

**TESIS**

**ANALISA DEGRADASI MATERIAL DAN PENILAIAN SISA UMUR  
KOMPONEN *ECONOMIZER TUBE SA-210 A1* PADA  
*CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER***

Disusun dan diajukan oleh

**M I S W A R**

**D022181004**



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

**ANALISA DEGRADASI MATERIAL DAN PENILAIAN SISA UMUR  
KOMPONEN *ECONOMIZER TUBE SA-210 A1* PADA  
*CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER***

**TESIS**

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat*

*Memperoleh Gelar Magister Teknik*

*Pada Program Studi Magister Teknik Departemen Teknik Mesin*

*Fakultas Teknik*

*Universitas Hasanuddin*

**M I S W A R**

**D022181004**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2022**

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISA DEGRADASI MATERIAL DAN PENILAIAN SISA UMUR KOMPONEN *ECONOMIZER TUBE SA-210 A1* PADA *CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER*

Disusun oleh:

**MISWAR**

**D022181004**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 31 Maret 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama



**Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T.**  
NIP. 19750322 200212 1 001

Pembimbing Pendamping



**Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, S.T., M.T.**  
NIP. 197404151999031 001

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin



**Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T.**  
NIP. 19750322 200212 1 001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



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

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : MISWAR  
Nomor Induk Mahasiswa : D022181004  
Program Studi : Magister Teknik Mesin (Konstruksi Mesin)

Menyatakan bahwa karya tulis berupa tesis dengan judul "Analisa Degradasi Material dan Penilaian Sisa Umur Komponen *Economizer Tube SA-210 A1 Pada Circulating Fluidized Bed Boiler*" merupakan karya orisinal saya dan sepanjang pengetahuan saya tidak memuat bahan yang pernah dipublikasikan atau telah ditulis oleh orang lain dalam rangka tugas akhir untuk suatu gelar akademik di Universitas Hasanuddin atau di lembaga pendidikan tinggi lainnya di mana pun, kecuali bagian yang telah dikutip sesuai kaidah ilmiah yang berlaku. Dan saya juga menyatakan bahwa tesis ini merupakan hasil kerja saya sendiri dalam batas tertentu yang dibantu oleh pihak pembimbing. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 31 Maret 2022

Yang membuat



MISWAR

## PRAKATA

Alhamdulillah, senantiasa kami panjatkan kehadiran ALLAH SWT atas berkah, rahmat dan hidayah-Nya pula sehingga kami masih diberi kesempatan dan kesehatan dalam menyelesaikan penulisan tesis ini yang berjudul, “**Analisa Degradasi Material dan Penilaian Sisa Umur Komponen *Economizer Tube SA-210 A1 Pada Circulating Fluidized Bed Boiler***”, sebagai syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua dan keluarga tercinta serta berbagai pihak yang senantiasa memberikan bantuan moril ataupun materiil.

Penulis juga ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tak terhingga 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. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T., Ketua Komisi Penasehat dan Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, S.T., M.T., selaku Sekretaris Komisi Penasehat sekaligus sebagai pembimbing kami, yang selama ini senantiasa memberikan bimbingan dan arahan sampai terselesaikannya penulisan ini.
5. Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T., Azwar Hayat, S.T., M.Sc., dan Fauzan, S.T., M.T., Ph. D, selaku Anggota Tim Penguji atas waktu yang diberikan serta segala saran yang bermanfaat dalam penyusunan penulisan tesis ini.
6. Dr. Hairul Arsyad, 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. Wahyu Hari Purnomo, S.T., M.M., selaku CFPP Manager PLTU 2 x 30 MW beserta manajemen PT. ANTAM, Tbk UBPN Sulawesi Tenggara.
11. Ir. Dede Rukanda, M. Sc, Selaku Direktur Utama PT. INDOBOILER beserta manajemen.
12. Hj. Nurhikmah, Selaku Direktur Utama PT. Karya Sinar Cipta beserta manajemen.
13. I Nyoman Warta, S.T., M.T., selaku Kepala BLKK Kabupaten Kolaka dan H. Amir selaku Instruktur BLKK Kab. Kolaka.
14. Askar, Hasruddin, Bayu Segara S.T., I Nyoman Winantra “Komang”, S.T., Taufik, A. Md, Fakhruddin, S.T., Asdi Aswirawan, S.T., Harfan, S.T., M.T., dan rekan tim kerja lainnya.
15. Rekan-rekan Mahasiswa S2 Pascasarjana terkhusus saudara Amal All Gazali, Fahri, Nur Azhary, Farid serta rekan-rekan mahasiswa lainnya yang tidak dapat penulis menyebut namanya yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tesis ini.

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, 31 Maret 2022

Penulis

Miswar

## ABSTRAK

**Miswar.** Analisis Degradasi Material dan Penilaian Sisa Umur Komponen *Economizer Tube SA-210 A1* Pada *Circulating Fluidized Bed Boiler* (dibimbing oleh **Hairul Arsyad** dan **Lukmanul Hakim Arma**).

*Boiler* dan bagian bertekanan lainnya, yang beroperasi pada temperatur tinggi, tidak lepas dari beban kerja, baik beban eksternal maupun internal, yang pada akhirnya dapat menyebabkan komponen tersebut mengalami degradasi atau bahkan gagal. Studi ini membahas potensi degradasi dan menganalisis sisa umur *economizer tubes boiler* yang beroperasi di pembangkit listrik akibat pengaruh tekanan internal dan temperatur operasi yang tinggi. Pengambilan data dilakukan di 2 lokasi yaitu di lokasi PLTU dan di laboratorium mengacu pada standar/kode penggunaan uji non destruktif dan destruktif. *Economizer tubes* dipilih secara acak menggunakan uji non-destruktif seperti inspeksi visual, pengukuran dimensi, kekerasan material, analisis material positif atau komposisi kimia, metalografi/in-situ, dan dukungan data sekunder. Evaluasi meliputi penghitungan kekuatan konstruksi, analisis tegangan-regangan, dan penilaian sisa umur (RLA) menggunakan metode statistik, regresi, dan ekstrapolasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *economizer tubes* telah mengalami degradasi namun masih dalam kriteria keberterimaan. Selain itu dari analisa nilai pengukuran dimensi dan nilai kekerasan terendah didapatkan nilai kekerasan 87 HVN namun masih dapat menahan tekanan kerja maksimum sebesar 24,17 MPa, dengan tekanan operasi internal sebesar 13,7 MPa. Selain itu, hasil penilaian sisa umur minimum adalah 1.525.452.021,9 jam, dan rata-rata penilaian sisa umur adalah 4.299.367.341,40 jam. Selanjutnya pengamatan struktur mikro visual (in-situ/metalografi) menunjukkan masih dalam kondisi normal.

Kata kunci: *boiler*, kekerasan, pengujian tidak merusak, tegangan, tekanan, umur sisa.

## ABSTRACT

**Miswar.** Analysis Material Degradation and Remaining Life Assessment of SA-210 A1 Economizer Tube Components in Circulating Fluidized Bed Boiler (supervised by **Hairul Arsyad** and **Lukmanul Hakim Arma**).

Boilers and other pressurized parts, which operate at high temperatures, cannot be separated from the workload, both external and internal loads, which can eventually cause these components to degrade or even fail. This study discusses the potential for degradation and analyzes the remaining life of the economizer tube boiler operating at the power plant due to the influence of high internal pressure and operating temperature. Data collection was carried out in 2 locations, namely, at the PLTU location and in the laboratory refer to the standards/codes for using non-destructive and destructive tests. Economizer tubes were randomly selected using non-destructive tests such as visual inspection, dimension measurement, material hardness, positive material analysis or chemical composition, metallography/in-situ, and secondary data support. Evaluation includes calculating construction strength, stress-strain analysis, and remaining-life-assessment (RLA) using statistical, regression, and extrapolation methods. The results showed that the economizer tube had been degraded but was still within the acceptance criteria. In addition, from the analysis of the value of the dimension measurement and the lowest hardness value, the hardness value is 87 HVN but can still withstand a maximum working pressure of 24.17 MPa, with the internal operating pressure being 13.7 MPa. In addition, the minimum remaining-life-assessment result is 1,525,452,021.9 hours, and the mean remaining-life-assessment is 4,299,367,341.40 hours. Furthermore, the visual microstructure observation (in-situ/metallography) showed that it has still resulted in a normal condition.

Keywords: boiler, hardness, non-destructive testing, stress, pressure, remaining-life.



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
PRAKATA.....	iv
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xx
DAFTAR SIMBOL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Rumusan Masalah .....	4
I.3 Tujuan Penelitian.....	5
I.4 Batasan Masalah.....	5
I.5 Manfaat Penelitian.....	6
I.6 Sistematika Penulisan.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
II.1 Pendahuluan .....	8
II.2 Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler .....	10
II.2.1 Udara Pembakaran ( <i>Combustion Air</i> ).....	11
II.2.2 Bahan Bakar ( <i>Fuel</i> ) dan Penyerap ( <i>Sorbent</i> ).....	12
II.2.3 Ruang Bakar ( <i>Combustor</i> ) .....	15
II.2.4 <i>Hot Cyclone</i> .....	15

II.2.5	<i>Second Pass</i> .....	16
II.2.6	<i>Electrostatic Precipitators (ESP)</i> atau <i>Fabric/Bag Filters</i> .....	17
II.2.7	<i>Bottom Ash</i> (Abu Dasar).....	17
II.3	Komponen <i>Economizer</i> .....	18
II.3.1	Klasifikasi Komponen <i>Economizer</i> .....	19
II.4	Pemilihan Material Komponen Boiler Tubes.....	25
II.5	Beban Yang Bekerja Pada Komponen Boiler Tubes .....	38
II.5.1	Perilaku Mekanik Dalam Hubungan Tegangan-Regangan .....	39
II.5.2	Tegangan Elastis dan Regangan Elastis Pada Silinder/ <i>Tube</i> ....	42
II.5.3	Tegangan Plastis dan Regangan Plastis Pada Silinder/ <i>Tube</i> ....	45
II.5.4	Tegangan Termal ( <i>Thermal Stress</i> ) Pada Silinder/ <i>Tube</i> .....	47
II.5.5	Regangan Termal Pada Silinder/ <i>Tube</i> .....	48
II.5.6	Tegangan dan Regangan Equivalen Pada Silinder/ <i>Tube</i> .....	48
II.5.7	Perilaku dan Karakteristik Mulur ( <i>Creep</i> ).....	50
II.5.8	Pengaruh Beban Faktor Unsur Kimia .....	54
II.6	Mekanisme Kerusakan Material Pada Komponen Boiler Tubes .....	57
II.6.1	Kegagalan Akibat <i>Stress-Rupture</i> Pada <i>Boiler Tubes</i> .....	59
II.6.2	Korosi Pada Sisi Air/Uap ( <i>Water/Steam-Side Corrosion</i> ) Pada <i>Boiler Tube</i> .....	64
II.6.3	Korosi Pada Sisi Api ( <i>Fire-Side Corrosion</i> ) Pada <i>Boiler Tube</i> .....	66
II.7	Penilaian Evaluasi Pada Komponen Boiler.....	68
II.7.1	Metode Prediksi Penilaian Sisa Umur ( <i>Remaining-Life Assessment</i> ) Pada Komponen <i>Boiler Tube</i> .....	72
II.8	Beberapa Penelitian Yang Dilakukan Sebelumnya.....	77

BAB III METODE PENELITIAN.....	84
III.1 Diagram Alir Penelitian .....	84
III.2 Waktu dan Tempat Penelitian .....	85
III.3 Kajian Masalah dan Tinjauan Pustaka .....	85
III.4 Metode Pengambilan Data .....	86
III.4.1 Investigasi di Lokasi ( <i>Site Investigation</i> ) dengan Jenis Pengujian Tidak Merusak ( <i>Non-Destructive Test</i> ).....	86
III.4.2 Pengujian di laboratorium dengan jenis pengujian merusak ( <i>Destructive Test</i> ) dan pengujian tidak merusak ( <i>Non- Destructive Test/NDT</i> ).....	90
III.5 Peralatan Dalam Penelitian .....	95
III.6 Bahan Dalam Penelitian .....	96
III.7 Rancangan Penelitian .....	96
III.8 Teknik Analisis Data.....	98
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....	98
IV.1 Investigasi Di Lokasi.....	98
IV.1.1 Riwayat dan Spesifikasi Desain <i>Boiler</i> .....	98
IV.2 Analisa dan Pembahasan Data Investigasi Di Lokasi .....	98
IV.2.1 Analisa Kekuatan Konstruksi <i>Economizer Tubes</i> .....	99
IV.2.2 Analisa Tegangan dan Regangan pada <i>Economizer Tubes</i> ....	103
IV.2.3 Penilaian Sisa Umur ( <i>Remaining-Life Assessment</i> ) pada <i>Economizer Tubes</i> .....	122
IV.2.4 Analisa Hasil Pengujian Mikrostruktur/Replikasi ( <i>In-situ Metallography Test</i> ).....	126
IV.3 Penelitian di Laboratorium.....	129
IV.3.1 Data Spesifikasi Spesimen Uji.....	130

IV.3.2	Data Hasil Pengujian Mekanik ( <i>Mechanical Test</i> ) .....	131
IV.3.3	Data Hasil Pengujian Komposisi Kimia ( <i>Chemical Composition Test</i> ).....	131
IV.3.4	Data Hasil Pengujian Mikrostruktur Metalografi ( <i>Metallography Test</i> ) .....	132
IV.3.5	Data Dimensi Spesimen Pengujian <i>Creep-Rupture</i> ( <i>Creep-Rupture Test</i> ).....	132
IV.4	Analisa dan Pembahasan Data Eksperimen Di laboratorium.....	132
IV.4.1	Analisa Kekuatan Konstruksi Spesimen Uji.....	132
IV.4.2	Analisa Tegangan dan Regangan pada Spesimen Uji.....	138
IV.4.3	Penilaian Sisa Umur ( <i>Remaining-Life Assessment</i> ) pada Spesimen uji .....	141
IV.4.4	Analisa Hasil Pengujian Mikrostruktur Metalografi ( <i>Metallography Test</i> ) .....	147
BAB V	PENUTUP.....	153
V.1	Kesimpulan.....	153
V.2	Saran.....	155
DAFTAR	PUSTAKA .....	156
LAMPIRAN	.....	164
Lampiran A	Data Gambar Investigasi di Lokasi .....	164
Lampiran B	Tabel Data Investigasi di Lokasi .....	167
Lampiran C	Hasil Analisa Data Gambar Investigasi di Lokasi.....	169
Lampiran D	Hasil Analisa Data Perhitungan Investigasi di Lokasi.....	170
Lampiran E	Data Gambar Penelitian di Laboratorium.....	177
Lampiran F	Tabel Data Penelitian di Laboratorium.....	181
Lampiran G	Hasil Analisa Data Gambar Penelitian di Laboratorium.....	186

Lampiran H Hasil Analisa Data Perhitungan Penelitian di Laboratorium	188
Lampiran I Data Pendukung Penelitian.....	245

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Skema <i>Boiler</i> CFB Tarahan (BPPT-PTKKE, 2013).....	9
<b>Gambar 2.2</b>	Proses pembakaran <i>Circulating Fluidized Bed</i> (CFB) boiler Lurgi (Rayaprolu, 2009). .....	11
<b>Gambar 2.3</b>	<i>Hot cyclone</i> CFB : (A) Desain Lurgi, (B) Desain Ahlstrom (Rayaprolu, 2009). .....	11
<b>Gambar 2.4</b>	<i>Boiler</i> 125 MW, lignite-fired hot cyclone circulating fluidized bed combustion (CFBC) dengan dua siklon. AH, air heater; ECON, economizer; ESP, electrostatic precipitator; FBHE, fluid bed heat exchanger; PA, primary air; SA, secondary air; SH, superheater; TAH, tubular air heater (Rayaprolu, 2009).....	14
<b>Gambar 2.5</b>	(A) <i>Tube</i> tunggal per loop. (B) Dua <i>tubes</i> per loop (Rayaprolu, 2009). .....	21
<b>Gambar 2.6</b>	(A) <i>Tube</i> bersirip besi cor. (B) <i>Tube</i> baja insang/sirip besi cor. (C) <i>Tube</i> bersirip heliks (Rayaprolu, 2009).....	22
<b>Gambar 2.7</b>	(A) <i>Tube</i> bersirip besi cor. (B) <i>Tube</i> baja insang/sirip besi cor. (C) <i>Tube</i> bersirip heliks (Rayaprolu, 2009).....	23
<b>Gambar 2.8</b>	Sirip Longitudinal dan arah aliran gas di atas <i>tubes</i> bersirip (Rayaprolu, 2009). .....	24
<b>Gambar 2.9</b>	(A) <i>Economizer tubes</i> Horizontal, (B) <i>Economizer tubes</i> Vertikal (Rayaprolu, 2009). .....	25
<b>Gambar 2.10</b>	Tegangan temperatur tinggi yang diizinkan untuk pemilihan bahan bagian tekanan sesuai <i>ASME Boiler &amp; Pressure Vessel Code 2007</i> (Rayaprolu, 2009). .....	27
<b>Gambar 2.11</b>	Hubungan nilai kekerasan <i>Brinell</i> ( <i>hardness</i> ) dan kekuatan tarik ( <i>tensile strength</i> ) untuk baja, <i>brass</i> dan besi cor (JR, William D. Callister, 2015).....	38
<b>Gambar 2.12</b>	Gambaran umum jenis beban primer dan mekanisme kegagalan yang terkait (Tinga, 2013).....	39
<b>Gambar 2.13</b>	Ilustrasi tegangan yang bekerja (Campbell, 2012).....	40

