguapan, garam-garam yang larut ini mencapai lokasi pengendapan dan mengendap. Laju perpindahan panas yang tinggi menyebabkan laju penguapan yang tinggi dengan cara ini memekatkan air yang tersisah di daerah penguapan. Air pekat dapat mengendapkan berbagai senyawa yang menyebabkan terbentuknya kerak. Komposisi kimia air pekat menentukan sifat kerak yang dihasilkan. Kalsium, magnesium, silika, aluminium, besi, dan (dalam beberapa kasus) natrium merupakan konstituen endapan yang normal.

Adanya deposit/kerak pada *tube* berdampak buruk pada *Boiler* dimana diameter pada *tube* akan menyempit sehingga kapasitas laju aliran dalam *tube* berkurang dan deposit ini bisa menghambat laju perpindahan panas sehingga terjadi *overheating* pada *tube Boiler*.



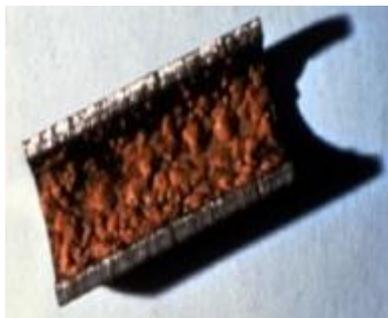
Gambar 2. 16 Deposit Pada *Tube*

2. Korosi

Boiler sering mengalami masalah korosi. Bahkan dapat dikatakan bahwa tidak ada *Boiler* yang kebal terhadap korosi. karena *Boiler* menggunakan air sebagai media kerjanya yang dapat dengan mudah menyebabkan *tube Boiler* terkorosi jika tidak ditangani dengan baik.

Air yang hanya berupa molekul H_2O dan tidak mengandung zat terlarut lainnya tidak bersifat korosif. Salah satu hal yang menyebabkan air bersifat korosif adalah zat-zat lain yang terlarut di dalamnya. Salah satu gas yang mudah larut dalam air adalah oksigen yang merupakan penyebab utama korosi *tube Boiler*.

Korosi juga dipengaruhi oleh temperatur air. Air di dalam ketel akan mencapai suhu yang sangat tinggi tergantung dari jenis *Boiler* yang digunakan. Air pada suhu kamar dan suhu tinggi akan memiliki sifat yang sangat berbeda. Kemampuan air untuk melarutkan zat-zat yang sebelumnya tidak larut akan menjadi lebih mudah pada temperatur di atas temperatur kritis. Ini karena air terurai menjadi ion H_3O^+ dan OH^- lebih mudah pada suhu ini. Korosi *tube Boiler* selanjutnya difasilitasi oleh faktor ini.



Gambar 2. 17 Korosi pada *tube Boiler*

3. *Carryover*

Carryover dapat disimpulkan sebagai adanya air dalam steam yang keluar dari *Boiler*. mengandung padatan yang dapat mempercepat pembentukan endapan silika pada bilah turbin dan menyebabkan masalah endapan dan korosi pada *Post Boiler*.

Kasus kimia atau mekanis menyebabkan *carryover*. Biasanya disebut sebagai *foaming*, *priming*, atau *general entrainment* dalam *Steam*. Desain *Boiler*, perubahan beban *Boiler* yang berfluktuasi, dan level air yang tinggi adalah beberapa faktor mekanis yang berkontribusi terhadap *carryover* pada *Boiler*.

Dengan menggunakan *pretreatment* yang tepat dan efektif, upaya harus dilakukan untuk menghilangkan faktor penyebab tersebut di atas untuk mencegah *carryover*.