<b>Gambar 2.14</b>	Ilustrasi kurva tegangan-regangan teknik dari logam ulet menunjukkan perilaku <i>necking</i> (Dowling, 2012). .....	41
<b>Gambar 2.15</b>	Ilustrasi perilaku elastis dan plastis selama beban tarik (Campbell, 2012). .....	42
<b>Gambar 2.16</b>	Tegangan yang bekerja pada silinder/ <i>tube</i> akibat pengaruh tekanan internal (Budynas & Nisbett, 2011). .....	42
<b>Gambar 2.17</b>	Ilustrasi rasio <i>poisson's</i> (Dowling, 2012). .....	44
<b>Gambar 2.18</b>	Silinder berongga dengan kondisi permukaan konveksi (Moran et al., 2003). .....	47
<b>Gambar 2.19</b>	Ilustrasi Kurva <i>creep</i> (Dowling, 2012). .....	53
<b>Gambar 2.20</b>	Ilustrasi kurva hubungan laju regangan ( <i>strain rate</i> ) atau laju <i>creep</i> dan waktu selama uji <i>creep</i> beban konstan, tingkat <i>creep</i> minimum dicapai selama <i>creep</i> tahap kedua (Campbell, 2012). .....	53
<b>Gambar 2. 21</b>	Peta mekanisme deformasi yang disederhanakan (Dieter, 1988). .....	55
<b>Gambar 2.22</b>	Pengaruh temperatur terhadap tegangan maksimum yang diizinkan pada beberapa tingkatan pipa/ <i>tube</i> baja berdasarkan <i>ASME Boiler and Pressure Vessel Code</i> (Viswanathan, 1989). .....	59
<b>Gambar 2.23</b>	<i>Short-term overheating</i> , di mana tonjolan terjadi sebelum pecah (Port & Herro, 1991). .....	61
<b>Gambar 2.24</b>	Kegagalan pada <i>superheater tube</i> akibat <i>creep (long-term overheating)</i> (Port & Herro, 1991). .....	62
<b>Gambar 2.25</b>	Pemetaan lokasi berbagai jenis korosi pada sisi air/steam ( <i>Water/steam-side Corrosion</i> ) pada <i>water tube boiler</i> (Kitto & Stultz, 2005). .....	65
<b>Gambar 2.26</b>	Korosi yang terjadi pada <i>boiler tube</i> , (A) <i>oxygen pitting</i> pada inlet <i>feedwater economizer</i> , (B) korosi <i>Acid phosphate</i> , (C) korosi <i>chelant</i> , (D) kerusakan akibat <i>Hydrogen (hydrogen damage)</i> (Port & Herro, 1991). .....	66
<b>Gambar 2.27</b>	Korosi abu bahan bakar ( <i>coal ash corrosion</i> ) pada <i>superheater tube, reheater tube</i> dan <i>waterwall tubes</i> menunjukkan kehilangan	

	logam maksimum [(ASM International Committee, 2006), (Port & Herro, 1991)].	67
<b>Gambar 2.28</b>	Ilustrasi skema faktor yang menguntungkan dan merugikan mempengaruhi usia manfaat komponen (Viswanathan, 1989).	69
<b>Gambar 2.29</b>	Ilustrasi skema teknik replika <i>plastic</i> [(Viswanathan, 1989), (ASM International Committee, 1997)].	70
<b>Gambar 2.30</b>	Prinsip dasar pengoperasian, (A) Respons sinyal <i>ultrasonic</i> , (B) <i>electromagnetic acoustic transducer</i> (EMAT) (Kitto & Stultz, 2005).	71
<b>Gambar 2.31</b>	Perbandingan rongga <i>creep</i> , (A) replika, (B) struktur mikro secara langsung (ASM International Committee, 1997).	76
<b>Gambar 2.32</b>	Penilaian <i>creep-life</i> berdasarkan klasifikasi rongga. Skema pembentukan <i>creep-crack</i> , (A) Rongga kecil, (B) Menghubungkan dari waktu ke waktu, (C) Membentuk retakan <i>intergranular</i> , (D) Akhirnya <i>macrocracks</i> [(Viswanathan, 1989), (ASM International Committee, 1997)].	77
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian.	84
<b>Gambar 3.2</b>	Pengukuran dimensi pada <i>economizer tubes</i> .	88
<b>Gambar 3.3</b>	Pengujian kekerasan dengan menggunakan <i>Leeb Hardness Tester</i> .	88
<b>Gambar 3.4</b>	Pengujian <i>Positive Material Identification</i> dengan menggunakan <i>X-ray Fluorescence Spectrometric</i> .	89
<b>Gambar 3.5</b>	Pengujian replikasi ( <i>In-situ Metallography test</i> ).	90
<b>Gambar 3.6</b>	Pengukuran dimensi spesimen uji, (A) Spesimen uji, (B) Pengukuran ketebalan ( <i>ultrasonic thickness measurement</i> ), (C) Pengukuran dimensi ketebalan ( <i>vernier caliper</i> ), (D) Pengukuran dimensi lebar spesimen.	91
<b>Gambar 3.7</b>	Pengujian kekerasan ( <i>hardness testing</i> ), (A) <i>Leeb Hardness Tester (portable)</i> , (B) <i>Rockwell Hardness Tester (Stationary)</i> .	92
<b>Gambar 3.8</b>	Pengujian tarik ( <i>tensile test</i> ), (A) Mesin uji tarik ( <i>universal tensile machine</i> ), (B) Proses uji Tarik ( <i>tensile test</i> ).	92



<b>Gambar 3.9</b>	Pengujian Komposisi Kimia ( <i>chemical analysis testing</i> ), (A) <i>Optical Emission Spectrometric</i> , (B) <i>X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometric</i> . ....	93
<b>Gambar 3.10</b>	Peralatan preparasi spesimen sampel uji struktur mikro, (A) Proses pemotongan spesimen struktur mikro, (B) Mesin potong spesimen, (C) Mesin <i>mounting</i> , (D) Mesin poles ( <i>polishing</i> ). ....	94
<b>Gambar 3.11</b>	(A) Mikroskop, (B) Arah pengambilan sampel (Bramfitt & Bencoter, 2002). ....	94
<b>Gambar 3.12</b>	AISI/SAE 1020 plat baja (A) Mikrostruktur sisi lebar/ <i>width side (planar)</i> , (B) sisi ketebalan/ <i>thick side</i> arah longitudinal (Bramfitt & Bencoter, 2002) ....	94
<b>Gambar 3.12</b>	(A) Mesin uji <i>creep</i> , (B) Spesimen uji <i>creep</i> . ....	95
<b>Gambar 3.13</b>	Spesimen uji tarik. ....	97
<b>Gambar 3.14</b>	Spesimen uji <i>creep</i> . ....	97
<b>Gambar 4.1</b>	Grafik Hubungan nilai skala kekerasan <i>Vickers</i> , kekuatan tarik ( $T_s$ ), kekuatan luluh ( $Y_s$ ) dan nilai tegangan maksimum yang diizinkan ( $S$ ) pada fungsi temperatur pada <i>economizer tubes</i> ...	101
<b>Gambar 4.2</b>	Grafik Hubungan nilai skala kekerasan <i>Vickers</i> terhadap tekanan kerja maksimum yang diizinkan (MAWP) pada <i>economizer tubes</i> . ....	101
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik kekuatan tarik minimum ( $T_s$ ) table U, kekuatan luluh minimum ( $Y_s$ ) tabel Y-1 dan tegangan maksimum yang diizinkan ( $S$ ) tabel 1A pada fungsi temperatur material SA-210 A1, <i>ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D edisi 2015</i> (ASME BPVC Committee, 2015c) ....	102
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap tegangan elastis yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	106
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap regangan elastis yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	106
<b>Gambar 4.6</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap tegangan plastis yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	110

<b>Gambar 4.7</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap regangan plastis yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	110
<b>Gambar 4.8</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap tegangan termal yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	114
<b>Gambar 4.9</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap regangan termal yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	115
<b>Gambar 4.10</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap tegangan <i>steady-state</i> yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	119
<b>Gambar 4.11</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap regangan <i>steady-state</i> yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	120
<b>Gambar 4.12</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap regangan <i>steady-state Arrhenius</i> yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	121
<b>Gambar 4.13</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap tegangan yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	121
<b>Gambar 4.14</b>	Grafik rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap tegangan yang bekerja pada <i>economizer tubes</i> . ....	122
<b>Gambar 4.15</b>	Grafik hubungan tegangan elastis terhadap Parameter <i>Larson-Miller</i> ( $P_{LM}$ ) [(API-ASME Committee, 2016, ), (Martin Prager & Osage, 2011)]. ....	124
<b>Gambar 4.16</b>	Grafik hubungan tegangan equivalen elastis terhadap estimasi penilaian sisa umur ( <i>Remaining-Life Assessment</i> ) pada <i>economizer tubes</i> . ....	126
<b>Gambar 4.17</b>	Pengukuran dimensi arah horizontal (panjang) untuk butir <i>ferrite</i> pada <i>economizer tube-row 17</i> , menggunakan perangkat lunak <i>Gwyddion</i> . ....	127
<b>Gambar 4.18</b>	Hasil Pengukuran dimensi arah horizontal (panjang) untuk butir <i>ferrite</i> pada <i>economizer tubes-row 17</i> . ....	127
<b>Gambar 4.19</b>	Visualisasi <i>In-situ metallography</i> pada <i>economizer tubes-row 17</i> dari Lampiran A.2 (B) di titik 1 (P1). ....	128

<b>Gambar 4.20</b>	Visualisasi 3D <i>In-situ metallography</i> pada <i>economizer tubes-row 17</i> pada daerah P1 (Gambar 4.19).....	129
<b>Gambar 4.21</b>	Grafik hubungan ketebalan dinding aktual ( $t_{act}$ ) terhadap tekanan maksimum yang diizinkan (MAWP). .....	137
<b>Gambar 4.22</b>	Grafik Hubungan nilai skala kekerasan <i>Vickers</i> , kekuatan tarik ( $T_s$ ), kekuatan luluh ( $Y_s$ ) dan nilai tegangan maksimum yang diizinkan (S) pada fungsi temperatur spesimen uji. ....	137
<b>Gambar 4.23</b>	Grafik hubungan antara nilai rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap tegangan equivalen yang bekerja pada spesimen uji. ....	140
<b>Gambar 4.24</b>	Grafik hubungan antara nilai rasio jari-jari dalam ( $r_i$ ) dan jari-jari luar ( $r_o$ ) terhadap regangan equivalen yang bekerja pada spesimen uji. ....	140
<b>Gambar 4.25</b>	Grafik hubungan antara parameter <i>Larson-Miller</i> terhadap waktu pecah/putus pada spesimen uji. ....	144
<b>Gambar 4.26</b>	Grafik hubungan antara waktu terhadap regangan pada spesimen uji 2D dengan $C_{SR}, 0,0229 h^{-1}$ . ....	144
<b>Gambar 4.27</b>	Grafik hubungan antara waktu terhadap regangan pada spesimen uji 2F dengan $C_{SR}, 0,0124 h^{-1}$ .....	144
<b>Gambar 4.28</b>	Grafik hubungan antara waktu terhadap regangan pada spesimen uji 3C dengan $C_{SR}, 0,0024 h^{-1}$ . ....	145
<b>Gambar 4.29</b>	Grafik hubungan antara waktu terhadap regangan pada spesimen uji 3D dengan $C_{SR}, 0,0011 h^{-1}$ . ....	145
<b>Gambar 4.30</b>	Grafik hubungan antara waktu terhadap regangan pada spesimen uji 4D dengan $C_{SR}, 0,0930 h^{-1}$ . ....	145
<b>Gambar 4.31</b>	Mikrostruktur spesimen uji 4C ( <i>raw material</i> ), (A) Mikrostruktur sisi lebar/ <i>width side</i> , (B) Hasil pengukuran arah memanjang butir <i>ferrite</i> ( <i>width side</i> ).....	147
<b>Gambar 4.32</b>	Mikrostruktur spesimen uji 4C ( <i>raw material</i> ), (A) Mikrostruktur sisi ketebalan ( <i>thick side</i> ), (B) Hasil pengukuran arah memanjang butir <i>ferrite</i> <i>thick side</i> . ....	148

**Gambar 4.33** Mikrostruktur spesimen uji 3D, (A) Mikrostruktur sisi lebar/*width side*, (B) Hasil pengukuran arah memanjang butir *ferrite* (*width side*)..... 148

**Gambar 4.34** Mikrostruktur spesimen uji 3D, (A) Mikrostruktur sisi ketebalan (*thick side*), (B) Hasil pengukuran arah memanjang butir *ferrite* *thick side*..... 149

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Kecepatan gas buang saluran masuk yang diizinkan dan penempatan <i>tube</i> (tegak lurus terhadap aliran gas) di <i>Economizer</i> (Rayaprolu, 2009). ....	19
<b>Tabel 2.2</b>	Klasifikasi komponen <i>economizer</i> . ....	19
<b>Tabel 2.3</b>	Spesifikasi sirip heliks untuk <i>economizer tubes</i> (Rayaprolu, 2009). ....	23
<b>Tabel 2.4</b>	Bagian komponen dari <i>boiler</i> secara umum (Rayaprolu, 2009). ....	26
<b>Tabel 2.5</b>	Temperatur <i>boiler tubes</i> maksimum yang diizinkan oleh <i>ASME Code</i> dan pabrikan <i>boiler</i> (Viswanathan, 1989). ....	28
<b>Tabel 2.6</b>	Material standar yang digunakan dalam konstruksi <i>boiler</i> (Viswanathan, 1989). ....	35
<b>Tabel 2.7</b>	Nilai rasio <i>poisson</i> dan densitas material <i>Ferrous dan Nonferrous</i> (ASME BPVC Committee, 2015c). ....	46
<b>Tabel 2.8</b>	Nilai Modulus Elastisitas material <i>Ferrous</i> (ASME BPVC Committee, 2015c). ....	46
<b>Tabel 2.9</b>	Koefisien termal ekspansi untuk <i>Ferrous</i> (ASME BPVC Committee, 2015c). ....	49
<b>Tabel 2.10</b>	Konsensus ASME tabel 1, menyarankan untuk batas kimia air umpan pada <i>boiler</i> industri (Frayne, 2002). ....	57
<b>Tabel 2.11</b>	Klasifikasi kegagalan pada komponen <i>boiler</i> (ASM International, 2006). ....	58
<b>Tabel 2.12</b>	Komponen <i>boiler</i> , teknik inspeksi dan mekanisme kegagalan primer (Viswanathan, 1989). ....	71
<b>Tabel 2.13</b>	Beberapa harga nilai dari konstanta parameter tergantung waktu ( <i>time-temperature parameters</i> ) (Meyers & Chawla, 2009). ....	75
<b>Tabel 3.1</b>	Komposisi <i>economizer tube</i> (ASME BPVC Committee, 2015b). ....	96
<b>Tabel 3.2</b>	Sifat mekanik <i>economizer tube</i> (ASME BPVC Committee, 2015b). ....	97

## DAFTAR SIMBOL

$A$	Konstanta/ <i>pre-exponential</i>	--
$A_i$	Luas penampang awal	mm
$A_f$	Luas penampang akhir	mm
$\alpha$	koefisien ekspansi	--
$D_m$	Diameter mean	mm
$d_i$	Diameter awal	mm
$d_f$	Diameter akhir	mm
$\Delta T; (T(r))$	Beda temperatur atau distribusi temperatur	° C atau K
$\Delta l$	perubahan panjang	mm
$E$	Modulus Elastisitas	N/mm <sup>2</sup>
$e$	Konstanta faktor penambahan ketebalan untuk tube yang diperluas/ <i>expanded</i>	--
$\epsilon_e$	Regangan teknik	--
$\epsilon_f$	Regangan teknik pada kondisi patah	--
$\epsilon_{He}$	Regangan elastis tangensial/ <i>circumferential/hoop stress</i>	--
$\epsilon_{Eq}$	Regangan equivalen ( <i>Von-Mises</i> )	--
$\epsilon_{Ze}$	Regangan elastis aksial/longitudinal	--
$\epsilon_{Re}$	Regangan elastis radial	--
$\epsilon_{Hp}$	Regangan plastis tangensial/ <i>circumferential/hoop stress</i>	--
$\epsilon_{Zp}$	Regangan plastis aksial/longitudinal	--
$\epsilon_{Rp}$	Regangan plastis radial	--
$\epsilon_{Ht}$	Regangan termal tangensial/ <i>circumferential/hoop stress</i>	--
$\epsilon_{Zt}$	Regangan termal aksial/longitudinal	--
$\epsilon_{Rt}$	Regangan termal radial	--

$\epsilon_{Ht}$	Regangan <i>steady-state</i> tangensial/ <i>circumferential/hoop stress</i>	--
$\epsilon_{Zss}$	Regangan <i>steady-state</i> aksial/longitudinal	--
$\epsilon_{Rss}$	Regangan <i>steady-state</i> radial	--
$\dot{\epsilon}_{ss}$	Regangan <i>steady-state Norton-Bailey</i>	--
$\dot{\epsilon}_{ssArrh}$	Regangan <i>steady-state Arrhenius</i>	--
$G$	Modulus Geser	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$H_{BN}$	Nilai Skala Kekerasan <i>Brinell</i>	HBN atau HBW
$HRB$	Nilai Skala Kekerasan <i>Rockwell</i> Tipe B	HRB
$H_{VN}$	Nilai Skala Kekerasan <i>Vickers</i>	HVN
$l_f$	panjang spesimen akhir	mm
$l_i$	panjang spesimen awal	mm
$MAWP$	Tekanan Maksimum yang diizinkan	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$n$	Konstanta ( <i>Norton law</i> )	--
$O_D$	Diameter luar aktual silinder/ <i>tube</i> /pipa	mm
$P$	Tekanan Internal	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$P_{LM}$	Parameter Larson-Miller	--
$RA$	Pengurangan luas penampang	%
$R$	Konstanta gas universal (8,314)	J/mol. K
$R_T$	Rasio nilai kurva tren rata-rata temperatur dependen antara kekuatan tarik pada temperatur tertentu terhadap kekuatan Tarik pada temperatur ruang	--
$r_o$	Jari-jari luar	mm
$r_i$	Jari-jari dalam	mm
$r$	Jari-jari pada jarak tertentu ( <i>mean</i> )	mm
$S$	Tegangan Maksimum yang diizinkan	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$S_H$	Pengerasan regangan	--
$T$	Temperatur	°C atau K
$T_S$	Kekuatan tarik	N/mm <sup>2</sup> atau MPa

$T_{ST}$	Kekuatan tarik pada temperatur tertentu	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$t$	Ketebalan dinding silinder/ <i>tube</i> /pipa	mm
$t_{act}$	Ketebalan dinding aktual silinder/ <i>tube</i> /pipa	mm
$t_{min}$	Ketebalan dinding perhitungan minimum silinder/ <i>tube</i> /pipa	mm
$t_r$	Waktu pecah/putus	Jam atau <i>hour</i>
$\sigma_e$	Tegangan teknik	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Eq}$	Tegangan Equivalen ( <i>Von-Misses</i> )	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{He}$	tegangan elastis tangensial/ <i>circumferential</i> / <i>hoop stress</i>	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Ze}$	Tegangan elastis aksial/longitudinal	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Re}$	Tegangan elastis radial	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Hp}$	tegangan plastis tangensial/ <i>circumferential</i> / <i>hoop stress</i>	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Zp}$	Tegangan plastis aksial/longitudinal	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Rp}$	Tegangan plastis radial	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Ht}$	tegangan termal tangensial/ <i>circumferential</i> / <i>hoop stress</i>	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Zt}$	Tegangan termal aksial/longitudinal	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Rt}$	Tegangan termal radial	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Hss}$	tegangan <i>steady-state</i> tangensial/ <i>circumferential</i> / <i>hoop stress</i>	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Zss}$	Tegangan <i>steady-state</i> aksial/longitudinal	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\sigma_{Rss}$	Tegangan <i>steady-state</i> radial	N/mm <sup>2</sup> atau MPa
$\nu$	rasio <i>poisson</i> 's	--
$w$	Faktor pelemahan kekuatan sambungan las	--
$Y_S$	Kekuatan luluh	N/mm <sup>2</sup> atau MPa



# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Boiler berfungsi untuk memanaskan air kemudian digunakan sebagai pembangkit uap pada sistem pembangkit tenaga listrik. Komponen *boiler* terutama adalah *tubes* baja, *tubes* baja tahan karat, dan baja paduan suhu tinggi. Kegagalan *boiler tubes* merupakan fenomena yang sering terjadi pada sistem pembangkit tenaga listrik (Dhua, 2010). Ada banyak alasan untuk kegagalan *boiler tubes*, seperti *pitting* (Liu, 2013), retak korosi tegangan (Hong et al., 2019), retak (Othman et al., 2009), *stress-rupture* (Munda et al., 2018), *creep* (Gupta et al., 2019), korosi/erosi (Rahman et al., 2010), kerusakan hidrogen (Ahmad & Purbolaksono, 2010) dan kelelahan termal (Noguchi et al., 2018). Fenomena embrittlement dapat terjadi karena kesalahan desain atau degradasi struktural material *boiler tubes* (Cardoso et al., 2012), seperti *carbide roughing*, pembentukan fase sigma, dan *temper embrittlement*.