Gambar 2. 18 *Carryover*

Untuk menghindari terjadinya beberapa permasalahan pada system *Boiler* maka ada beberapa parameter yang harus dikontrol dan dimonitoring untuk menjaga kualitas air *Boiler* yaitu:

1) *Power of Hydrogen*

Konsentrasi ion H^+ dalam air ketel ditunjukkan oleh nilai pH. Nilai pH berkisar dari skala 1 hingga skala 14. Konsentrasi ion H^+ berbanding terbalik dengan nilai pH. Sementara itu, konsentrasi ion OH^- menjadi lebih nyata dengan meningkatnya pH. Keseimbangan jumlah ion H^+ dan OH^- yang diperlukan agar air menjadi netral ditunjukkan dengan angka 7. Air *Boiler* yang terlalu asam akan menyebabkan korosif, Di sisi lain, air ketel yang terlalu basa akan

menyebabkan *caustic embrittlement* suatu kondisi dimana bahan *tube Boiler* dapat menjadi sangat rapuh karena akibat peningkatan konsentrasi basa. Kapasitas tekanan *Boiler* menentukan nilai pH yang ideal untuk air *Boiler*. Ketika pH air tidak memenuhi standar, ada masalah:

a. Jika pH dibawah standar

- **Terjadi *Carryover***

Suatu kondisi yang dikenal sebagai carry over terjadi ketika padatan seperti silika larut dalam air ketel dan dibawa ke dalam uap, menghasilkan kerak di sepanjang *tube* uap yang menghubungkan ketel ke turbin. Viskositas (atau tegangan permukaan) air juga sangat dipengaruhi oleh pH air; semakin rendah pH air, semakin rendah viskositas air. Ini memudahkan uap untuk memindahkan padatan yang terlarut dalam air ketel melalui permukaan air.

- **Bahan kimia tidak bekerja dengan baik**

Beberapa bahan kimia seperti fosfat (*Sodium Tripolyphosphate*) yang berfungsi sebagai penghambat kerak dan bekerja pada pH di atas 9,5, dan sulfit (*Meta Bisulfit*) yang berfungsi sebagai penghambat korosi dan bekerja pada pH 8,5 dicampurkan ke dalam air *Boiler* untuk menghasilkan air pengisi *Boiler* yang sesuai dengan standar.

b. Jika pH diatas standar

- **Terjadi *Foaming***

Foaming adalah terbentuknya gelembung-gelembung gas kecil pada permukaan air *Boiler*. Busa terjadi karena air memiliki tegangan permukaan yang tinggi, sehingga uap sulit keluar dari porositas air.

- ***Caustic gouging***

Karena pH air ketel yang tinggi, *caustic gouging* adalah salah satu penyebab korosi. Kondisi dimana penggunaan kaustik (NaOH) yang berlebihan untuk menaikkan pH air

menyebabkan besi berinteraksi dengannya, sehingga terbentuk *free caustic* pada *Boiler* yang merusak lapisan besi magnetit pada *tube Boiler*.

2) *Dissolve Oxygen (DO)*

Konsentrasi gas oksigen yang terlarut dalam air disebut *dissolve oxygen* atau oksigen terlarut. Oksigen terlarut dapat terjadi jika air memiliki terlalu banyak oksigen karena molekul oksigen akan terkonsentrasi di lokasi tertentu dan mengoksidasi besi di dinding *tube*. Korosi yang dihasilkan akan larut dalam air dan meninggalkan bekas pada permukaan *tube* berupa lubang-lubang kecil (*pitting*). Jika kondisi ini tidak diperiksa dan diperbaiki, akan semakin banyak lubang lubang yang terbentuk, dan lama kelamaan akan semakin dalam, yang dapat menyebabkan kegagalan pada *tube Boiler*.



Gambar 2. 19 *Oxygen pitting* pada *tube Boiler*

3) **Konduktifitas Spesifik**

Kapasitas air ketel untuk menghantarkan listrik diukur dalam konduktivitas spesifik. Total padatan terlarut (TDS) cairan dan jumlah ion keduanya berkorelasi langsung dengan nilai satuan ini. Ketel juga bisa terkorosi oleh jumlah ion terlarut di dalam air; jenis korosi ini dikenal sebagai korosi galvanik, dan ini disebabkan oleh perbedaan potensial elektroda antar logam. Gaya yang menyebabkan ion anoda dan katoda bertukar posisi adalah adanya perbedaan potensial ini. Kalsium dan magnesium adalah dua mineral yang umumnya larut dalam air. Ion positif akan dihasilkan jika salah

satunya dilarutkan dalam air. Karena perbedaan potensial antara elektroda alami dan besi *tube* ketel, ion mineral ini akan berfungsi sebagai katoda. Untuk sementara, ion Fe^{2+} akan berfungsi sebagai anoda. Ion mineral mengendap ke permukaan *tube* ketel, menyebabkan korosi, karena atom Fe larut dalam air.

4) Kekeraan Air

Pemantauan kekeruhan air *Boiler* merupakan hal yang dapat dijadikan parameter penting. Jika produk korosi bercampur dengan air pengisi, dapat mengakibatkan kekeruhan air *Boiler*. sehingga hasil pemantauan tingkat kekeruhan pada air *Boiler* dapat digunakan untuk mengetahui tanda-tanda awal terjadinya korosi pada *tube-tube Boiler*.

2.5. Konsep Dasar Analisa Kegagalan Material

Proses pengumpulan dan analisis data untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan material dikenal sebagai analisis kegagalan. Contoh analisis kegagalan material termasuk korosi, patahan, dan retakan. Tahap manufaktur, perakitan, atau operasi yang tidak mematuhi standar desain biasanya menjadi sumber kegagalan material.

Diharap dari analisis kegagalan material jangka pendek akan berfungsi sebagai dasar untuk meningkatkan proses manufaktur, desain, dan prosedur. Sedangkan untuk jangka panjang analisis kegagalan material dapat dimanfaatkan sebagai pendekatan terkini untuk pengembangan dan evaluasi perbaikan sistem pemeliharaan material dan peningkatan kualitas material. Berikut ini adalah beberapa penyebab mengapa materi gagal;

1. Kesalahan pemilihan material

Kesalahan pemilihan material adalah penyebab utama kegagalan material, menurut beberapa penelitian tentang masalah ini. Menurut statistik dalam tabel, kesalahan pemilihan material adalah kontributor utama.

Tabel 2. 8 Permasalahan dalam kegagalan komponen

Permasalahan	%
Kesalahan pemilihan material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5
Material yang tidak jelas	2

2. Perawatan yang kurang baik

Aspek yang paling krusial dalam perawatan peralatan dan komponen mesin adalah menjaga kondisinya. Namun, penelitian tentang perawatan yang buruk mengungkapkan bahwa itu adalah penyebab paling umum dari kegagalan material. Kasus kegagalan material yang terjadi digambarkan pada Tabel.

Tabel 2. 9 kasus kegagalan material akibat perawatan komponen

Permasalahan	%
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6

3. Kondisi kerja yang ekstrem

Salah satu faktor yang berkontribusi terhadap kegagalan material adalah kondisi kerja yang ekstrem. di mana sifat mekanik material dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti tekanan dan suhu tinggi.

Tabel 2. 10 penyebab kegagalan pada komponen

Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan (<i>fatigue</i>)	25
Kegagalan getas (<i>brittle fracture</i>)	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperature tinggi	7
Korosi retak tegang, korosi lelah, penggetasan hydrogen	6
Pemuluran (<i>creep</i>)	3
Abrasi, Erosi	3

4. Kesalahan dalam proses produksi dan desain

Kegagalan material seringkali diakibatkan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah kesalahan produksi. Kesalahan parameter, misalnya, dapat terjadi selama pembuatan atau pembentukan material, yang mengakibatkan cacat pada material dan potensi kerusakan komponen. Kegagalan material juga dapat disebabkan oleh cacat desain, seperti cacat desain produk awal yang menghasilkan lubang atau bentuk tajam yang memusatkan tekanan pada material.

5. Kesalahan operasional tidak sesuai dengan SOP

Kegagalan material terjadi ketika kemampuan atau standar material untuk menerima tekanan dan suhu tinggi melebihi batas toleransi komponen peralatan karena kesalahan operasional yang tidak sesuai dengan standar pengoperasian peralatan (SOP). Kondisi material akan memburuk akibat pengoperasian yang berlebihan ini.