Kegagalan boiler industri telah menjadi masalah signifikan di pembangkit listrik bahan bakar fosil. Dari data yang dipublikasikan, sepuluh besar penyebab kegagalan di mana *creep (long-term overheating)* adalah 23,4 %, diikuti oleh kelelahan 13,9 %, termal 8,6 %, korosi 5,3 %, korosi abu 12,0 %, kerusakan hidrogen 10,6 %, kegagalan las 9,0 %, suhu tinggi (*short-term overheating*) 8,8 %, erosi 6,5%, *pitting* oksigen (5,6%), serangan kaustik 3,5 % dan retak korosi tegangan 2,6 % (Rahman et al., 2010). Paparan baja *boiler tubes* pada suhu tinggi menyebabkan perubahan struktur mikro konstituen baja. Perubahan mikrostruktur terjadi bahkan di bawah kondisi desain dengan umur operasi yang panjang. Pembentukan dipercepat ketika baja *tubes* dioperasikan di atas kondisi desain. Operasi di atas kondisi desain ini menyebabkan *overheating*, yang mengakibatkan kegagalan *tubes* melalui mekanisme kegagalan atau *overheating* jangka panjang (Saha & Roy, 2017).

Penggunaan *economizer* di *boiler* telah ada selama hampir 150 tahun, bersama dengan *boiler* itu sendiri. Untuk *boiler* modern, *economizer* dapat meningkatkan efisiensi terutama pada *water tube boiler*. Hal ini memungkinkan *economizer* untuk diintegrasikan ke dalam desain *boiler*, biasanya terletak di antara *superheater* konveksi dan pemanas udara (jika dilengkapi). Pada *boiler* dengan tekanan kerja 7 sampai 17 bar, temperatur massa air di dalam *boiler* biasanya berkisar antara 170 – 210 °C. Pada perbedaan suhu 30 - 50 °C antara gas buang dan suhu air, suhu gas keluar *boiler* tidak dapat diturunkan secara ekonomis di bawah 200 - 260 °C, tergantung pada tekanan operasi menggunakan *economizer* yang mensuplai air umpan melalui gas buang. Air umpan, biasanya pada suhu 30 °C - 100 °C, merupakan media pendingin lebih lanjut untuk gas buang dan memberikan potensi pemanfaatan panas ekstra (A. Snow, 2002).

*Economizer* memiliki suhu yang cukup rendah dari semua permukaan penukar panas di *boiler*. Oleh karena itu biasanya dapat dibuat dari baja karbon. *Economizer* ditempatkan sebagai gas buang terakhir untuk pertukaran panas uap-air. Aliran gas buang memiliki suhu rendah, sehingga pengotoran biasanya bukan masalah besar. Oleh karena itu, jarak transversal dan longitudinal dapat saling berdekatan. *Economizer* memiliki *tubes* baja karbon dari diameter luar 30 hingga 50 mm diameter luar. Ruang transversal dan longitudinal hampir sama, dari 50 hingga 150 mm. Karena suhu rendah, koefisien perpindahan panas di *economizer* cenderung kecil. *Economizer tubes* dengan sirip dapat dibuat untuk meningkatkan panas permukaan. *Boiler tubes* dibagi menjadi beberapa kelas, dengan spesifikasi umum bahwa baja karbon mengandung paling banyak besi. Ini digunakan secara universal di semua bagian tekanan hingga 400-450 °C. *Furnace*, *economizers*, *drums*, dan *pipe fittings* biasanya terbuat dari baja karbon biasa. *Tubes* paduan adalah *tubes* baja dengan hingga 15 % kromium dengan molibdenum dan aditif lainnya. *Tubes* paduan dapat digunakan pada temperatur yang lebih tinggi daripada baja karbon. Jenis baja ini digunakan pada *superheater* dan dapat digunakan pada *boiler* yang paling umum (Vakkilainen, 2017).

*Boiler* dan komponennya yang beroperasi pada temperatur tinggi tidak terlepas dari beban kerja, baik beban eksternal maupun internal, yang pada akhirnya

dapat mengalami penurunan bahkan kegagalan. Beberapa kegagalan hanya dipengaruhi oleh satu parameter beban, sementara parameter beban juga memainkan peran untuk yang lain. Sebagai contoh, pada mekanisme kegagalan korosi, laju degradasi ditentukan oleh kombinasi termal (suhu), kimia (keasaman, nilai pH), dan muatan listrik (arus). Di sisi lain, berbagai jenis beban juga akan berperan sebagai beban sekunder dalam pengurangan kapasitas. Khusus untuk gangguan listrik, beban sekunder seringkali menyebabkan penurunan kapasitas karena beban primer yang mengatur (Tinga, 2013).

Dalam beberapa kasus yang terjadi di *economizer tubes*, salah satu penyebab utama kegagalan adalah korosi yang dimulai pada permukaan luar, di mana  $H_2SO_4$  mengembun selama periode perawatan. Korosi yang terjadi pada *economizer tubes* dihasilkan dari reaksi antara senyawa belerang yang berupa gas dengan paparan permukaan logam. *Economizer tubes* terbuat dari baja karbon 1968 BS 3059. *Economizer tubes* berhubungan langsung dengan pembentukan sulfat terhidrasi di *economizer*, yang rentan secara termodinamika pada suhu rendah (di bawah  $450\text{ }^\circ\text{C}$ ) dan dengan adanya sulfur oksida ( $SO_2$ ) dalam jumlah besar dan oksigen ( $O_2$ ). Akibatnya, *tubes* mengalami penipisan logam yang menyebabkan *economizer tubes* mengalami kegagalan dan pecah (Moakhar et al., 2013).

Dengan kasus penyebab serupa, hasil investigasi mengenai kegagalan *economizer tube* dari *boiler* tekanan tinggi di pembangkit listrik. Kegagalan yang diamati adalah pecahnya salah satu *tube* dan lubang besar atau lubang jarum di *tube* lainnya. *Boiler* memiliki masa operasi 116.123 jam sejak awal. *Economizer tube* terbuat dari baja karbon SA-210 A1. Korosi titik embun menyebabkan kegagalan *economizer tube*. Temperatur air umpan yang relatif rendah menurunkan temperatur *tubes* logam dan meningkatkan kondensasi  $H_2SO_4$ . Lapisan ujung luar pada *tube*, sebagai hasil dari pelapisan minyak *bunker*, lapisan ujung luar pada *tube* selanjutnya membantu menurunkan suhu tabung penyimpanan logam dengan meningkatkan kondensasi  $H_2SO_4$  di atas lapisan dan korosi pada dinding *tube* (Mobin et al., 2008).

J. Ahmad dan rekan, dalam penelitian mereka, mempresentasikan investigasi kegagalan pada *rear water wall tubes* dengan SA-210 Gr. A1 beroperasi pada

temperatur 350-360 °C. Dengan inspeksi visual di lokasi kerja, ketebalan dinding *tubes* dan pemeriksaan mikroskopis dari *rear water wall tubes* telah gagal dengan lubang terbuka lebar dan terletak di area bengkok bawah. Pengukuran ketebalan dinding di tempat dilakukan pada semua *rear water wall tubes* yang terletak pada tingkat yang sama dengan *tubes* yang pecah. Pemeriksaan mikroskopis daerah pecah yang gagal dan daerah yang agak jauh dari *tubes* yang diterima juga dilakukan untuk menentukan mekanisme kegagalan dan akar penyebab kegagalan. Penyebab kegagalan dan temuan dari inspeksi lokasi, pengukuran ketebalan dinding, pemeriksaan mikroskopis, dan analisis *creep* akhirnya dapat mengungkapkan mekanisme kegagalan dan akar utama kegagalan. Mekanisme kegagalan Identifikasi akibat kombinasi penipisan dinding lokal yang signifikan dari *rear water wall tubes* karena erosi abu terbang dan proses masalah *creep* yang diaktifkan secara termal karena kenaikan temperatur (Ahmad et al., 2009).

Investigasi penyebab kegagalan *boiler tubes* sangat penting untuk mencegah kegagalan *tubes* di masa depan. Mengidentifikasi mekanisme kegagalan akan membantu dalam mengevaluasi penilaian sisa hidup (Dhua, 2010). Pendeteksian secara preventif terhadap komponen *boiler* dapat dilakukan dengan metode *monitoring* dan inspeksi secara berkala dengan maksud untuk mencegah terjadinya masalah di masa yang akan datang.

Dari beberapa kasus-kasus kegagalan tersebut di atas, penulis berinisiatif untuk melakukan penelitian terkait dengan degradasi material pada komponen *boiler*, khususnya *economizer tubes* yang telah beroperasi pada periode tertentu. Dalam hal ini akan dilakukan investigasi dan identifikasi untuk mendapatkan informasi terkait objek dimaksud. Pengumpulan data mengenai material, kondisi operasi, lingkungan serta aspek lainnya yang menjadi parameter dalam metodologi pengujian yang dilakukan. Pendekatan analisis berupa perilaku material pada temperatur yang tinggi dapat menjadi pokok bahasan yang akan digunakan.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Dalam penelitian ini akan diteliti beberapa hal mengenai:

1. Bagaimana degradasi material komponen *tubes boiler*, khususnya *economizer tubes* yang telah beroperasi selama periode tertentu?
2. Bagaimana perilaku *creep* yang bekerja pada material komponen *economizer tubes*?
3. Bagaimana perkiraan penilaian sisa umur pakai (*Remaining Life Assesment*) pada komponen *economizer tubes*?
4. Bagaimana perbandingan hubungan nilai kekerasan terhadap kekuatan tarik berdasarkan hasil pengujian laboratorium?
5. Bagaimana menentukan penilaian umur pada eksperimen yang dilakukan?

### **I.3 Tujuan Penelitian**

Dari rumusan masalah dapat diketahui tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Untuk menganalisis potensial degradasi yang terjadi pada *economizer tubes* yang telah beroperasi.
2. Menganalisis perilaku *creep* yang terjadi pada material *economizer tubes*.
3. Untuk menganalisis sisa umur pakai (*Remaining Life*) dari *economizer tubes*.
4. Untuk mengetahui hubungan nilai kekerasan terhadap nilai kekuatan tarik sebagai dasar perhitungan kekuatan konstruksi *boiler* dan bagian bertekanan.
5. Untuk mengetahui penilaian umur yang dilakukan pada eksperimen di laboratorium.

### **I.4 Batasan Masalah**

Dalam melakukan penelitian ini akan diterapkan metodologi analisis terpadu:

1. Jenis *boiler* merupakan tipe *Circulating Fluidized Bed (CFB)* dengan *Economizer tubes* (*area convection*) sebagai bagian dari *boiler tubes* yang akan diteliti serta data informasi terkait lainnya yang diperoleh dari perusahaan.
2. Investigasi pada lokasi objek PLTU dengan menggunakan jenis pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Test/NDT*) yang meliputi:
  - A. Pemeriksaan *Visual* dan pengukuran dimensi dengan menggunakan meter *roll*, *Vernier caliper* dan *Ultrasonic Wall Thickness Tester* serta dokumen *manufacturer data report*;

- B. Pengujian kekerasan material dengan menggunakan *Hardness Tester Leeb Portable*;
  - C. Pengujian komposisi kimia material logam metode *Positive Material Identification* dengan menggunakan *X-Ray Fluorescence spectrometric Portable*;
  - D. Pengujian *In-situ Metallography* (replika) sebagai data sekunder.
3. Pengujian di laboratorium dengan jenis pengujian merusak (*Destructive Test*) dan pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Test/NDT*) yang meliputi:
- A. Pemeriksaan *Visual* dan pengukuran dimensi dengan menggunakan meter *roll*, *Vernier caliper* dan *Ultrasonic Wall Thickness Tester*;
  - B. Pengujian kekerasan material dengan menggunakan *Hardness Tester Leeb (Portable)*;
  - C. Pengujian kekuatan tarik (*tensile test*);
  - D. Pengujian komposisi kimia (*chemical analysis*) material logam.
  - E. Pengujian struktur mikro material (*Metallography test*);
  - F. Pengujian *creep-rupture*.
4. Melakukan analisis terkait data yang diperoleh dari kedua jenis pengujian terutama dalam menganalisa tegangan-regangan (*stress-strain*) yang terjadi serta menentukan perkiraan penilaian sisa umur (*Remaining Life Assesment*) dari material *economizer tubes* dengan teknik ekstrapolasi metode Parameter *Larson-Miller*.
5. Variabel yang tidak dapat dikendalikan dianggap konstan, meliputi: kelelahan (*fatigue*), keausan (*wear*), oksidasi dan korosi.

## **I.5 Manfaat Penelitian**

Dari hasil penelitian ini diharapkan memiliki beberapa manfaat baik bagi peneliti maupun masyarakat luas diantaranya:

1. Dengan mengetahui potensial degradasi yang terjadi pada *boiler*, khususnya pada *economizer tubes*, manfaat bagi masyarakat industri secara umum dapat meminimalisir dengan melakukan tindakan preventif terhadap faktor-faktor penyebab yang mempengaruhi terjadinya hal tersebut.

2. Dengan mengetahui kekuatan konstruksi bagian bertekanan dan estimasi umur pakai dari komponen *boiler* melalui evaluasi, kontrol dan inspeksi yang baik secara berkala dapat menghindari kegiatan perbaikan yang tidak terencana, sehingga dapat menghemat biaya operasional bagi pihak manajemen perusahaan.
3. Bagi masyarakat sekitar lingkungan dapat terhindar dari bahaya yang dapat ditimbulkan akibat dari kegagalan material, yaitu bahaya peledakan ataupun potensi resiko berbahaya lainnya.

## **I.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika dalam penulisan ini dibagi menjadi 5 (lima) bab dan beberapa sub bab, terdiri dari:

### **BAB I Pendahuluan.**

Pada bab ini berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

### **BAB II Tinjauan Pustaka.**

Pada bab ini berisi tentang landasan teori atau studi pustaka yang digunakan dalam mendukung analisis penelitian.

### **BAB III Metode Penelitian.**

Pada bab ini berisi tentang metode penelitian yang digunakan, tempat dan waktu penelitian, alat dan bahan yang digunakan, eksperimental setup dan bagan alir penelitian.

### **BAB IV Analisa dan Pembahasan.**

Pada bab ini berisi tentang hasil analisa dan pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan.

### **BAB V Penutup.**

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

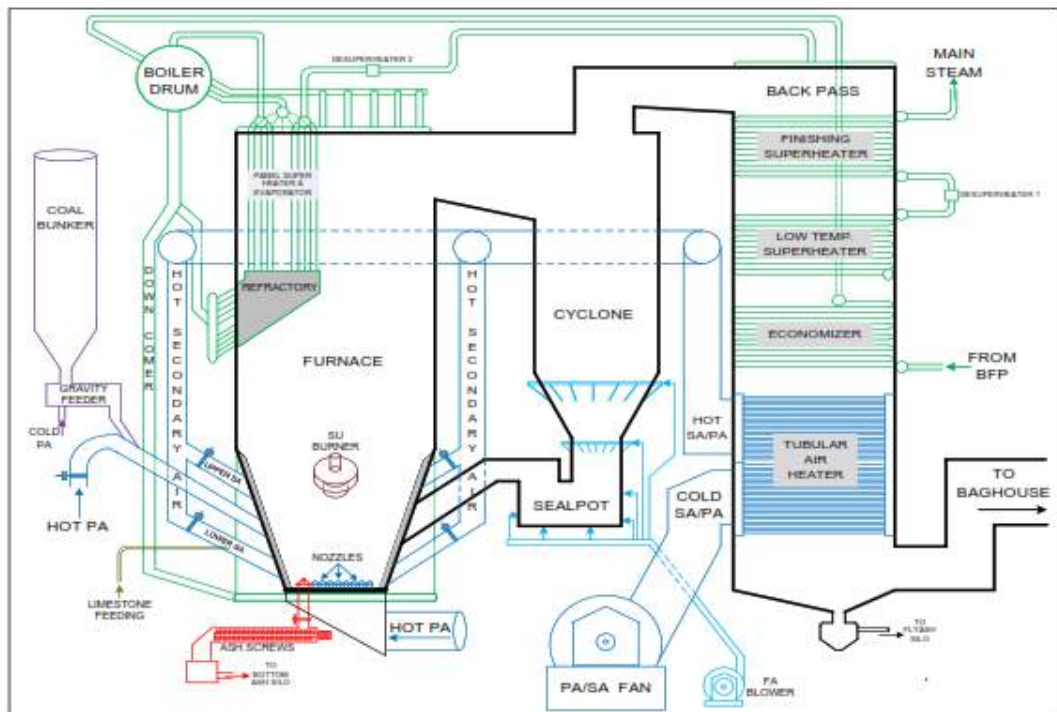
### II.1 Pendahuluan

Untuk mengurangi target subsidi pemerintah pada bahan bakar dan mengurangi emisi “*green house gas*”, pemerintah telah mengembangkan program bahan bakar minyak (BBM) nasional dan pengendalian emisi gas buang di sektor kelistrikan. Meski subsidi BBM dan emisi gas rumah kaca di sektor transportasi lebih tinggi, sektor kelistrikan tetap perlu mendapat perhatian. Kinerja pembangkit listrik tenaga batubara (PLTU) ditentukan oleh teknologi konversi energinya dan kuantitas serta kualitas batubara sebagai sumber bahan bakar. Jika semuanya sesuai dengan desain, namun sumber bahan bakar yaitu batu bara tidak tersedia sesuai kebutuhan dalam konversi energi, maka tentu saja kinerja PLTU tersebut tidak bisa sesuai harapan. Cadangan batubara di Indonesia saat ini cukup besar, yaitu sebesar  $\pm 21$  miliar ton atau sekitar 2,2% dari cadangan dunia, namun dengan nilai kalori rendah sampai sedang (BPPT-PTKKE, 2013).

Salah satu jenis boiler yang menggunakan batubara sebagai bahan bakarnya adalah *Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler*. *Fluidized bed combustion (FBC)* adalah tungku yang menggunakan media pengaduk seperti pasir kuarsa, silika, dan media lainnya. Campuran homogen antara gas/udara dengan butiran media akan terjadi. Sistem ini menggunakan konsep turbulensi benda padat yang terjadi pada proses pembakaran, dimana terjadi perpindahan panas dan massa yang tinggi dalam sistem pembakaran. Teknologi generasi kedua disebut *Circulation fluidized bed combustor (CFBC)*, sering disingkat CFB. Pada CFB, partikel batubara yang belum terbakar (*unburned coal*) disirkulasikan kembali ke ruang bakar untuk mencapai efisiensi pembakaran yang lebih tinggi. Pada umumnya pembangkit listrik yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar akan berhubungan dengan hasil pembakaran batubara dan polutan dalam gas buang yang mengandung SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan partikulat. Partikulat berupa abu disaring menggunakan *bag filter*. NO<sub>x</sub> direduksi dengan pembakaran suhu rendah di tungku CFB, sedangkan SO<sub>2</sub> direduksi dengan injeksi batu kapur (CaCO<sub>3</sub>) ke dalam tungku CFB selama proses



pembakaran batubara pada 850 °C untuk mengikat SO<sub>2</sub>. Gas buang setelah melewati *bag filter* dialirkan ke cerobong asap (*chimney*) setinggi ± 150 m yang berfungsi sebagai pendispersi gas buang sehingga batas emisi gas buang yang dibuang ke lingkungan sesuai ketentuan yang berlaku. Gambar 2.1 sebagai skema ilustrasi dari *Circulating Fluidized Bed boiler*.



**Gambar 2.1** Skema *Boiler CFB* Tarahan (BPPT-PTKKE, 2013).

CFB adalah teknologi *boiler* yang menggunakan sistem pembakaran bersirkulasi melalui 3 (tiga) peralatan utama, yaitu:

- Furnace*: ruang pembakaran.
- Cyclone*: ruang pemisah antara *flue gas* dan batu-bara yang belum terbakar berdasarkan beda berat jenis.
- Backpass/Second pass*: pemanfaatan kalori dari *flue gas*.

PLTU dengan menggunakan jenis *CFB boiler* mengangkat konsep ramah lingkungan karena memiliki:

- Waste water treatment plant*, mengolah limbah cair sehingga aman dibuang ke lingkungan.

- b. *Ash handling system*, mengolah limbah abu sehingga tidak mencemari lingkungan.
- c. CFB system, yang mensirkulasikan kembali batu bara yang belum terbakar di furnace dengan efisien, sehingga pembakaran lebih baik dan emisi buangan  $SO_X$  dan  $NO_X$  yang lebih rendah.

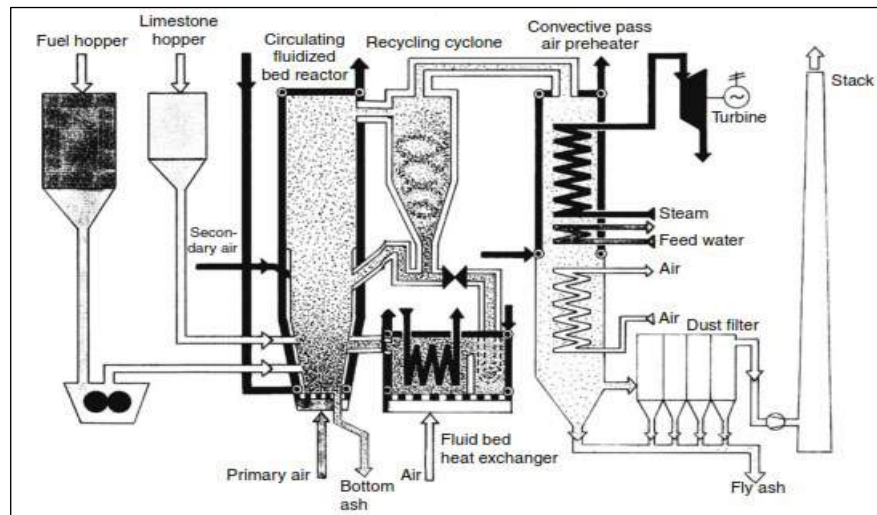
## II.2 *Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*

CFB Boiler dikembangkan pada tahun 1970-an, kemudian dikomersialkan pada tahun 1980-an di Eropa. Desain awal sudah jauh lebih baik. Banyak desain eksklusif menghilang karena akhir 1990-an, penurunan tajam di pasar batubara, dan hilangnya banyak pembuat *boiler* yang sudah mapan. Ada banyak konstruksi refraktori pada awalnya, dan kecepatan gas tinggi, mengakibatkan erosi yang tinggi. Masalah ini telah diatasi, dan desain generasi kedua mendapatkan hasil yang lebih baik.

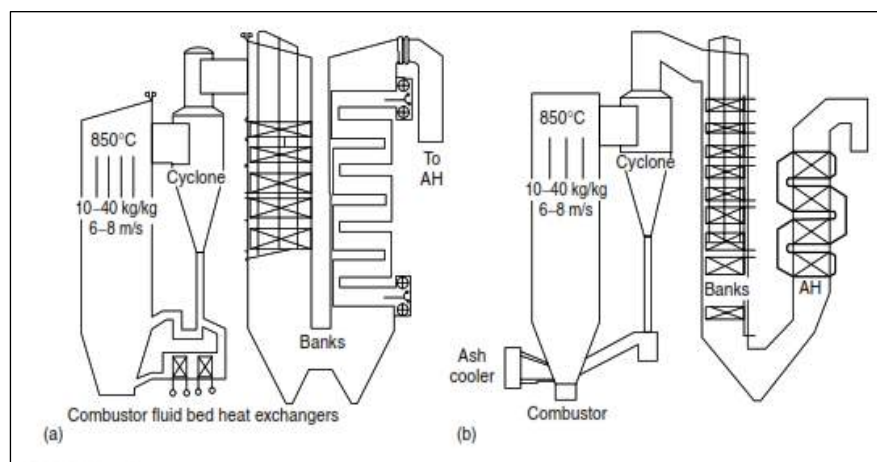
Baik dalam desain perintis *Lurgi* dan *Ahlstrom*, parameter dasar sangat serupa kecuali:

1. Pada desain *Lurgi* menggunakan *Fluid Bed Heat Exchangers* (FBHEs) untuk tahap penyelesaian *superheater* (SH) dan *reheater* (RH) dan dengan demikian diperlukan perpindahan panas dari abu yang bersirkulasi untuk kontrol temperatur pembakaran.
2. Sementara untuk desain *Ahlstrom* menggunakan dinding divisi dan panel *tube* omega di *freeboard* untuk perpindahan panas dan kontrol temperatur.

Gambar 2.2 menunjukkan teknologi *hot cyclone* yang dikembangkan oleh *Lurgi*. Kedua teknologi tersebut dibandingkan pada gambar 2.3. Kecepatan gas, pemuatan debu, parameter siklon dan konstruksi jalur kedua semuanya sebanding. Secara umum konstruksi di masa ini, *Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler* seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.4 beserta beberapa bagian dari sistemnya (Rayaprolu, 2009).



**Gambar 2.2** Proses pembakaran *Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler Lurgi* (Rayaprolu, 2009).



**Gambar 2.3** *Hot cyclone CFB* : (A) Desain *Lurgi*, (B) Desain *Ahlstrom* (Rayaprolu, 2009).

### II.2.1 Udara Pembakaran (*Combustion Air*)

Sistem pembakaran udara yang disuplai dalam *CFB boiler* di dua tingkat (Rayaprolu, 2009), yaitu :

1. Sekitar 60 % di bagian bawah ruang bakar pada tekanan tinggi untuk melembabkan *bed*.
2. Dan sekitar 40 % pada area *freeboard* untuk menyelesaikan pembakaran.

Sementara untuk kecepatan fluidisasi diperkirakan berada diantara kisaran 7 m/s sampai dengan 8 m/s (berada 23 hingga 26 ft/s) dan telah direduksi sekitar 6 m/s (20 ft/s). Hasil split udara dalam pembakaran bertahap dan karenanya temperatur menjadi rendah. *Fixed Carbon* (FC) terbakar terutama di bagian bawah ruang bakar dan *volatiles* di tingkat atas. Ketika aliran abu yang tebal ditambahkan ke ruang bakar sebagai abu resirkulasi dari tungku dan siklon, temperatur lapisan lebih lanjut ditekan.

Dalam CFB boiler, *Primary Air* hanya membentuk setengah dari total udara. Area *bed* juga jauh lebih kecil. Biasanya memiliki nosel berdiameter besar dengan berat lebih sedikit, biasanya dengan jarak 200–250 mm (8-10 inci) dibandingkan dengan banyak nosel berdiameter kecil pada jarak 100 mm (4 in.).

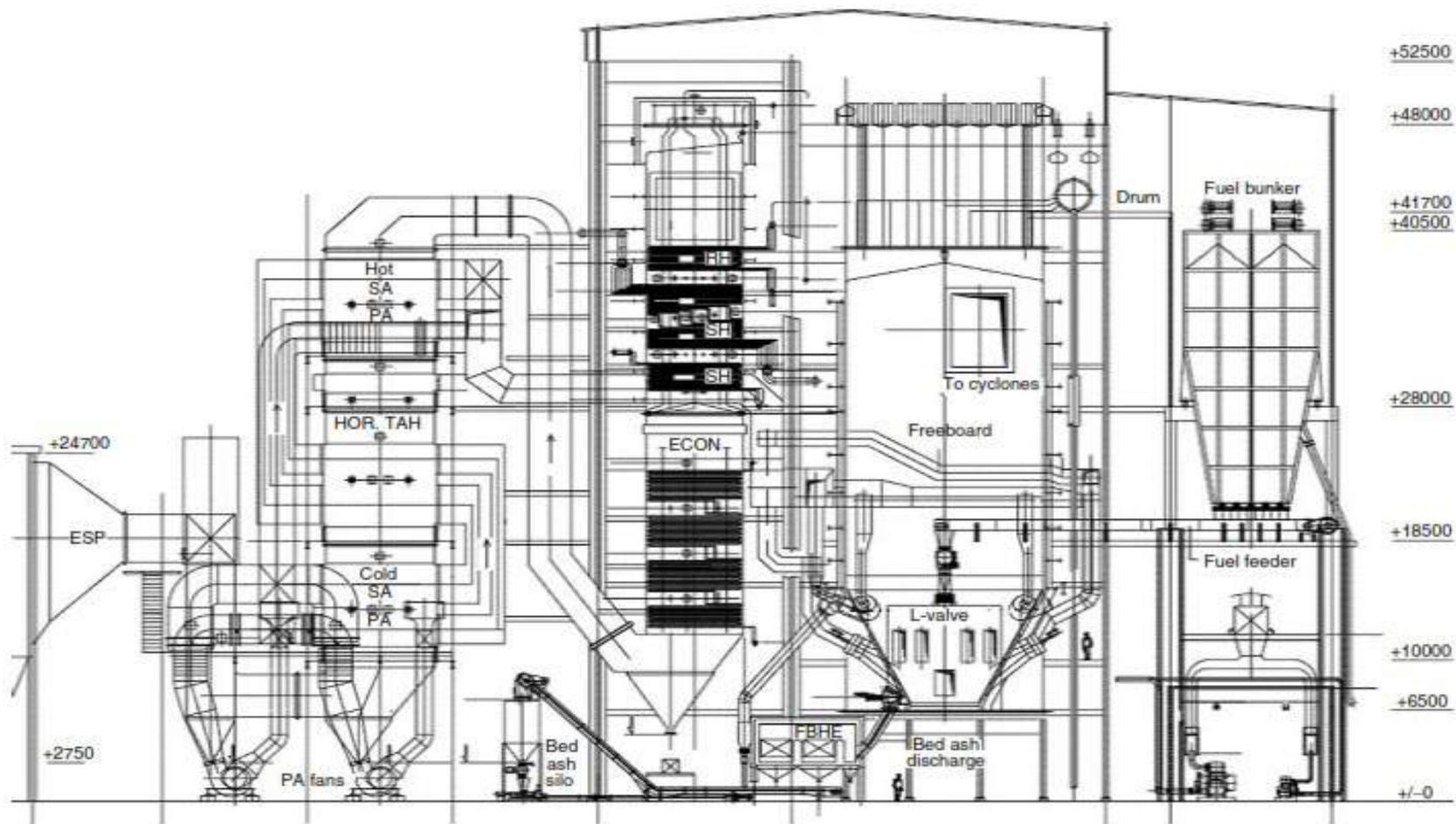
## II.2.2 Bahan Bakar (*Fuel*) dan Penyerap (*Sorbent*)

Bahan bakar dan *sorbent* selalu dimasukkan ke dalam ruang bakar dari atas. Bahan bakar remuk biasa ukurannya 10 mm atau lebih, untuk *lignite* 8 mm untuk batubara dan 6 mm untuk batubara antrasit atau volatil rendah.

*Fines* (batu bara halus) dalam bahan bakar hingga 40 % hingga 1 mm dan kelembaban permukaan hingga 15 % dapat diterima. Ini membuat CFB boiler teknologi yang sangat serbaguna.

Ukuran batu kapur biasanya 1 mm, tergantung pada kemurnian dan reaktivitas. Ukuran bahan bakar dan *sorbent* sangat penting untuk interaksi yang baik antara keduanya. Dari Gambar 8, yang merupakan batubara untuk sulfur 1 %, desulfurisasi yang sangat tinggi dapat dicapai dalam CFB boiler dengan konsumsi kapur yang relatif rendah.

Di sebagian besar CFB boiler, bahan bakar dan batu kapur dimasukkan ke dalam ruang bakar boiler bersama padatan resirkulasi dari *seal pot*. Ini membantu mengeringkan kelembaban dan memanaskan padatan. Biasanya ada dua atau empat lubang (nosel injeksi) di ruang bakar untuk memberi bahan bakar. Bukaannya dibatasi. Atau transportasi pneumatik dan injeksi melalui *secondary air* nosel telah diadopsi (Rayaprolu, 2009).



**Gambar 2.4** Boiler 125 MW, lignite-fired hot cyclone circulating fluidized bed combustion (CFBC) dengan dua siklon. AH, air heater; ECON, economizer; ESP, electrostatic precipitator; FBHE, fluid bed heat exchanger; PA, primary air; SA, secondary air; SH, superheater; TAH, tubular air heater (Rayaprolu, 2009).

### II.2.3 Ruang Bakar (*Combustor*)

Ruang bakar yang lebih rendah, hingga level udara tersier (*tertiary air*), selalu dalam pengurangan berat zona karena udara subtoikiometrik. Ini membantu dalam menurunkan  $NO_x$  yang dihasilkan oleh reaksi  $C$  dan  $CO$  dengan  $NO_2$ .

Area *freeboard*, selain turbulensi tinggi, ada waktu tinggal yang cukup 4-5 detik di ruang bakar untuk membakar bahan bakar secara efisien dan juga untuk desulfurisasi lebih lengkap. Ketinggian ruang bakar biasanya 30–35 m (100 hingga 115 ft) dari ujung nozel udara. Kecepatan gas adalah 5,5–6,0 m/s (18 hingga 20 ft/s) untuk menghasilkan pembakaran transfer panas yang baik ke dinding, laju erosi yang lebih rendah, dan stabilitas yang baik pada beban rendah selama *turndown*.

Gas buang yang sarat debu bergerak dengan kecepatan tinggi dan mempertahankan selip tinggi antara gas dan debu. Debu yang terpisah bergerak di sepanjang dinding dengan ketebalan 150 mm (6 in.) Atau lebih. Lapisan abu panas inilah yang berkontribusi panas ke dinding dengan konduksi tidak seperti radiasi dari api dalam *boiler* konvensional. Seluruh ruang pembakaran hampir pada temperatur yang sama, yang diinginkan untuk pembakaran dan *desulfurisasi*.

Perhatian yang lebih besar diperlukan dalam pembuatan panel membran CFB *boiler* karena mereka mengalami banyak aliran abu di sepanjang *tube* dan akibatnya rentan terhadap erosi. Kegagalan *tube* apa pun menghasilkan banyak waktu henti dan pekerjaan perbaikan, karena air bereaksi dengan  $CaO$  dan membentuk blok *gypsum* yang sangat besar pada saat *boiler* mendingin. Penghapusan blok-blok ini dengan bor pneumatik di sekitar nosel udara adalah tugas yang sulit di mana beberapa nosel mungkin rusak (Rayaprolu, 2009).

### II.2.4 *Hot Cyclone*

Siklon adalah jantung dari sistem CFB *boiler* (Rayaprolu, 2009). Statis dan tidak mengesankan kecuali ukurannya, siklon adalah desain intensif dan menentukan kinerja sistem. Gas buang panas pada temperatur berkisar 850 °C, bersama dengan debu, biasanya pada 10-20 kg/Nm<sup>3</sup> (0.624-1.25 lb/Nft<sup>3</sup>), meninggalkan *freeboard* dan masuk ke siklon untuk muncul sepenuhnya. Tingkat debu begitu tinggi sehingga cenderung menggambarkan campuran itu sebagai debu

yang sarat gas dan bukannya gas yang sarat debu. Efisiensi siklon berkisar 99 % untuk partikel 100  $\mu\text{m}$  dan lebih banyak. Gas-gas dipercepat ke kecepatan sekitar 25 hingga 28 m/s (80-90 ft/s) pada tangensial masuk dan dipandu di sepanjang kerucut bawah. Di ujung kerucut, gas terlepas dari debu dengan *helix* terbalik dan mengalir ke atas. Efisiensi pengumpulan tingkat tinggi dari siklon sangat vital dalam mewujudkannya kinerja dari *boiler* (Rayaprolu, 2009).

### II.2.5 *Second Pass*

Pada area lintasan kedua (*second pass*), gas panas yang masuk sebelumnya telah melalui siklon yang mana gas sisa pembakaran telah dibersihkan. Selanjutnya pada area ini terjadi perpindahan panas konveksi pada permukaan bagian yang dilalui seperti *superheater*, *economizer* dan *air heater*. Dengan gas yang masuk berada dalam kisaran 850 °C, penutup dari *pass* kedua harus dari konstruksi dinding membran atau panel. Pertimbangan desain untuk berbagai permukaan konveksi adalah sama dengan boiler *Pulverized Fuel* konvensional (Rayaprolu, 2009).

Pada area *superheater*, gas di daerah lintasan kedua panas tetapi tidak berdebu. Untuk temperatur uap berada dalam kisaran 520 °C (970 °F), konveksi *superheater* pada lintasan kedua sudah memadai. Untuk temperatur *superheater* yang lebih tinggi dibandingkan *Reheater*, *fluid bed heat exchanger* (FBHE) atau *heating surfaces* pada lintasan pertama. Hal ini diperlukan untuk desain yang lebih ekonomis, mentransformasikan panas dari abu yang bersirkulasi.

Selanjutnya area *economizer* dengan permukaan pemanasan yang utama dalam *boiler*. Untuk desain yang konvensional ditandai dengan *tubes* polos yang lazim digunakan.

Untuk *air heater* berbentuk *tubes* lebih disukai dalam *fluidized bed combustion* karena perbedaan tekanan besar antara udara dan gas. *Air heater* berbentuk *tubes* horizontal dengan gas di atas *tubes* dan udara di dalam lebih baik daripada pengaturan vertikal karena untuk kebersihan yang lebih baik dan menurunkan luas permukaan panas.

### II.2.6 *Electrostatic Precipitators (ESP) atau Fabric/Bag Filters*

Gas-gas yang didinginkan pada temperatur 130 hingga 150 °C (265–300 °F) akhirnya dibersihkan melalui filter kantong atau *electrostatic precipitator* (ESP) sebelum dibuang ke atmosfer (Rayaprolu, 2009). Perbedaan utama dibandingkan dengan *pulverized fuel boiler*, yaitu:

- a. Pemuatan debu secara praktis tetap konstan terlepas dari abu dalam bahan bakar, seperti debu, abu disirkulasi ulang beberapa kali hingga muatan debu mencapai konsentrasi yang diperlukan dalam satuan kilogram per meter kubik ( $\text{kg/m}^3$ ).
- b. Ada banyak  $\text{CaO}$  dan  $\text{CaSO}_4$  dimana desulfurisasi dilakukan.
- c. Ukuran partikel sangat baik dalam pita terbatas.