2.5.1. Mekanisme Kegagalan

Suatu material atau komponen dikatakan gagal jika mengalami kegagalan karena kebocoran, patahan, atau penipisan material, yang semuanya akan menyebabkan komponen tersebut gagal. atau elemen:

- 1) Sudah tidak bisa bekerja sama sekali.
- 2) Masih berfungsi, tapi berbahaya.
- 3) Masih berfungsi, tapi tidak maksimal (kinerja peralatan tidak sesuai harapan).
- 4) Masih berfungsi, tapi usia terbatas karena permukaan cacat atau retak.

Secara umum, mekanisme kegagalan material dapat dibagi ke dalam kategori berikut: *stress repture*, *water/gas side corrosion*, *fire side corrosion*, *erosion*, dan *fatigue*.

1. *Stress Rupture* adalah mekanisme kegagalan yang diakibatkan oleh *stress* (tegangan) yang berasal dari dalam atau luar material. Hal ini biasanya terjadi pada material yang bekerja pada suhu tinggi dan menyebabkan panas berlebih jangka pendek (*short-term overheating*) yang dihasilkan dari oksidasi *Boiler*, yang menghalangi perpindahan panas dan mencegah

proses aliran berjalan. Selain panas berlebih, *creep* suhu tinggi menjadi penyebab kegagalan ini.

2. *Water/gas side corrosion* Kegagalan ini terjadi akibat adanya interaksi dengan air, hydrogen, konsentrasi oksigen, dan deposit didalam *tube Boiler* yang terbawa oleh aliran air atau uap.
3. *Fire side corrosion* adalah proses kegagalan yang disebabkan oleh hasil pembakaran yang bereaksi dengan lapisan oksida pada permukaan *tube*. Komposisi kimia bahan bakar, suhu, tekanan, dan material *tube* semuanya berdampak pada kerusakan ini.
4. *Erosion* Mekanisme dari kegagalan ini diawali adanya pengikisan pada material yang disebabkan oleh aliran partikel sisa pembakaran, abu dan debu, sootblower, dan jatuhnya slag.
5. *Fatigue* merupakan kerusakan material oleh adanya pembebanan yang berulang-ulang pada material dalam waktu yang lama. Kegagalan *fatigue* pada *Boiler* kebanyakan dipengaruhi oleh vibrasi, panas, dan proses korosi pada material *Boiler*.

Terjadinya kegagalan dengan mekanisme seperti yang telah disebutkan penyebab utamanya tidak lepas dari kurangnya perawatan, pemeliharaan komponen pada *Boiler* dari aspek, cleaning, chemical, material, dan kondisi pada pengelasan.

2.5.2. Prosedur analisa kegagalan

Dalam prosedur analisa kegagalan diperlukan pemahaman dan proses tindakan yang dilakukan untuk menganalisis dan menginvestigasi kegagalan yang terjadi agar dikemudian hari pencegahan terjadinya kegagalan yang serupa dapat dilakukan. Untuk menginvestigasi komponen yang mengalami kegagalan maka ada beberapa tindakan yang harus dilakukan yaitu:

1. Material yang digunakan
 - a. Data tentang produksi: proses seperti peleburan, penggulangan, pembentukan, pengecoran, perlakuan panas, dan pemesinan.
 - b. Analisis Bahan Kimia: Riasan kimia dan pengujian sinar-X.

- c. Karakteristik Fisik: uji tarik, lentur, benturan, kekerasan, dan kelelahan.
 - d. Struktur logam: Struktur mikro dan makro.
 - e. Ketegangan samping dan pengerasan permukaan: penyempurnaan
 - f. Patahan permukaan
2. Kondisi desain tegangan dan pemeliharaan.
 - a. Kekuatan eksternal: ukuran, kelas, dan pengulangan.
 - b. lingkungan: udara, air laut, dll.
 - c. Hal-hal lain: Kondisi perbaikan.
 3. Uji percobaan di laboratorium: kekerasan permukaan, kekuatan leleh, dan kekuatan material.
 4. Hasil tes secara keseluruhan