Debu dengan intensitas tinggi pada karbon digunakan untuk pembakaran lambat, bahan bakar *fixed carbon* tinggi dan bahan bakar abu rendah dan perlu untuk mengembalikan debu ke ruang bakar, setidaknya dari dua bidang pertama dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi konsumsi kapur.

Pembuangan abu dalam bentuk basah, kadang-kadang digunakan dalam *pulverized fuel boiler*, dapat dikesampingkan karena mengandung gipsum yang akan membentuk batuan keras. Pembuangan kering ke silo abu adalah metode yang paling dapat diandalkan.

### II.2.7 *Bottom Ash (Abu Dasar)*

Abu dikeluarkan dari bagian bawah ruang bakar untuk mempertahankan persediaan yang diperlukan. Penurunan tekanan unggun (*fluidized*) yang lebih tinggi merupakan indikasi akumulasi partikel yang terlalu besar kebanyakan batu, serpih, dan abu yang diaglomerasi. Biasanya pengeringan abu dasar adalah operasi berkala, karena kuantitas abu unggun umumnya  $< 10\%$  dari total abu. Juga, abu dasarnya praktis tanpa karbon. *Bed ash* berada pada temperatur sangat tinggi 850 °C dan perlu pendinginan sebelumnya pembuangannya. Abu biasanya didinginkan hingga  $\sim 80$  °C, dan dibuang dengan cara kering di truk (Rayaprolu, 2009).



### II.3 Komponen *Economizer*

Permukaan *economizer* memindahkan panas dari gas buang ke *feed water* bertekanan dan didinginkan dalam perjalanan ke *steam drum* (Rayaprolu, 2009). Perpindahan panas dalam *economizer* hampir seluruhnya oleh konveksi dan karenanya kecepatan gas dimaksimalkan konsisten dengan penurunan tekanan dan batasan jarak *tube*. Abu batubara dalam gas buang pada temperatur < 600 °C tidak lagi lengket dan karenanya pengotoran *tube* tidak menjadi masalah seperti di *superheater*. Abu itu longgar dan tidak membentuk endapan yang melekat kuat dan karenanya mudah dihilangkan dengan meniup jelaga (*soot blower*). Namun, jika ada penembakan campuran minyak dan batubara, abu dapat menempel pada deposit minyak yang terbentuk pada *tubes*. Yang perlu menjadi perhatian adalah mengurangi permukaan dan volume untuk mengoptimalkan ruang dan biaya.

Biasanya *tubes* yang lebih kecil dengan 38,1 mm, 44,5 mm dan 50,8 mm (1½, 1¾, dan 2 inch) Diameter luar dipilih untuk meningkatkan laju perpindahan panas. *Tube* 31,8 mm (1¼) digunakan dalam *boiler Supercritical* dan *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) vertikal. *Tubes* berdiameter besar seperti 63,5 mm dan 76,2 mm diadopsi dalam *economizer* vertikal berdasarkan pertimbangan kekuatan.

Kehati-hatian diambil untuk menghindari *pitch* belakang (sepanjang aliran gas) dari 1,07-1,25 kali *outside diameter*, melalui pengembangan lapisan batas, untuk menghindari kehilangan *draft* yang berlebihan dan mengurangi perpindahan panas. Perpindahan panas dapat berkurang sebanyak 30 % dengan jarak ini. Kecepatan massa optimal untuk *economizer tubes* terletak antara 5,4 dan 6,8 kg/m<sup>2</sup>s (4000-5000 lb/ft<sup>2</sup>h).

Kecepatan gas maksimum yang diizinkan dan jarak *tubes* minimum untuk *economizer* diberikan pada Tabel 2.1. Jarak minimum untuk *tube* (*pitch*) adalah 19 mm (¾ inch), Sedangkan untuk *tube* bersirip, jaraknya 13 mm (½ inch) antara ujung sirip.

Air dalam *economizer* harus selalu mengalir ke atas untuk memungkinkan gelembung uap naik dengan lancar. Dalam aliran ke bawah, gelembung uap dapat menyebabkan aliran stagnasi dan mengganggu operasi. Dalam kasus ketika aliran

ke bawah adalah wajib karena tata letak, penurunan tekanan yang memadai dibuat dengan memasukkan *ferrules* untuk pemerataan aliran.

**Tabel 2.1** Kecepatan gas buang saluran masuk yang diizinkan dan penempatan *tube* (tegak lurus terhadap aliran gas) di *Economizer* (Rayaprolu, 2009).

Fuel	Gas	Oil		Coal in Spreader Stokers	Coal in Pulverized Fuel Combustion		Coal in Fluidized Bed Combustion		Bagasse
		Distillate	Residual		Normal/ Low Ash	Abrasive/ High Ash	Bubbling Fluidized Bed Combustion	Circulating Fluidized Bed Combustion	
Maximum gas velocity (m/s)	36	27	18	18	15-18	12-15	12-15	12	15-18
Minimum Clear tube spacing (mm)	19	25	25-32	32	38	50	32-38	38-50	32

Pemilihan *tubes* tidak boleh melebihi 6 m/s (20 ft/s) dari kecepatan air untuk menghindari penurunan tekanan yang berlebihan dan juga erosi *tubes*. Kecepatan air minimum harus dijaga pada ~2 m/s (6 ft/s) untuk pemerataan aliran. Demikian juga, kecepatan aksial dalam *header economizer* harus < 6 m/s (20 ft/s). *Economizer bank* harus dibatasi hingga 1,8 m (6 ft) untuk menghembus jelaga yang efektif. Yang jelas akses 600 mm (2 ft) diperlukan untuk akses dan perbaikan pengelasan.

### II.3.1 Klasifikasi Komponen *Economizer*

*Economizer* dapat diklasifikasikan berdasarkan desain, konstruksi, dan pengaturan, seperti yang diberikan pada Tabel 2.2 (Rayaprolu, 2009).

**Tabel 2.2** Klasifikasi komponen *economizer* (Rayaprolu, 2009).

By Design	By Tube Type	By Arrangement
Counter flow	Cast iron	In-line
Parallel flow	Steel tube	Staggered
Cross flow		
Steaming	Bare tube	Horizontal
Nonsteaming	Finned tube	Vertical
Single tube per loop		
Multiple tubes per loop		

### II. 3.1.1 Aliran Balik, Paralel dan Silang

Dalam kebanyakan kasus, *economizer* diatur dalam mode aliran balik untuk memaksimalkan perpindahan panas dan meminimalkan permukaan. Tidak seperti di *superheater*, tidak ada masalah temperatur logam yang dapat diatasi dengan mengadopsi aliran paralel. Hanya dalam kasus luar biasa dimana ada kendala dalam pengaturan, aliran paralel dapat diadopsi. Dalam paket, aliran lintas silang diadopsi karena pengaturan membantu menghemat ketinggian *economizer*. Aliran silang dengan aliran gas yang tegak lurus terhadap aliran air tidak se-efisien aliran balik tetapi lebih baik dari aliran paralel (Rayaprolu, 2009).

### II. 3.1.2 Steaming dan Nonsteaming

Temperatur outlet air sebaiknya 30 °C lebih rendah dari temperatur saturasi. Perbedaan ini dikenal sebagai temperatur pendekatan yang mencegah penguapan dan tumbukan air. Juga temperatur gas ke air tidak dipersempit, yang meningkatkan *heating surfaces* tanpa menambah temperatur air.

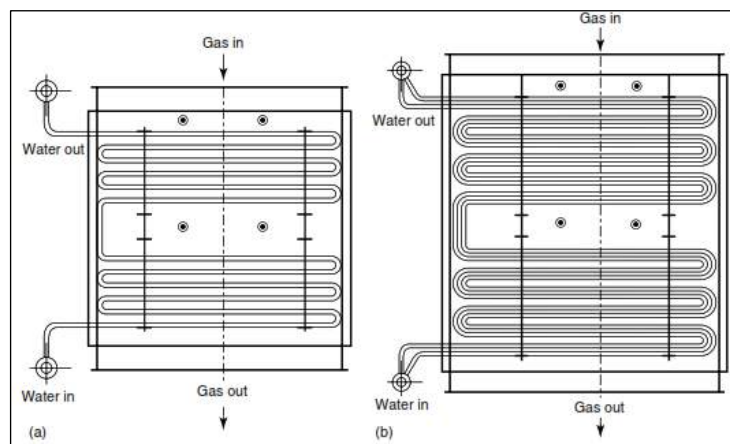
Penguapan *economizer* ketika kenaikan temperatur air > 67 % dari perbedaan di antara keduanya temperatur saturasi dan inlet *economizer*. Kesederhanaan dan keleluasaan operasional menuntut *economizer nonsteaming*.

Terkadang, kondisi ini sebenarnya bermanfaat untuk meningkatkan permukaan *economizer* dan menghasilkan uap di dalamnya. Maka *header outlet economizer* harus berada di bawah level drum. Perawatan harus diambil untuk menghindari loop atau lereng ke bawah baik *economizer tube* dan *tube* air dari *economizer* ke drum sehingga semua uap yang dihasilkan terus-menerus mengarah ke atas ke drum. Tergantung pada pembangkit uap, mungkin diperlukan untuk menyediakan siklon khusus tambahan untuk pemisahan.

Biasanya 8 % pembangkit uap dianggap sebagai batas aman, meskipun ada kasus 20 % uap dihasilkan pada *economizer*. Pengolahan air harus sangat ketat (Rayaprolu, 2009).

### II. 3.1.3 *Tubes Tunggal dan Ganda per-Loop*

Membawa semua air dari *header* dengan satu set *tube* ditempatkan berdampingan adalah pengaturan *tube* tunggal per *loop*. Satu set dua *tube* disebut pengaturan dua *tube* per *loop*. Pembengkokan *tube* tertutup dapat dihindari di sini. Kedua *tube* ditempatkan dengan jarak 19 mm sepanjang aliran gas. Ini menghasilkan pengaturan yang sangat kompak dan mengurangi kecepatan air. Seringkali, ini adalah cara yang lebih mudah untuk mengemas ~ 15 % lebih banyak permukaan dalam ketinggian yang sama dengan bank economizer tanpa beralih ke tikungan *loop* tertutup seperti 1 D atau 0,8 D. Pada Gambar 2.5 (A) dan Gambar 2.5 (B) menunjukkan contoh *tubes* tunggal dan *tubes* ganda per-*loop* (Rayaprolu, 2009).

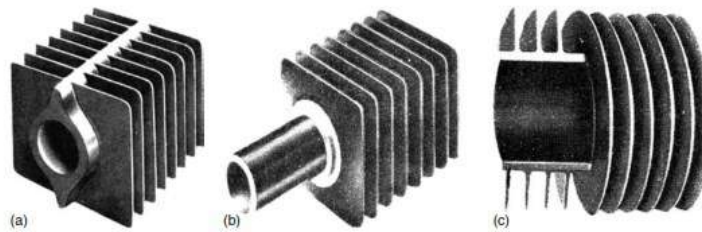


**Gambar 2.5** (A) *Tube* tunggal per loop. (B) Dua *tubes* per loop (Rayaprolu, 2009).

### II. 3.1.4 *Tubes Besi Cor dan Baja*

Besi cor (*cast iron*) memiliki keterbatasan dalam menahan tekanan karena strukturnya yang keropos. Hingga tekanan desain 17,5 atm, *cast iron economizer* bersirip membuat pilihan yang sangat baik asalkan kualitas *casting* tekanan bagus. Penggunaannya dalam boiler modern telah menurun secara drastis, dan *tubes* baja sangat populer karena kekuatan dan ringannya. Pada Gambar 2.6 ditunjukkan beberapa contoh jenis *tubes* bersirip dengan material besi cor. Kriteria sirip yang lebih tinggi, efisiensi transfer panas menjadi lebih rendah. Sirip yang lebih tebal

dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Selanjutnya kriteria *tubes* dengan kepadatan sirip yang lebih tinggi meningkatkan *heating surface* dan pengotoran.



**Gambar 2.6** (A) *Tube* bersirip besi cor. (B) *Tube* baja insang/sirip besi cor. (C) *Tube* bersirip heliks (Rayaprolu, 2009)

### II. 3.1.5. *Tubes* Bersirip (*Finned Tubes*)

*Tube* tanpa sirip dapat diandalkan dan efektif untuk aplikasi di lingkungan berdebu dan menghilangkan ketidakpastian terkait dengan *tube* bersirip (pengotoran dan erosi). Bila dibandingkan dengan *economizer tubes* bersirip, *tube* tanpa sirip memiliki keuntungan, yaitu:

- a. Mendukung lebih mudah.
- b. *Soot blowing* (peniupan) lebih efektif.
- c. Pengaturannya sederhana.
- d. Bank *tube* bisa lebih dalam di  $\sim 2$  m.
- e. Rongga antar bank membutuhkan kedalaman yang lebih kecil karena *soot blowing* tidak memakan banyak ruang.
- f. Temperatur keluar gas bisa lebih rendah.
- g. Penurunan tekanan bisa sedikit lebih rendah.

Ada beberapa jenis permukaan yang diperluas yang cocok untuk *economizer*, yaitu:

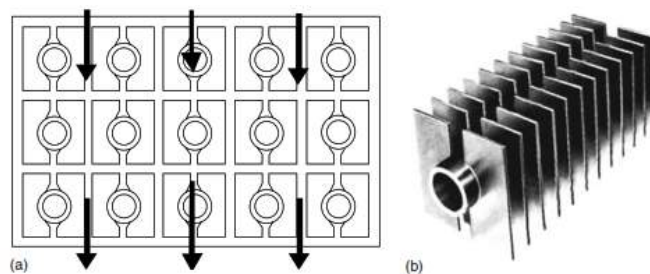
1. Sirip heliks. *Tube* bersirip heliks kontinu frekuensi tinggi (Gambar 11 c) adalah yang paling populer. Untuk aplikasi *economizer*, *tube* dan sirip memiliki eksekusi *carbon steel* (CS) rendah dan medium. *Tube* biasanya berdiameter luar 31,8, 38,1, 44,5 dan 50,8 mm. Pijakan bertingkat atau segitiga hanya cocok untuk gas bersih seperti gas alam. Jarak sirip dan ketebalan meningkat ketika gas menjadi lebih debu. Tabel 2.3 memperlihatkan Spesifikasi sirip heliks untuk

*economizer tubes*. Pendekatan konservatif adalah untuk mengadopsi jarak sirip langkah lebih rendah dari yang ditentukan dalam tabel. Adalah penting bahwa *tube* dijaga agar tidak kotor dengan membatasi kedalaman tebing sampai 1,5 m dan menggunakan hembusan jelaga tipe *rake*.

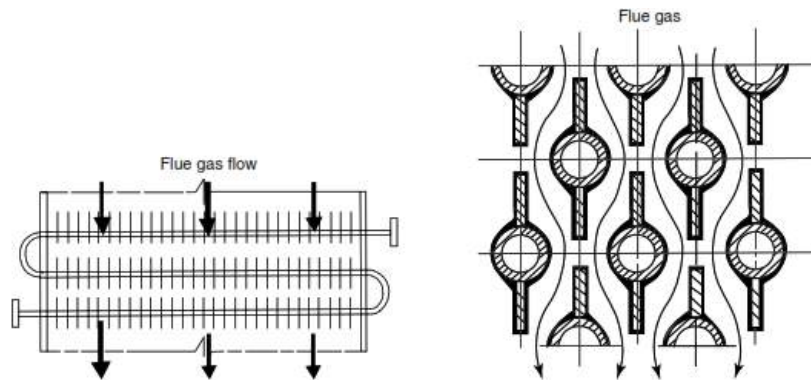
**Tabel 2.3** Spesifikasi sirip heliks untuk *economizer tubes* (Rayaprolu, 2009).

Fuel	Fins per		Thickness (mm)	Staggered	Fin Height (mm-Typical)
	Inch	Meter			
Natural	8	315	0,75-1,5	Yes	19-22
Light distillate oil	4	157	0,75-3,0	No	19-22
Heavy oil	3	117	1,25-3,0	No	19-22
Coal	2	78	1,25-3,0	No	19-22

2. Sirip pelat Gambar 2.7 dengan material *low carbon steel*, dilas resistansi dan berbentuk persegi atau persegi panjang. Sirip biasanya setebal 3 mm dan berjarak 13 dan 25,4 mm (1/2 dan 1 in.). Kecepatan gas dibatasi hingga 15 m/s untuk gas bersih. Sirip ini digunakan dalam lingkungan non-korosif dengan pembakaran gas, minyak, dan batubara bahkan dengan partikulat yang sangat tinggi. Diperlukan hembusan jelaga tipe garu untuk menjaga permukaan tetap bersih. Aplikasi batubara menghadirkan bahaya penyumbatan *fly ash*.
3. Sirip longitudinal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 diaplikasikan untuk *boiler* berbahan bakar batubara merupakan metode yang populer untuk menghemat di permukaan. Pengaturan berurutan biasanya diadopsi meskipun ada laporan tentang celah *tube* sirip yang berekspansi yang beroperasi dalam periode yang lama dengan *boiler* berbahan bakar minyak. Penyumbatan dan erosi mungkin dialami pada *boiler* berbahan bakar batu bara.



**Gambar 2.7** (A) *Tube* bersirip besi cor. (B) *Tube* baja insang/sirip besi cor. (C) *Tube* bersirip heliks (Rayaprolu, 2009).



**Gambar 2.8** Sirip Longitudinal dan arah aliran gas di atas *tubes* bersirip (Rayaprolu, 2009).

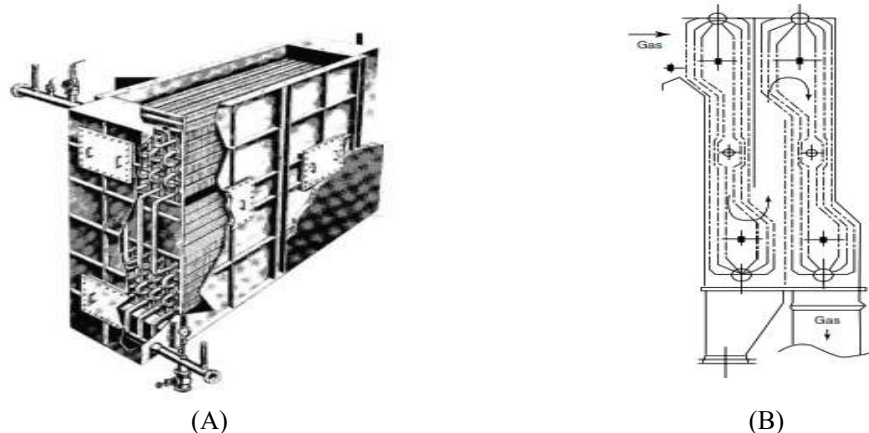
Dengan setiap jenis *tube* bersirip, perawatan penukar kalor harus diambil untuk mengarahkan semua gas hanya di atas *tube* bersirip dan tidak di atas tikungan untuk menghindari gas melewati seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 pembelokan di dalam casing digunakan untuk tujuan ini (Rayaprolu, 2009).

#### II. 3.1.6. *Tube Bertingkat (Staggered Tubes)*

*Staggered tubes* menghasilkan laju perpindahan panas yang lebih baik dan membuat pengaturan menjadi padat tetapi berisiko erosi *tube* karena debu dalam gas buang. Hanya untuk gas alam dan minyak sulingan ringan dan gas limbah bersih tertentu yang cocok untuk pengaturan bertingkat, sedangkan itu tidak berlaku untuk aplikasi batu bara dan minyak berat. Generator uap pemulihan panas selalu menggunakan pengaturan bertingkat, karena gas buang Generator Turbin bersih.

#### II.3.1.7. *Tubes Horizontal dan Vertikal*

Sebagian besar *economizer* cenderung secara horizontal dan sepenuhnya dapat dikeringkan (Gambar 2.9 (A)). *Tube* vertikal digunakan dalam kasus-kasus khusus seperti *boiler recovery Black Liquid* dan *boiler* bahan bakar limbah kota di mana abu lengket mudah siap pada permukaan horizontal. Tingkat perpindahan panas lebih rendah dan karenanya permukaan yang dibutuhkan jauh lebih tinggi (Gambar 2.9 (B)).



**Gambar 2. 9** (A) *Economizer tubes* Horizontal, (B) *Economizer tubes* Vertikal (Rayaprolu, 2009).

#### II.4 Pemilihan Material Komponen *Boiler Tubes*

Inti dari sebuah *boiler*, tidak termasuk peralatan pembakaran, terutama dibangun dengan beberapa bahan temperatur tinggi, yaitu baja dan refraktori, dengan baja struktural yang digunakan untuk bahan pendukung dan lembaran untuk transportasi udara dan gas (Rayaprolu, 2009).

Dengan demikian, bahan yang digunakan dalam konstruksi *boiler* terdiri dari berbagai baja dan refraktori. Bahan *nonferrous* kecil digunakan untuk permukaan luar, kecuali lembaran aluminium. *Boiler* umumnya terbuat dari baja bulat dalam bentuk *tube*, pipa, dan *header*. Bahkan *drum* dan pemanas ulang (*reheater*) adalah dari plat rol, karena diameternya besar. *Drum* hingga diameter luar 1100 mm biasanya terbuat dari pipa *seamless* besar atau plat *roll*.

Berbagai macam bahan baku dan komponen, selain pabrik dan peralatan bantu, diperlukan untuk membangun pabrik *boiler*. Bahan yang digunakan dalam pembuatan *boiler* dapat diklasifikasikan secara luas seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.4. Bergantung pada jenis boiler dan cakupannya, masing-masing dari tiga item pada tabel 2.4 berkontribusi ~30 hingga 40 % dari biaya pabrik *boiler*. Dalam pabrik industri yang khas, pembelian bersama (*bought outs*) sering dimasukkan dalam ruang lingkup boiler, sedangkan dalam boiler yang lebih besar, item 3c tidak termasuk.



**Tabel 2.4** Bagian komponen dari *boiler* secara umum (Rayaprolu, 2009).

S. No	Item	Description	Consisting Mainly
1	Pressure parts (PPs)	Pressure-holding parts, mainly FW, drum water, and steam	Drum, tubes, pipes, headers, tanks, forgings, and castings
2	Nonpressure parts (NPPs)	Fabricated items	Structure, flues and ducts, casing and hopper, tubular air heater (AH), cyclones, BRIL
3a	Bought-outs (BOs)	Equipments procured from others	Valves, mountings and fittings, soot blowers, attemperators, fans, electrostatic precipitator (ESP), rotary AH
3b	Firing equipment		Mills, burners, burner management system (BMS), stoker, feeders, air nozzles for fluidized bed combustion (FBC), hot gas generators
3c	Common BOs	Common for the total plant with one or more boilers	Feed pumps, deaerator, ash handling plant, coal handling plant, oil storage, P & H units, gas conditioning skid

*Note:* BRIL stands for bricks, refractory, insulation, and lagging.

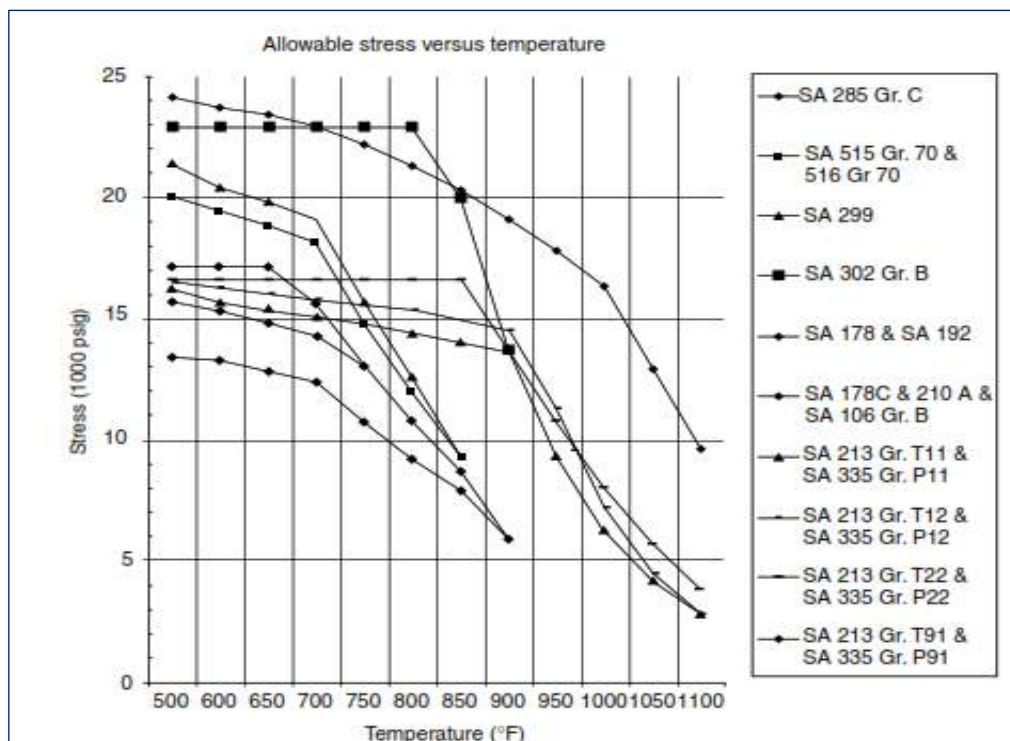
Untuk bagian *furnace*, *boiler bank* (BB) dan *economizer*, penurunan tekanan yang sedikit lebih tinggi pada *Hot Finished Seamless* (HFS) *Tube* tidak membuat perbedaan yang berarti. Bahkan dalam *superheater* dari *boiler* yang lebih kecil, penurunan tekanan yang lebih tinggi tidak ada konsekuensinya. *Tubes* mulus yang ditarik dingin memiliki toleransi yang lebih dekat, dan untuk tugas *superheater* dan *reheater* dalam *boiler* besar, toleransi membuat perbedaan besar. *Cold-Drown Seamless* (CDS) *Tube* diproduksi dari HFS *tube* dengan memanaskannya kembali ke temperatur yang sesuai dan melakukan *re-rolling* hingga selesai. Secara alami, pekerjaan tambahan ini membuat CDS *tube* lebih mahal. Kecuali hal itu menuntut, CDS *tube* tidak digunakan dalam pembuatan *boiler*. Kekerasan CDS *tube* juga lebih tinggi karena pengerasan kerja.

Karbon, paduan, dan kadang-kadang *stainless steel tube* digunakan dalam pembuatan *boiler* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5. *Tube* untuk spesifikasi Amerika terdaftar bersama dengan BS dan DIN setara, yang merupakan spesifikasi populer lainnya yang diterima secara global. Tabel 2.6 sebagai contoh material standar yang digunakan dalam konstruksi *boiler. Tube* dalam ukuran diameter luar 12,7 hingga 127 mm (0,5 - 5 inch), dan hampir semua ukuran mulai diameter luar 31,8 mm digunakan dalam *boiler*.

Batas temperatur, berdasarkan pada oksidasi yang dipercepat, menentukan penerapan dasar suatu material. Setelah itu, kekuatan material pada temperatur operasi menentukan pemilihan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, tegangan yang diizinkan, terutama pada temperatur rendah, tidak banyak bervariasi

(< 250 °C kira-kira); tetapi pada temperatur tinggi, terjadi penurunan yang cukup tajam melebihi 450 °C. Setiap peningkatan kekuatan sifat mekanikal metalurgi akan menimbulkan biaya yang lebih mahal sekitar 20 - 40 %. Sebagai contoh penggunaan material yang lebih mahal, seperti T22 dan T91 digunakan untuk temperatur yang relatif lebih rendah. Desain *boiler* yang baik memiliki fitur berikut:

- Penggunaan maksimum dibuat dari baja rendah karbon (*low carbon steels*) karena kemudahan pembuatan dan perbaikannya.
- Ketebalan dijaga agar tetap minimum dengan menggunakan logam *superior* untuk menurunkan inersia termal.
- Penggunaan *stainless steels* diminimalkan karena biaya, perpanjangan yang jauh lebih tinggi, kerentanan terhadap korosi tegangan, dan kemungkinan masalah yang timbul dari pengelasan logam yang berbeda.



**Gambar 2.10** Tegangan temperatur tinggi yang diizinkan untuk pemilihan bahan bagian tekanan sesuai *ASME Boiler & Pressure Vessel Code 2007* (Rayaprolu, 2009).

**Tabel 2.5** Temperatur *boiler tubes* maksimum yang diizinkan oleh *ASME Code* dan pabrikan *boiler* (Viswanathan, 1989).

Tube steel type	ASME specification No.	ASME °F (°C)	Babcock and Wilcox °F (°C)	Combustion Engineering °F (°C)	Riley Stoker °F (°C)
Carbon steel	SA-178 C	1000 (538)	950 (510)	850 (454)	850 (454)
Carbon steel	SA-192	1000 (538)	950 (510)	850 (454)	850 (454)
Carbon steel	SA-210 A1	1000 (538)	950 (510)	850 (454)	850 (454)
C-Mo	SA-209 T1	1000 (538)	...	900 (482)	900 (482)
C-Mo	SA-209 T1a	1000 (538)	975 (524)	...	...
C-Mo	SA-213 T11	1200 (649)	1050 (566)	1025 (552)	1025 (552)
C-Mo	SA-213 T22	1200 (649)	1115 (602)	1075 (580)	1075 (580)
Stainless	SA-213 321H	1500 (816)	1400 (760)	...	1500 (816)
Stainless	SA-213 347H	1500 (816)	...	1300 (704)	...
Stainless	SA-213 304H	1500 (816)	1400 (760)	1300 (704)	...

Properti mekanis lain yang penting untuk dipertimbangkan adalah kekerasan (*hardness*) bahan, yang merupakan ukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis local (ASME BPVC Committee, 2015b). Untuk material komponen *economizer tubes* seperti yang ditunjukkan dalam tabel 7, tabel 8 dan tabel 9. Untuk persyaratan kekerasan *tubes* dalam standar *ASME BPVC Section II part A* edisi tahun 2015, untuk material (ASME BPVC Committee, 2015a):

1. SA-210, yaitu harus memiliki kekerasan tidak melebihi masing-masing: 79 HRB atau 143 *Hardness Brinell Number* (HBN) untuk *grade A-1*, 89 HRB atau 179 HB untuk *grade C*.
2. *Tubes* SA-192 dengan ukuran ketebalan lebih besar atau sama dengan 0,20 inch (5,1 mm) kekerasannya tidak lebih dari: 137 HBN dan ketebalan dinding kurang dari 0,20 inch (5,1 mm) kekerasannya tidak lebih dari: 77 HRB.

Sementara untuk tegangan maksimum yang diizinkan (*Maximum Allowable Stress*) pada temperatur tertentu untuk masing-masing jenis *economizer tubes* tersebut dapat dilihat dalam *ASME BPVC Section II part D*.

Dalam beberapa sumber menjelaskan melalui pengujian kekerasan memberikan cara yang mudah dan tidak merusak untuk memperkirakan sifat kekuatan material. Uji kekerasan dengan skala kekerasan *Brinell* (HBN) sangat terkenal untuk estimasi ini, karena untuk banyak material hubungan antara kekuatan tarik/*ultimate* (*Tensile Strength*) dan angka kekerasan *Brinell* kira-kira linier.

Tabel 2.6 Material standar yang digunakan dalam konstruksi boiler (Viswanathan, 1989).

Alloy	Product form	ASME or ASTM specification	Grade	Minimum tensile strength, ksi	Minimum yield strength, ksi	Composition(a), %							
						C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
<b>Carbon steels</b>													
Low strength	Tubes	SA-192	...	(47)	(26)	0.06-0.18	0.27-0.63	0.048	0.058	0.25	...	...	...
	Tubes (ERW)	SA-178	A	...	...	0.06-0.18	0.27-0.63	0.050	0.060	...	...	...	...
	Tubes (ERW)	SA-226	...	(47)	(26)	0.06-0.18	0.27-0.68	0.050	0.060	...	...	...	...
Intermediate strength	Tubes	SA-210	A-1	60	37	0.27	0.93	0.048	0.058	0.10 Min	...	...	...
	Tubes (ERW)	SA-178	C	60	37	0.35	0.30	0.050	0.060	...	...	...	...
	Pipe	SA-106	B	60	35	0.30	0.29-1.06	0.048	0.058	0.10 Min	...	...	...
	Castings(b) Structural shapes	SA-216 A36	WCA ...	60 58	30 36	0.25 0.26	0.70 ...	0.040 0.040	0.045 0.05	0.60 ...	...	...	...
High strength	Pipe	SA-106	C	70	40	0.35	0.29-1.06	0.048	0.058	0.10 Min	...	...	...
	Plate	SA-299	...	75	40	0.30	0.86-1.55	0.035	0.040	0.13-0.33	...	...	...
	Plate	SA-515	70	70	38	0.35	0.90	0.035	0.04	0.13-0.33	...	...	...
	Forgings	SA-105	...	70	36	0.35	0.60-1.05	0.040	0.050	0.35	...	...	...
	Castings(b)	SA-216	WCB	70	36	0.30	1.00	0.040	0.045	0.60	...	...	...
<b>Ferritic alloys</b>													
C-0.5Mo	Tubes	SA-209	T1	55	30	0.10-0.20	0.30-0.80	0.045	0.045	0.10-0.50	...	...	0.44-0.65
1Cr-½Mo	Forgings	SA-336	F12	70	40	0.10-0.20	0.30-0.80	0.040	0.040	0.10-0.60	...	0.80-1.10	0.45-0.65
	Tubes	SA-213	T12	60	30	0.15	0.30-0.61	0.045	0.045	0.50	...	0.80-1.25	0.44-0.65
	Pipe	SA-335	P12	60	30	0.15	0.30-0.61	0.045	0.045	0.50	...	0.80-1.25	0.44-0.65
	Plate	SA-387	12Cl2	65	40	0.17	0.36-0.69	0.035	0.040	0.13-0.32	...	0.74-1.21	0.40-0.65
	Forgings	SA-182	F12	70	40	0.10-0.20	0.30-0.80	0.040	0.040	0.10-0.60	...	0.80-1.25	0.44-0.65
1.25Cr-0.5Mo	Tubes	SA-213	T11	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50-1.00	...	1.00-1.50	0.44-0.65
	Pipe	SA-335	P11	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50-1.00	...	1.00-1.50	0.44-0.65
	Plate	SA-387	11Cl2	75	45	0.17	0.36-0.69	0.035	0.040	0.44-0.86	...	0.94-1.56	0.40-0.70
	Forgings	SA-182	F11	70	40	0.10-0.20	0.30-0.80	0.040	0.040	0.50-1.00	...	1.00-1.50	0.44-0.65
	Castings(b)	SA-217	WC6	70	40	0.20	0.50-0.80	0.040	0.045	0.60	...	1.00-1.50	0.45-0.65

**Tabel 2.6** Material standar yang digunakan dalam konstruksi *boiler* - Lanjutan (Viswanathan, 1989).

2.25Cr-1Mo	Tubes	SA-213	T22	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50	...	1.90-2.60	0.87-1.13
	Pipe	SA-335	P22	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50	...	1.90-2.60	0.87-1.13
	Plate	SA-387	22C11	60(c)	30(c)	0.17	0.27-0.63	0.035	0.035	0.50	...	1.88-2.62	0.85-1.15
		SA-387	Cl2	75(d)	45(d)								
	Forgings	SA-182	F22	75	45	0.15	0.30-0.60	0.040	0.040	0.50	...	2.00-2.50	0.87-1.13
	Castings(b)	SA-217	WC9	70	40	0.18	0.40-0.70	0.040	0.045	0.60	...	2.00-2.75	0.90-1.20
5Cr-0.5Mo	Tubes	SA-213	T5	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50	...	4.00-6.00	0.45-0.65
9Cr-1Mo	Tubes	SA-213	T9	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.25-1.00	...	8.00-10.00	0.90-1.10
<b>Austenitic stainless alloys</b>													
18Cr-8Ni	Tubes	SA-213	TP304H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	8.00-11.00	18.00-20.00	...
	Pipe	SA-376	TP304H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	8.00-11.00	18.00-20.00	...
	Plate	SA-240	304	75	30	0.08	2.00	0.045	0.035	1.00	8.00-10.50	18.00-20.00	...
		SA-240	304H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	8.00-12.00	18.00-20.00	...
	Forgings	SA-182	F304H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	1.00	8.00-11.00	18.00-20.00	...
18Cr-10Ni-Ti	Tubes(e)	SA-213	TP321H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	9.00-13.00	17.00-20.00	...
18Cr-10Ni-Cb	Tubes(f)	SA-213	TP347H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	9.00-13.00	17.00-20.00	...
16Cr-12Ni-2Mo	Tubes	SA-213	TP316H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	11.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00
	Pipe	SA-376	TP316H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	11.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00
	Forgings	SA-182	F316H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	1.00	10.00-14.00	16.00-18.00	
	Plate	SA-240	316H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	10.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00
	Structural sheet	A167	316L	70	25	0.03	2.00	0.045	0.03	1.00	10.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00
25Cr-12Ni	Castings	SA-351	CH20	70	30	0.20	1.50	0.040	0.040	2.00	12.00-15.00	22.00-26.00	
(a) Single values shown are maximums. (b) Residual elements not to exceed 1.00%. (c) Annealed. (d) Normalized. (e) Titanium content not less than four times carbon content and not more than 0.60%. (f) Cb + Ta not less than eight times carbon content and not more than 1.00%.													

Kekuatan tarik ( $T_S$ ) dan kekerasan adalah indikator ketahanan logam terhadap deformasi plastis. Konstanta dari proporsionalitas bervariasi antara kelas material, dan juga tergantung pada beban yang digunakan untuk menentukan kekerasan. Ada sebaran luas dalam data, tetapi untuk metode pendekatan untuk baja, hubungan tersebut secara umum dapat diterima.