2.5.3. Metode investigasi

Sulit untuk melakukan perbaikan atau pemeliharaan yang tepat bila penyebab kerusakan material *Boiler* masih belum diketahui. Untuk tindakan korektif yang akan diambil, data rinci tentang pengujian kerusakan dan data operasi diperlukan untuk membantu dalam mengidentifikasi mekanisme kegagalan. Analisis metalurgi *tube Boiler* adalah prosedur investigasi yang diperlukan. Untuk mengidentifikasi penyebab utama kerusakan, diperlukan pemeriksaan mikroskopis, kimiawi, dan makroskopis terhadap material tersebut. Ada beberapa hal yang perlu dilakukan agar lebih mudah menemukan kerusakan material.

1. Batasi ruang lingkup masalah pada posisi dan lokasi di mana material gagal
2. Periksa hubungan antara potensi kerusakan dan mekanisme kegagalan.
3. Berdasarkan pengamatan dan data yang telah tersedia, tentukan penyebab atau akar penyebab kegagalan.
4. Memverifikasi penyebab kegagalan dengan melakukan pengujian terhadap material yang gagal.
5. Menetapkan metode untuk menarik kesimpulan dan mengambil tindakan lebih lanjut.
6. Tetapkan rencana untuk meminimalkan dan mencegah kegagalan serupa di masa mendatang.

Pengujian visual adalah langkah pertama dalam penyelidikan laboratorium. Disarankan agar permukaan yang bersentuhan dengan air atau api diperiksa untuk tanda-tanda kerusakan atau potensi kerusakan. Kondisi awal di mana *tube* diterima dalam foto dapat digunakan untuk mengkorelasikan dan menginterpretasikan data yang dikumpulkan selama penyelidikan. Warna dan tekstur endapan, lokasi cacat permukaan dan morfologinya, serta kontur permukaan logam semuanya membutuhkan pengamatan yang cermat.

Tube yang rusak harus dianalisis dimensinya. Pengujian kuantitatif karakteristik kerusakan seperti penonjolan, penipisan dinding pada bagian tepi yang patah, dan kerusakan korosi dapat dilakukan dengan jangka sorong dan mikrometer. Meningkatnya ekspansi ulet dan/atau pembentukan oksida dapat menunjukkan penyebab dasar kegagalan. Kerusakan pada *tube*, yang seringkali menyerupai kerusakan akibat panas berlebih, dapat diakibatkan oleh erosi atau korosi pada dinding luar sisi api. Analisis dimensi dari area yang berdekatan dapat membantu dalam menentukan apakah terjadi penipisan dinding luar yang signifikan sebelum keruntuhan.

Pemanjangan, orientasi, dan frekuensi retakan permukaan *tube* dapat membantu mengidentifikasi mekanisme kerusakan yang tepat. Kerusakan yang terlalu panas biasanya menghasilkan retakan yang membujur, sedangkan kerusakan fatik biasanya menghasilkan retakan yang melintang terhadap sumbu *tube*. Ekstensi retakan dapat ditemukan dan diuji untuk menggunakan metode *Non destructive testing* seperti pengujian penetran pewarna atau partikel magnetik.

Lapisan pelindung tipis dari magnet hitam diaplikasikan pada permukaan *tube* yang bersentuhan dengan air ketika pengarah komposisi kimia di dalam air dilakukan dengan benar. Kerusakan *tube* dapat terjadi akibat pengendapan yang berlebihan di sisi air *tube*, yang meningkatkan suhu melebihi dari desainnya. Ketebalan endapan dan *deposit weight density* (DWD) biasanya disertakan dalam analisis kuantitatif permukaan internal *tube*. Pengaruh deposit internal terhadap mekanisme kerusakan dapat ditentukan dengan bagaimana nilai ini ditafsirkan. Selain itu, nilai DWD dapat digunakan untuk memastikan apakah *Boiler* memerlukan pembersihan bahan kimia atau tidak. Selama uji DWD, peledakan

manik kaca akan digunakan untuk membersihkan permukaan *tube* secara menyeluruh.

Adanya pola pengendapan yang tidak biasa pada permukaan sisi air dapat mengindikasikan bahwa pola sirkulasi *tube Boiler* tidak optimal. Pelacakan endapan, misalnya, di sisi atas *tube* horizontal dapat menunjukkan kondisi *steam blanketing*. Kondisi *steam* bertingkat dan air yang mengalir melalui *tube* yang ada dapat menyebabkan *steam blanketing*, yang dapat mempercepat kerusakan korosi seperti penipisan dinding dan/atau *gouging* serta kerusakan *tube*.

Analisis kimia yang akurat dapat digunakan untuk menentukan penyebab kelebihan endapan internal *tube* dan tindakan perbaikan yang diperlukan. Untuk endapan di sisi air, nilai kehilangan pengapian biasanya juga ditentukan. Kehilangan berat yang diperoleh pada saat deposit dipanaskan di dalam tanur diwakili oleh nilai *loss of ignition* (LOI), yang dapat digunakan untuk mendiagnosa kontaminasi bahan organik pada sisi air deposit.

Analisis kimia deposit dari lokasi tertentu seringkali diperlukan. Teknik serbaguna *Scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy* (SEM-EDS) memungkinkan analisis mikroskopis kimia anorganik. Analisis SEM-EDS dapat dilihat pada:

1. Komposisi endapan di area *tube* yang terkorosi dan tidak terkorosi berbeda
2. Untuk memperjelas konsentrasi garam di bawah permukaan endapan yang mendukung kerusakan korosi pada *tube*.
3. Perbedaan detail terkecil antara endapan pada permukaan *tube* yang berbeda secara visual

SEM-EDS juga dapat digunakan untuk melakukan analisis anorganik pada dasar yang dipoles dan penampang *tube* yang memiliki lapisan endapan yang tebal dari sisi air. Saat deposit berlapis, tes ini, yang dikenal sebagai pemetaan unsur, berguna. Analisis penampang endapan *Boiler* dapat membantu menentukan dengan tepat bagaimana dan kapan endapan terbentuk dengan mengidentifikasi periode ketika terjadi gangguan pada komposisi kimiawi air. Ini mirip dengan menguji

lingkaran pohon. Peta titik berkode warna menunjukkan distribusi spasial unsur-unsur dalam penampang simpanan dengan pemetaan unsur.

Selain itu, topografi permukaan endapan dan/atau morfologi permukaan yang rusak dapat diperiksa dengan mikroskop elektron pemindaian (SEM). Mengklasifikasikan berbagai jenis kerusakan menjadi lebih mudah dengan *fraktografi*. Misalnya, karakteristik mikroskopis permukaan yang rusak dapat mengungkapkan apakah baja itu rapuh atau ulet, apakah retakan meluas melalui butiran sepanjang batas butir, dan apakah kelelahan adalah mekanisme kegagalan utama. Analisis permukaan kerusakan dan analisis kimia dapat digabungkan dalam pengujian SEM-EDS untuk menentukan ion atau senyawa mana yang terlibat dalam mekanisme kerusakan.

Baja karbon rendah digunakan untuk membuat sebagian besar *water bearing tube* yang digunakan dalam konstruksi *Boiler*. Sebaliknya, *steam-bearing tube* (*Superheater* dan *reheater*), biasanya terbuat dari baja paduan rendah dengan berbagai konsentrasi kromium (Cr) dan molibdenum (Mo). Ketahanan baja terhadap oksidasi dan retak ditingkatkan oleh kromium dan molibdenum. Sebagian dari *tube* untuk analisis kimia paduan sangat penting untuk pengujian panas logam yang akurat. Kesesuaian *tubing* dengan spesifikasi juga dapat dikonfirmasi dengan menganalisis jenis paduan. Tingkat baja yang salah dapat digunakan untuk perbaikan *tube* atau pemasangan awal.