Akibatnya, mereka kira-kira proporsional, hubungan nilai skala kekerasan *Brinell* (HBN) terhadap kekuatan tarik (MPa) untuk besi cor, baja, dan kuningan. Hubungan proporsionalitas yang sama tidak berlaku untuk semua logam, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.11. Secara umum, untuk sebagian besar baja, hubungan nilai skala kekerasan HBN dan kekuatan tarik dapat dituliskan dalam persamaan (JR, William D. Callister, 2015):

$$T_S = 3,45 H_{BN} \quad (2.1)$$

Selanjutnya beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan hubungan pendekatan nilai skala kekerasan *Vickers* ( $H_{VN}$ ) baja terhadap kekuatan Tarik ( $T_S$ ) dan kekuatan luluh ( $Y_S$ ) ditunjukkan dalam persamaan (Fujita & Kuki, 2016):

$$T_S = 2,5 \cdot H_{VN} + 100 \quad (2.2)$$

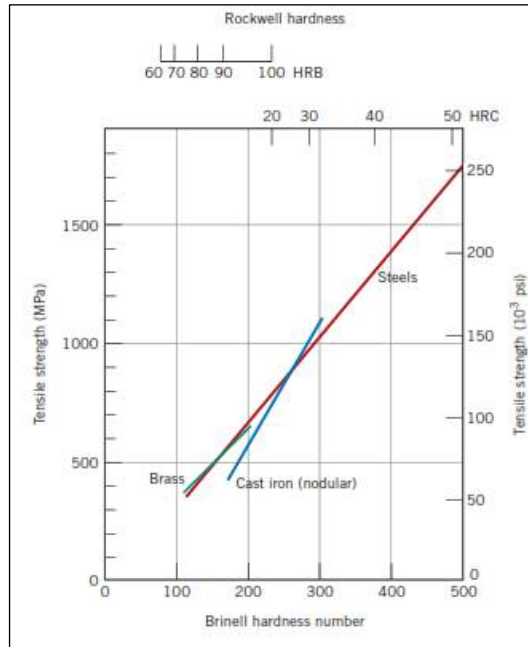
$$Y_S = 2,736 \cdot H_{VN} - 70,5 \quad (2.3)$$

Dimana berturut-turut,  $T_S$ ,  $Y_S$  dan  $H_V$  merupakan nilai pendekatan kekuatan tarik pada temperatur ruang (MPa), nilai pendekatan kekuatan luluh pada temperatur ruang (MPa) dan nilai skala kekerasan *Vickers* (HVN).

Sementara hubungan antara beberapa skala kekerasan ditunjukkan dalam pendekatan,  $H_V$  dan  $HRB$  berturut-turut merupakan skala *Hardness Vickers* dan skala *Hardness Rockwell* tipe B (Geels et al., 2007):

$$H_B \approx 0,95 H_{VN} \quad (2.4)$$

$$HRB \approx 176 - \left( \frac{1165}{\sqrt{H_{BN}}} \right) \quad (2.5)$$



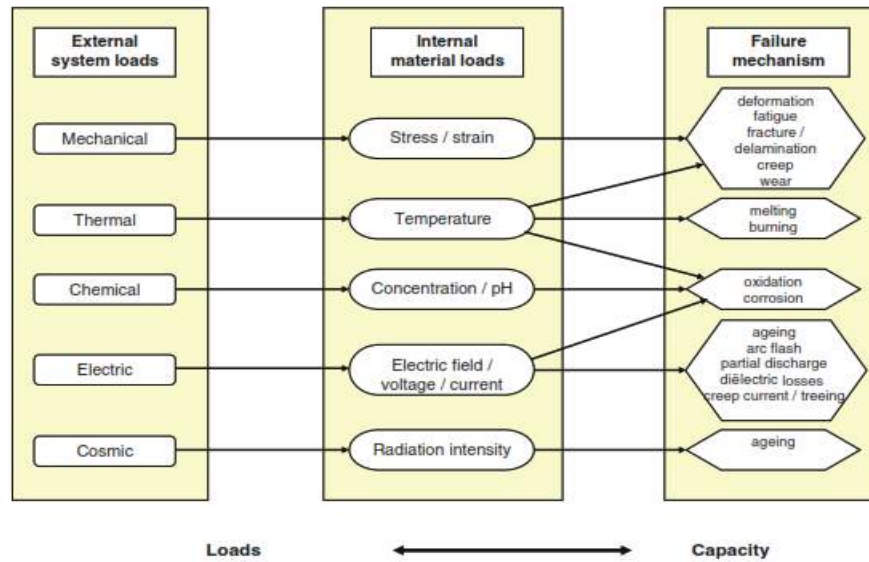
**Gambar 2.11** Hubungan nilai kekerasan *Brinell* (*hardness*) dan kekuatan tarik (*tensile strength*) untuk baja, *brass* dan besi cor (JR, William D. Callister, 2015).

## II.5 Beban Yang Bekerja Pada Komponen *Boiler Tubes*

Pada bab sebelumnya telah diuraikan beban yang bekerja secara umum untuk komponen *boiler* (Tinga, 2013). Secara khusus, beban yang terjadi pada *boiler tube* antara lain:

- Beban mekanik, yang disebabkan oleh adanya tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*).
- Beban termal, yang disebabkan adanya induksi temperatur atau beda temperatur yang bekerja.
- Beban kimia yang disebabkan oleh pengaruh faktor unsur kimia, derajat keasaman/PH dan pengaruh unsur kimia lainnya (lingkungan).

Dari beberapa beban tersebut di atas, pada akhirnya dapat menyebabkan penurunan kualitas bahkan sampai pada kegagalan, seperti: deformasi, *creep*, *fatigue*, *fracture*, *wear*, oksidasi, korosi dan lain sebagainya. Berikut pemetaan umum beban-beban yang bekerja ditunjukkan dalam Gambar 2.12.



**Gambar 2.12** Gambaran umum jenis beban primer dan mekanisme kegagalan yang terkait (Tinga, 2013).

### II.5.1 Perilaku Mekanik Dalam Hubungan Tegangan-Regangan

Dalam mendesain suatu produk dibutuhkan pengetahuan tentang karakterisasi dari suatu material. Untuk itu dibutuhkan penelitian terhadap hal tersebut. Perubahan atau deformasi yang terjadi pada material dapat diketahui dengan bantuan analisa dan percobaan laboratorium yang dilakukan. Agar deformasi atau kegagalan yang berlebihan tidak terjadi, penting untuk mengetahui efek beban yang terjadi. Perilaku mekanis suatu material mencerminkan hubungan antara responsnya atau deformasi ke beban atau gaya yang diterapkan. Sifat mekanik yang penting adalah kekuatan, kekerasan, kekakuan, dan keuletan (Campbell, 2012). Jika pada percobaan bekerja gaya aksial ( $F$ ) yang dipengaruhi oleh luas penampang awal ( $A_i$ ) untuk mendapatkan tegangan teknik ( $\sigma_e$ ) pada spesimen dapat ditunjukkan pada persamaan:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_i} \quad (2.6)$$

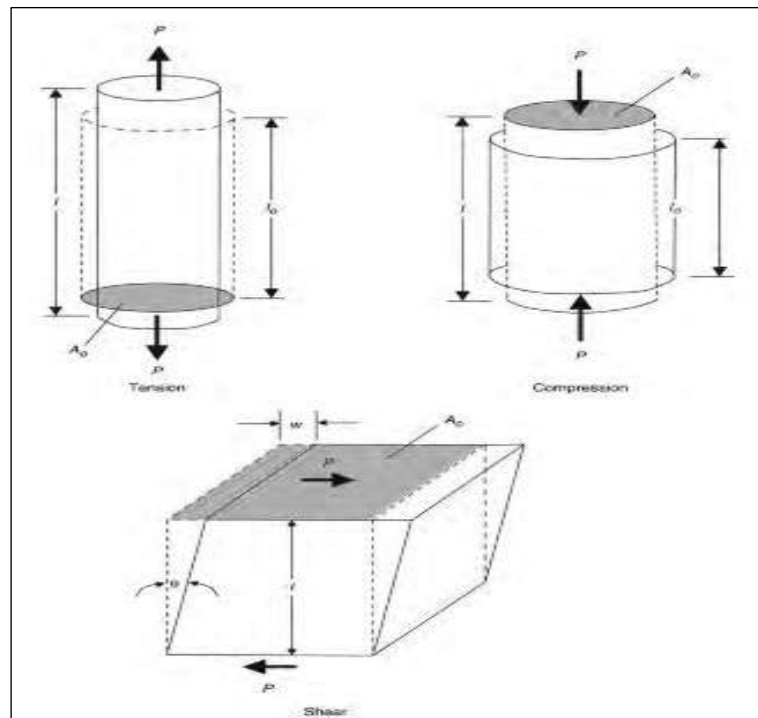
Untuk tegangan tarik maksimum ( $\sigma_u$ ) dengan mensubstitusi gaya aksial maksimum ( $F_{max}$ ) dibagi luas penampang awal ( $A_i$ ). Sementara untuk regangan



teknik ( $\epsilon_e$ ) diperoleh dengan membagi perubahan panjang ( $\Delta l$ ) spesimen dengan panjang spesimen awal ( $l_0$ ), maka:

$$\epsilon_e = \frac{l_f - l_i}{l_i} = \frac{\Delta l}{l_i} \quad (2.7)$$

Ukuran keuletan yang diperoleh dari uji tegangan adalah regangan teknik pada kondisi patah ( $\epsilon_f$ ) dan pengurangan luas pada fraktur ( $A_f$ ). Keduanya dinyatakan sebagai persentase (%). Kedua sifat ini diperoleh setelah fraktur dengan menempatkan spesimen kembali bersama-sama dan melakukan pengukuran panjang akhir ( $l_f$ ), luas penampang spesimen akhir pada fraktur ( $A_f$ ) dan/atau diameter penampang spesimen akhir pada fraktur. Beberapa gambar yang ditampilkan di bawah ini. Sebagai ilustrasi tegangan yang bekerja ditunjukkan dalam Gambar 2.13. Ilustrasi kurva tegangan-regangan teknik dari logam ulet menunjukkan perilaku *necking* ditunjukkan dalam Gambar 2.14. Dan Ilustrasi perilaku elastis dan plastik selama beban Tarik ditunjukkan dalam Gambar 2.15.



**Gambar 2.13** Ilustrasi tegangan yang bekerja (Campbell, 2012).

Persentase perpanjangan (*elongation*) ( $\epsilon_f$ ) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\varepsilon_f = \frac{l_f - l_i}{l_i} \times 100 \quad (2.8)$$

Sementara untuk persentase pengurangan luas (% RA):

$$\% RA = \frac{A_i - A_f}{A_i} \times 100 \quad (2.9)$$

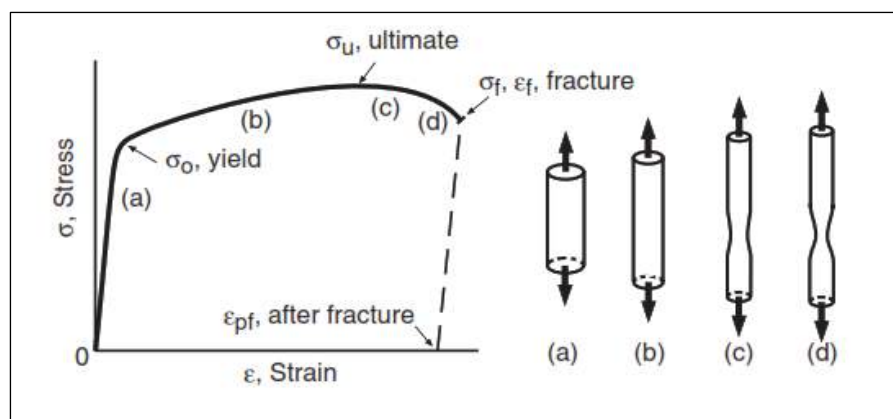
Atau,

$$\% RA = \frac{d_i^2 - d_f^2}{d_i^2} \times 100 \quad (2.10)$$

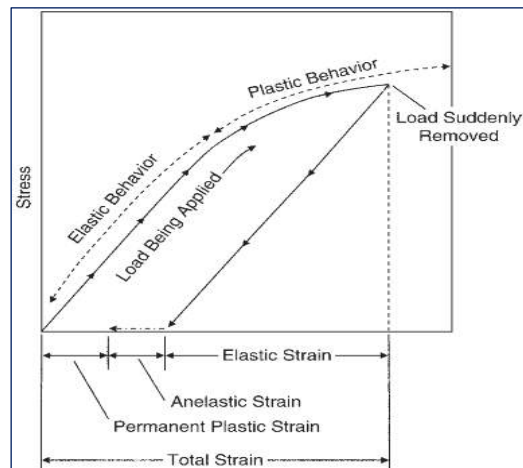
Peningkatan yang terlihat dalam kurva tegangan-regangan setelah titik luluh disebut penguatan regangan (*strain hardening*) ( $S_H$ ), pada kondisi ini material meningkatkan ketahanannya seiring dengan meningkatnya regangan. Nilai dari ukuran tersebut merupakan rasio tegangan tarik maksimum ( $T_S$ ) dengan tegangan luluh ( $Y_S$ ), sehingga dapat dituliskan dalam persamaan:

$$S_H = \frac{T_S}{Y_S} \quad (2.11)$$

Untuk nilai rasio di atas sekitar 1,4 dianggap relatif tinggi untuk logam, dan untuk di bawah 1,2 relatif rendah.



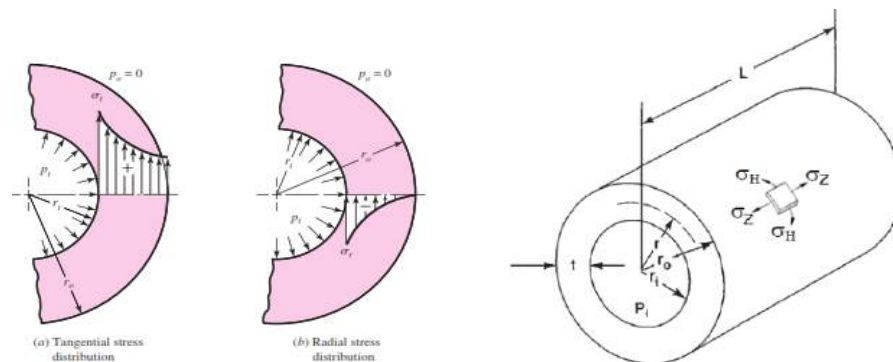
**Gambar 2.14** Ilustrasi kurva tegangan-regangan teknik dari logam ulet menunjukkan perilaku *necking* (Dowling, 2012).



**Gambar 2.15** Ilustrasi perilaku elastis dan plastis selama beban tarik (Campbell, 2012).

### II.5.2 Tegangan Elastis dan Regangan Elastis Pada Silinder/*Tube*

Pada komponen silinder/*tube* menerima beban akibat tekanan internal sebagai awal distribusi tegangan elastis yang terjadi, ditunjukkan pada Gambar 2.16. Pada kondisi ini akan timbul tegangan normal triaksial yang dipengaruhi oleh tekanan internal ( $P$ ), radius dalam ( $r_i$ ), radius luar ( $r_o$ ) dan radius pada lokasi tertentu ( $r$ ), yaitu tegangan tangensial/*circumferential/hoop stress* ( $\sigma_{He}$ ), tegangan aksial/longitudinal ( $\sigma_{Ze}$ ) dan tegangan radial ( $\sigma_{Re}$ ). Dan dalam persamaan lainnya tegangan elastis juga dapat diperoleh dengan menggunakan diameter rata-rata ( $D_m$ ) dan ketebalan dinding pipa/*tube* ( $t$ ) (Viswanathan, 1989).



**Gambar 2.16** Tegangan yang bekerja pada silinder/*tube* akibat pengaruh tekanan internal (Budynas & Nisbett, 2011).

### 1) Tegangan elastis pada Silinder/*tube*

- a. Tegangan tangensial atau tegangan keliling/*circumferential* (*hoop stress* ( $\sigma_{He}$ )), merupakan tegangan yang bekerja searah dengan garis singgung penampang silinder/*tube*. Pada kondisi ini tegangan terjadi akibat tekanan internal yang bekerja secara tangensial yang dipengaruhi oleh ketebalan dinding silinder/*tube*. Ditunjukkan dengan persamaan:

$$\sigma_{He} = \frac{Pr_i^2(r_o^2+r^2)}{r^2(r_o^2-r_i^2)} \quad (2.12)$$

Atau,

$$\sigma_{He} = \frac{PD_m}{2t} \quad (2.13)$$

- b. Tegangan aksial atau tegangan longitudinal ( $\sigma_{Ze}$ ) merupakan tegangan yang bekerja searah dengan arah panjang silinder/*tube*. Ditunjukkan dengan persamaan:

$$\sigma_{Ze} = \frac{Pr_i^2}{r_o^2-r_i^2} \quad (2.14)$$

Atau,

$$\sigma_{Ze} = \frac{PD_m}{4t} \quad (2.15)$$

- c. Tegangan radial ( $\sigma_{Re}$ ) merupakan tegangan yang bekerja searah dengan jari-jari penampang silinder. Ditunjukkan dalam persamaan:

$$\sigma_{Re} = \frac{-Pr_i^2(r_o^2-r^2)}{r^2(r_o^2-r_i^2)} \quad (2.16)$$

Atau,

$$\sigma_{Re} = -P \quad (2.17)$$

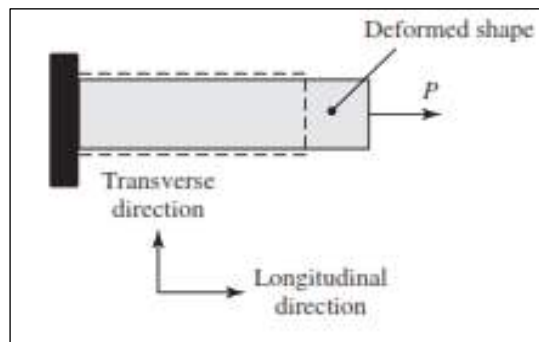
Pada silinder yang berdinding tebal dimana rasio antara radius rata-rata atau radius pada lokasi tertentu terhadap ketebalan dinding bernilai kurang dari 10 ( $r/t < 10$ ), maka tegangan radial tetap diperhitungkan. Sementara untuk silinder berdinding tipis ( $r/t \geq 10$ ), tegangan radial dapat diabaikan (Moss & Basic, 2013).