Sangat penting untuk memperkirakan sifat mekanik komponen *Boiler*. Ini sering mencakup uji kekerasan, yang dapat digunakan untuk memperkirakan kekuatan tarik baja. Mendokumentasikan penurunan sifat mekanik yang disebabkan oleh logam yang terlalu panas menjadi lebih mudah dengan ini. Sebagian besar waktu, pengujian kekerasan Rockwell digunakan, tetapi terkadang pengujian kekerasan mikro lebih baik. Untuk memeriksa keretakan getas pada bagian las yang terpapar panas, misalnya, pengukuran kekerasan mikro dapat digunakan untuk memperoleh profil kekerasan di sepanjang zona las.

Saat melakukan analisis kerusakan, mungkin langkah yang paling krusial adalah analisis mikrostruktur komponen. Berikut ini dapat ditentukan dengan menggunakan uji metalografi, yang sangat membantu.

1. Apakah kerusakan *tube* disebabkan oleh panas berlebih jangka pendek atau jangka panjang.
2. Apakah retakan dimulai dari sisi api atau sisi air
3. Apakah retakan tersebut merupakan hasil dari *stress-corrosion cracking* (SCC), kelelahan korosi, atau kerusakan merayap?
4. Apakah korosi internal atau kerusakan hidrogen menyebabkan *tube* mengalami kegagalan?

Orientasi dan persiapan sampel merupakan komponen penting dari analisis mikrostruktur. Karakteristik khusus dari kasus kerusakan menentukan orientasi komponen yang diuji. Spesimen logam dipilih dengan hati-hati, dipotong dengan gergaji atau *cut-off wheel*, dan ditempel di dalam cetakan dengan resin atau plastik. Sampel dipoles dan dibersihkan setelah ditempelkan untuk menciptakan permukaan yang halus dan bebas goresan.

Menggunakan mikroskop optik pembiasan, logam yang dipoles menjadi sasaran pemeriksaan metalografi. Selanjutnya, struktur mikro dari berbagai bagian *tube*, seperti sisi yang rusak dari dinding *tube superheater* dan sisi yang tidak rusak, dibandingkan. Membandingkan struktur mikro dari bagian yang tidak rusak dengan bagian yang rusak dapat memberikan wawasan yang berguna mengenai tingkat deteriorasi dan peningkatan deteriorasi lokal karena struktur mikro dari bagian yang tidak rusak seringkali mencerminkan kondisi baja yang difabrikasi.

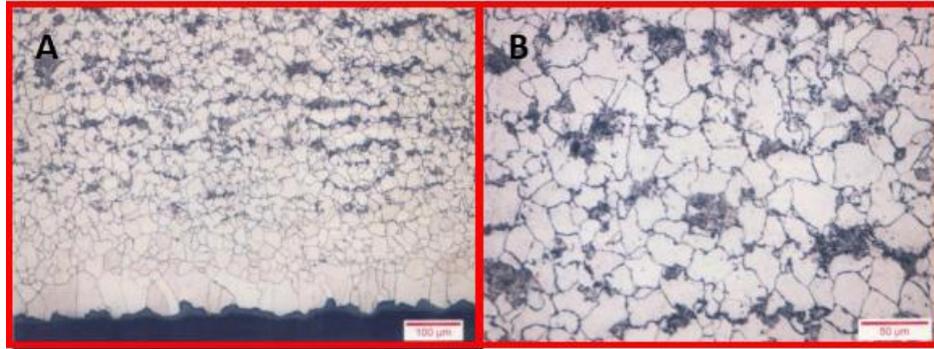
2.6. Penelitian Sebelumnya

2.6.1. Analisa Kegagalan Platen Tube Superheater PLTU Teluk Sirih

Vendy Antono dkk, pada tahun 2014 melakukan penelitian pada *platen tube Superheater* dimana diketahui penyebab terjadinya kegagalan akibat bagian *tube* terkena panas terus – menerus (*Overheating*).



Gambar 2. 20 Tube Platen Superheater



Gambar 2. 21 Hasil pengujian metalografi pada penampang dengan pembesaran 200X (A). Hasil pengujian metalografi pada penampang dengan perbesaran 500X (B)

Pada gambar struktur mikro dapat dilihat daerah yang hitam menunjukkan area *pearlite* dan daerah yang putih menunjukkan area *Ferrit* dapat dilihat fasa *Ferrit* lebih dominan ini diakibatkan dari Paparan uap *Boiler* secara terus menerus yang menyebabkan perubahan fasa *pearlite* ke pаса *ferit* sehingga terjadi penurunan kekerasan material sehingga bagian ini mudah terkorosi pada *tube* sehingga mempermudah terjadinya kegagalan pada material. Kegagalan material ini semakin cepat terjadi dikarenakan penggunaan jenis material *tube Boiler* yang tidak sesuai karena mengandung kadar karbon yang rendah. Karena tidak terlalu bergantung pada fase perlit (elemen besi), tetapi kekuatannya bergantung pada karbon, bagian yang harus tahan terhadap paparan panas untuk waktu yang lama harus mengandung antara 1,5 dan 2 persen karbon.

2.6.2. Analisa Kerusakan *Superheater Tube* Pada *Boiler 31f-28* Di PT Badak NGL Bontang Kaltim

Rizky Hijrah Permana dan Ir. Witantyo, M.Eng.Sc pada tahun 2014 melakukan penelitian terkait kegagalan pada *Superheater tube* pada *Boiler 31F-28* dan ditemukan adanya deposit didalam *tube*, deposit ini berperan penting sebagai penyebab terjadinya *overheating* pada *tube Superheater* dimana deposit yang terdapat pada *tube* menyebabkan laju steam terhambat dan mengakibatkan perpindahan panas jadi lambat. Pada komponen *Boiler* terjadi kerusakan pada separator hal ini menyebabkan terjadinya *water carry over* pada *u-bent tube Superheater* sehingga mempercepat terjadinya deposit.



Gambar 2. 22 Pengelembungan pada *U-Bend Superheater tube* (A).
Penumpukan deposit pada bagian dalam *U-Bend Superheater tube* (B).



Gambar 2. 23 Bekas endapan deposit pada *U-bend Superheater tube Boiler 31F-28*

2.6.3. Analisa Penyebab Kegagalan *Tube Superheater Boiler*

Dalam studi tahun 2013 oleh Fahrizal tentang penyebab kegagalan *tube Superheater Boiler* kelapa sawit, ditemukan perbedaan kekerasan yang signifikan antara bagian permukaan pada posisi paling dekat dengan bagian yang gagal dan posisi yang tebal.



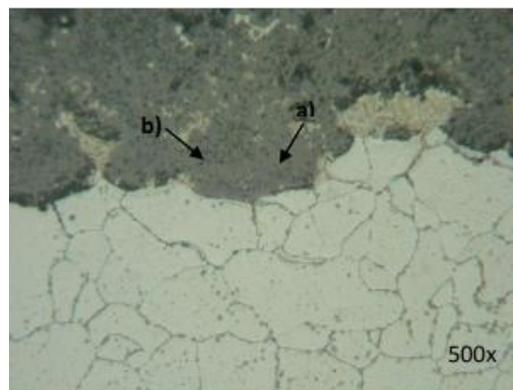
Gambar 2. 24 *Tube Superheater Boiler* kelapa sawit

Model kegagalan *tube Superheater* adalah *creep* karena beroperasi pada suhu dan tekanan tinggi untuk jangka waktu yang lama. Hal ini diikuti dengan pelunakan, yang menyebabkan pengikisan cairan di dalam *tube*, yang menipiskan *tube* dan membuatnya tidak mampu menahan beban, yang mengakibatkan kegagalan.



Gambar 2. 25 Foto makro *tube Superheater* yang mengalami kegagalan

Terbukti dengan berkurangnya ketebalan *tube*, kekerasan pada penampang *tube* berkurang secara signifikan sebagai akibat dari efek penuaan dan erosi yang disebabkan oleh fluida yang mengalir pada temperatur tinggi. Bentuk butir ferit dan perlit tampak mengalami perubahan dari posisi tebal ke posisi patahan berdasarkan pengamatan struktur mikro. Butir ferit dan perlit berbentuk hampir bulat.



Gambar 2. 26 Struktur mikro berupa a) Ferit dan b) butir karbida perlit (*speroidisasi perlit*)