## 2) Regangan Elastis Pada Silinder/Tube

Regangan elastis pada silinder yang terjadi pada kondisi linier isotropik dan homogen berdasarkan hukum Hooke (McEvily, 2013). Untuk ilustrasi ditunjukkan dalam Gambar 2.17, dimana dipengaruhi oleh Modulus Elastisitas ( $E$ ) dan rasio *poisson* ( $\nu$ ) (Dowling, 2012) :

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.18)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} \quad (2.19)$$



**Gambar 2.17** Ilustrasi rasio *poisson*'s (Dowling, 2012).

Sehingga Regangan elastis ( $\varepsilon_e$ ) yang terjadi pada silinder/*tube* berturut-turut regangan tangensial ( $\varepsilon_{He}$ ), regangan aksial/longitudinal ( $\varepsilon_{Ze}$ ) dan regangan radial ( $\varepsilon_{Re}$ ):

$$\varepsilon_{He} = \frac{1}{E} [\sigma_{He} - \nu(\sigma_{Re} + \sigma_{Ze})] \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_{Ze} = \frac{1}{E} [\sigma_{Ze} - \nu(\sigma_{Re} + \sigma_{He})] \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{Re} = \frac{1}{E} [\sigma_{Re} - \nu(\sigma_{He} + \sigma_{Ze})] \quad (2.22)$$

### II.5.3 Tegangan Plastis dan Regangan Plastis Pada Silinder/*Tube*

Untuk tegangan plastis yang bekerja pada silinder/*tube* yang dipengaruhi oleh tekanan internal ( $P$ ) dalam arah tangensial ( $\sigma_{Hp}$ ), arah aksial/longitudinal ( $\sigma_{Zp}$ ) dan arah radial ( $\sigma_{Rp}$ ) dapat dituliskan dalam persamaan dibawah ini (ASM International Committee, 2000) :

a. Tegangan tangensial plastis ( $\sigma_{Hp}$ ):

$$\sigma_{Hp} = P \left[ \frac{1 + \ln\left(\frac{r}{r_o}\right)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \right] \quad (2.23)$$

b. Tegangan aksial plastis ( $\sigma_{Zp}$ ):

$$\sigma_{Zp} = P \left[ \frac{1 + 2 \ln\left(\frac{r}{r_o}\right)}{2 \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \right] \quad (2.24)$$

c. Tegangan radial plastis ( $\sigma_{Rp}$ ):

$$\sigma_{Rp} = P \left[ \frac{\ln\left(\frac{r}{r_o}\right)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \right] \quad (2.25)$$

Sehingga Regangan plastis ( $\varepsilon_p$ ) yang terjadi pada silinder/*tube* dalam arah tangensial ( $\varepsilon_{Hp}$ ), arah aksial/longitudinal ( $\varepsilon_{Zp}$ ) dan regangan ( $\varepsilon_{Rp}$ ) dapat ditunjukkan dalam persamaan:

$$\varepsilon_{Hp} = \frac{1}{E} [\sigma_{Hp} - \nu(\sigma_{Rp} + \sigma_{Zp})] \quad (2.26)$$

$$\varepsilon_{Zp} = \frac{1}{E} [\sigma_{Zp} - \nu(\sigma_{Rp} + \sigma_{Hp})] \quad (2.27)$$

$$\varepsilon_{Rp} = \frac{1}{E} [\sigma_{Rp} - \nu(\sigma_{Hp} + \sigma_{Zp})] \quad (2.28)$$

Sementara untuk nilai rasio *poisson's* dan densitas material *Ferrous* dan *Nonferrous* ditunjukkan dalam Tabel 2.7. Dan nilai Modulus Elastisitas material *Ferrous* ditunjukkan dalam Tabel 2.8. (ASME BPVC Committee, 2015b).

**Tabel 2.7** Nilai rasio *poisson* dan densitas material *Ferrous dan Nonferrous* (ASME BPVC Committee, 2015b).

Material	Poisson's Ratio	Density, kg/m <sup>3</sup>	Material	Poisson's Ratio	Density, kg/m <sup>3</sup>
<b>Ferrous Materials</b>			<b>Nonferrous Materials</b>		
Carbon steels	0.30	7750	Cast high alloy steels	0.30	7830
Cast irons	0.29	7200	<b>Aluminum Base</b>		
<b>Low alloy steels</b>			Alclad 3003	0.33	2730
C-Mn steels	0.30	7750	Alclad 3004	0.33	2720
1/2Cr to 1 1/4Cr steels	0.30	7750	Alclad 6061	0.33	2700
1 1/4Cr to 3Cr steels	0.30	7750	A02040	0.33	2800
5Cr to 9Cr steels	0.30	7750	A03560	0.33	2680
Mn, Mn-Mo, and Si steels	0.30	7750	A24430	0.33	2700
Ni steels	0.30	7750	A91060	0.33	2705
PH stainless: S15500, S17400, S17700	0.31	7750	A91100	0.33	2710
High alloy steels (200 series)	0.31	7810	A92014	0.33	2800
High alloy steels (300 series)	0.31	8030	A92024	0.33	2780
High-Si stainless: S30600, S30601, S32615, and S38815	0.31	7600	A93003	0.33	2730
5-7% Mo stainless: S32050, S31254, S31266, S31277, and S32654	0.31	8100	A93004	0.33	2720
S32202	0.31	7770	A95052	0.33	2680
High alloy steels (400 series)	0.31	7750	A95083	0.33	2660
High alloy steels (duplex/austenitic-ferritic)	0.31	7800	A95086	0.33	2660
PH stainless: S66286	0.31	7920	A95154	0.33	2660
			A95254	0.33	2660
			A95454	0.33	2690
			A95456	0.33	2660
			A95652	0.33	2670

**Tabel 2.8** Nilai Modulus Elastisitas material *Ferrous* (ASME BPVC Committee, 2015b).

Materials	Modulus of Elasticity E = Value Given × 10 <sup>3</sup> MPa, for Temperature, °C of																
	-200	-125	-75	25	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Carbon steels with C ≤ 0.30%	216	212	209	202	198	195	192	189	185	179	171	162	151	137	..	..	..
Carbon steels with C > 0.30%	215	211	207	201	197	194	191	188	183	178	170	161	149	136	121	..	..
Ductile cast iron	..	..	169	161	155	151	147	142	138	134	..	..	..	..	..	..	..
Material Group A [Note (1)]	214	210	207	200	196	193	190	187	183	177	170	160	149	135	121	..	..
Material Group B [Note (2)]	204	200	197	191	187	184	181	178	174	171	167	163	158	153	147	141	133
Material Group C [Note (3)]	218	213	210	204	200	197	193	190	186	183	179	174	169	164	157	150	142
Material Group D [Note (4)]	225	220	217	210	206	202	199	196	192	188	184	180	175	169	162	155	146
Material Group E [Note (5)]	228	223	220	213	208	205	201	198	195	191	187	183	179	174	168	161	153
Material Group F [Note (6)]	215	212	208	201	195	192	189	186	182	178	173	166	157	145	131	..	..
Material Group G [Note (7)]	209	204	201	195	189	186	183	179	176	172	169	165	160	156	151	146	140
Material Group H [Note (8)]	..	..	209	200	194	190	186	183	180	177	174	172	..	..	..	..	..
Material Group I [Note (9)]	192	187	184	178	173	170	167	163	160	157	154	151	148	145	142	139	135
Material Group J [Note (10)]	214	209	205	197	191	187	184	180	176	172	168	164	161	157	..	..	..
S13800 [Note (11)]	217	213	209	202	197	194	190	186	183	179	175	171	..	..	..	..	..
S15500 [Note (12)]	210	206	203	196	191	188	184	181	177	173	169	166	..	..	..	..	..
S45000 [Note (13)]	218	213	210	203	198	194	191	187	183	179	175	171	..	..	..	..	..
S17400 [Note (14)]	210	206	203	196	191	188	184	181	177	173	169	166	..	..	..	..	..
S17700 [Note (15)]	218	213	210	203	198	194	191	187	183	179	175	171	..	..	..	..	..
S66286 [Note (16)]	214	211	208	201	196	192	189	185	181	178	174	169	..	..	..	..	..

NOTES:  
(1) Material Group A consists of the following carbon-molybdenum and manganese steels:  
C-1/2Mo Mn-1/2Mo-1/2Ni  
C-1/2Mo Mn-1/2Mo-1/2Ni  
Mn-1/2Mo Mn-1/2Ni-V  
Mn-1/2Mo Mn-V

(2) Material Group B consists of the following Ni steels:  
1/4Cr-1/2Ni-Cu 1/4Ni-1/2Mo-Cr-V  
1/2Cr-1/2Ni-Cu-Al 1/2Ni-1Mo-1/2Cr  
1/2Ni-1/2Cr-1/2Mo-V 1Ni-1/2Cr-1/2Mo  
1/2Ni-1/2Mo-V 1 1/4Ni-1Cr-1/2Mo  
1/4Ni-1/2Cr-1/2Mo-V 1 1/4Ni-1/2Cr-1/2Mo  
1/4Ni-1/2Cu-Mo 2Ni-1 1/2Cr-1/2Mo-V  
1/4Ni-1/2Mo-1/2Cr-V 2Ni-1Cu

## II.5.4 Tegangan Termal (*Thermal Stress*) Pada Silinder/*Tube*

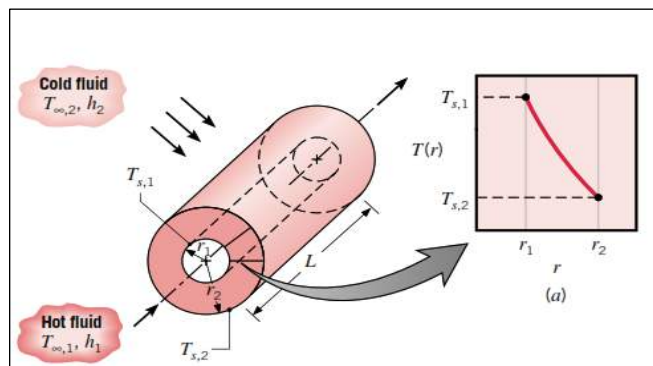
Tegangan termal (*thermal stress*) merupakan tegangan yang dihasilkan akibat induksi temperatur. Secara umum persamaan tegangan termal ( $\sigma_T$ ) (J.B. Kitto & Stultz, 2005):

$$\sigma_T = \pm E\alpha\Delta T \quad (2.29)$$

Dimana berturut-turut,  $E$ ,  $\alpha$  dan  $\Delta T$  adalah modulus elastisitas, koefisien ekspansi termal dan beda temperatur.

Untuk distribusi temperatur ( $T(r)=\Delta T$ ) yang terjadi pada silinder/*tube* yang dipengaruhi oleh temperatur luar silinder ( $T_o$ ) dan temperatur dalam ( $T_i$ ) maka, dapat di tunjukkan pada persamaan (Moran et al., 2003):

$$T(r) = \frac{T_o - T_i}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \times \ln \frac{r}{r_i} + T_i \quad (2.30)$$



**Gambar 2.18** Silinder berongga dengan kondisi permukaan konveksi (Moran et al., 2003).

Pada silinder/*tube* bekerja tegangan yang dipengaruhi oleh induksi temperatur ( $T$ ). Sifat tegangan termal adalah penting karena tegangan ini dapat menyebabkan fraktur atau deformasi plastis yang tidak diinginkan. Pada silinder bekerja beban akibat adanya perbedaan temperatur yang terdistribusi ( $T(r)=\Delta T$ ), modulus elastisitas ( $E$ ), rasio poisson ( $\nu$ ) dan koefisien ekspansi termal ( $\alpha$ ) dalam arah tangensial, aksial/longitudinal dan radial, maka tegangan termal yang terjadi ditunjukkan pada persamaan (Seshadri, 1988):



a. Tegangan termal arah tangensial ( $\sigma_{Ht}$ )

$$\sigma_{Ht} = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \times \left[ \ln\left(\frac{r_o}{r}\right) + \frac{\left(\frac{r_o}{r}\right)^2 + 1}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \times \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) - 1 \right] \quad (2.31)$$

b. Tegangan termal arah aksial/longitudinal ( $\sigma_{Zt}$ )

$$\sigma_{Zt} = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \times \left[ 2 \ln\left(\frac{r_o}{r}\right) + \frac{2 \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} - 1 \right] \quad (2.32)$$

c. Tegangan termal arah radial ( $\sigma_{Rt}$ )

$$\sigma_{Rt} = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \times \left[ \ln\left(\frac{r_o}{r}\right) + \frac{1 - \left(\frac{r_o}{r}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \times \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \right] \quad (2.33)$$

### II.5.5 Regangan Termal Pada Silinder/Tube

Regangan yang terjadi akibat beban termal dalam arah tangensial ( $\varepsilon_{Ht}$ ), aksial/longitudinal ( $\varepsilon_{Zt}$ ) dan arah radial ( $\varepsilon_{Rt}$ ) dalam (Timoshenko & Goodier, 1951):

$$\varepsilon_{Ht} = \frac{1}{E} [\sigma_{Ht} - \nu(\sigma_{Rt} + \sigma_{Zt})] + \alpha\Delta T \quad (2.34)$$

$$\varepsilon_{Zt} = \frac{1}{E} [\sigma_{Zt} - \nu(\sigma_{Rt} + \sigma_{Ht})] + \alpha\Delta T \quad (2.35)$$

$$\varepsilon_{Rt} = \frac{1}{E} [\sigma_{Rt} - \nu(\sigma_{Ht} + \sigma_{Zt})] + \alpha\Delta T \quad (2.36)$$

Dimana  $\varepsilon_{HT}$  merupakan regangan tangensial/*hoop strain*.  $\varepsilon_{ZT}$  merupakan regangan aksial dan  $\varepsilon_{RT}$  merupakan regangan radial. Sementara untuk nilai Koefisien termal ekspansi untuk *Ferrous* Tabel 2.9 (ASME BPVC Committee, 2015b).

### II.5.6 Tegangan dan Regangan Equivalen Pada Silinder/Tube

Tegangan yang bekerja pada silinder/*tube* berupa tegangan triaksial (tanpa tegangan geser) (ASM International Committee, 2000). Untuk memprediksi tegangan yang bekerja tersebut digunakan kriteria energi distorsi atau persamaan

kriteria *Von-Mises* (Tegangan Equivalen ( $\sigma_{Eq}$ ) dan Regangan Equivalen ( $\varepsilon_{Eq}$ )) dengan akurasi lebih baik dan bahwa *yield* akan terjadi ketika energi distorsi dari keadaan tegangan gabungan sama dengan energi distorsi yang dihasilkan dalam tegangan sederhana (Campbell, 2012).

**Tabel 2.9** Koefisien termal ekspansi untuk *Ferrous*(ASME BPVC Committee, 2015b).

Thermal Expansion for Ferrous Materials									
Temperature, °C	Coefficients for Carbon and Low Alloy Steels (Group 1) [Note (1)]			Coefficients for Other Low Alloy Steels (Group 2) [Note (2)]			Coefficients for 5Cr-1Mo and 29Cr-7Ni-2Mo-N Steels		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
20	11.5	11.5	0	12.6	12.6	0	11.5	11.5	0
50	12.0	11.8	0.4	13.0	12.8	0.4	12.0	11.8	0.4
75	12.3	11.9	0.7	13.3	13.0	0.7	12.3	12.0	0.7
100	12.7	12.1	1.0	13.5	13.1	1.0	12.6	12.1	1.0
125	12.9	12.3	1.3	13.8	13.2	1.4	12.8	12.3	1.3
150	13.2	12.4	1.6	14.0	13.4	1.7	12.9	12.4	1.6
175	13.5	12.6	2.0	14.2	13.5	2.1	13.0	12.5	1.9
200	13.8	12.7	2.3	14.4	13.6	2.4	13.2	12.6	2.3
225	14.0	12.9	2.6	14.6	13.7	2.8	13.3	12.6	2.6
250	14.3	13.0	3.0	14.8	13.8	3.2	13.4	12.7	2.9
275	14.6	13.2	3.4	15.0	13.9	3.6	13.5	12.8	3.3
300	14.9	13.3	3.7	15.1	14.0	3.9	13.6	12.8	3.6
325	15.1	13.4	4.1	15.3	14.1	4.3	13.7	12.9	3.9
350	15.4	13.6	4.5	15.4	14.2	4.7	13.8	13.0	4.3
375	15.7	13.7	4.9	15.5	14.3	5.1	14.0	13.0	4.6
400	15.9	13.8	5.3	15.7	14.4	5.5	14.1	13.1	5.0
425	16.1	14.0	5.7	15.8	14.5	5.9	14.2	13.2	5.3
450	16.4	14.1	6.1	15.9	14.6	6.3	14.4	13.2	5.7
475	16.5	14.2	6.5	16.0	14.6	6.7	14.5	13.3	6.1
500	16.7	14.4	6.9	16.1	14.7	7.1	14.6	13.4	6.4
525	16.8	14.5	7.3	16.2	14.8	7.5	14.7	13.4	6.8
550	16.9	14.6	7.7	16.2	14.8	7.9	14.8	13.5	7.2
575	17.0	14.7	8.2	16.3	14.9	8.3	14.9	13.6	7.5
600	17.0	14.8	8.6	16.4	15.0	8.7	15.0	13.6	7.9
625	17.1	14.9	9.0	16.4	15.0	9.1	15.1	13.7	8.3
650	17.1	15.0	9.4	16.4	15.1	9.5	15.2	13.7	8.7
675	17.1	15.1	9.9	16.4	15.1	9.9	15.3	13.8	9.0
700	17.1	15.1	10.3	16.4	15.2	10.3	15.4	13.9	9.4
725	17.1	15.2	10.7	16.3	15.2	10.7	15.6	13.9	9.8
750	17.2	15.3	11.1	16.3	15.3	11.1	15.9	14.0	10.2
775	17.4	15.3	11.6	16.2	15.3	11.1	16.3	14.0	10.6
800	17.7	15.4	12.0	16.0	15.3	11.5	16.8	14.1	11.0
825	18.1	15.5	12.5	15.8	15.3	11.9	17.4	14.2	11.4

Jika tegangan yang bekerja adalah tegangan tangensial/*circumferential/hoop stress* ( $\sigma_H$ ), tegangan aksial/longitudinal ( $\sigma_Z$ ) dan tegangan radial ( $\sigma_R$ ), maka tegangan equivalen ( $\sigma_{Eq}$ ) persamaannya dapat dituliskan (Viswanathan, 1989):

$$\sigma_{Eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} [((\sigma_H - \sigma_Z)^2 + (\sigma_Z - \sigma_R)^2 + (\sigma_R - \sigma_H)^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.37)$$

Sedangkan untuk regangan equivalen ( $\varepsilon_{Eq}$ ) diperoleh pada persamaan:

$$\varepsilon_{Eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} [((\varepsilon_H - \varepsilon_Z)^2 + (\varepsilon_Z - \varepsilon_R)^2 + (\varepsilon_R - \varepsilon_H)^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.38)$$

Dimana berturut-turut regangan tangensial/*hoop strain* ( $\epsilon_H$ ), regangan aksial ( $\epsilon_Z$ ) dan regangan radial ( $\epsilon_R$ ). Untuk tegangan maksimum ( $\sigma_{max}$ ) yang terjadi:

$$\sigma_{max} = \sigma_E \quad (2.39)$$

Teori kegagalan *Von-Mises* memprediksi bahwa pemuluran akan terjadi jika tegangan ekuivalen melebihi tegangan mulur uniaksial, dirumuskan dengan (Campbell, 2012) :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [((\sigma_H - \sigma_Z)^2 + (\sigma_Z - \sigma_R)^2 + (\sigma_R - \sigma_H)^2)]^{\frac{1}{2}} \geq Y_S \quad (2.40)$$

### II.5.7 Perilaku dan Karakteristik Mulur (*Creep*)

*Creep* merupakan deformasi plastis yang terjadi pada material karena diberi beban dan temperatur konstan. Deformasi pada logam yang tergantung-waktu (*time-dependent*) terjadi pada temperatur sekitar 0,3 hingga 0,6 dari titik lebur absolut ( $T_m$ ). Pada *creep*, aktivasi termal memungkinkan deformasi plastis pada tekanan di bawah yang diperlukan untuk mengubah bentuk kisi tanpa aktivasi termal. Dengan demikian, logam yang mengalami beban tarik konstan pada temperatur tinggi akan mulur (*creep*) dan mengalami peningkatan panjang tergantung-waktu hingga mengalami pecah (*rupture*) (Campbell, 2012).

Untuk mengetahui kegagalan mekanik pada logam yang terjadi pengaruh temperatur tinggi dan tergantung pada waktu (*time-dependent*) (Campbell, 2012), yaitu:

1. Dengan metode uji *creep*, regangan yang tergantung waktu (*time-dependent*) atau ekstensi, diukur pada temperatur tinggi jangka panjang (*long-term*).
2. Dengan metode uji yang lebih pendek, uji *stress-rupture*, mengukur waktu yang diperlukan untuk merusak logam pada tekanan yang diberikan pada suhu tinggi.

Kurva *creep* pada kondisi tegangan konstan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.19 dan kurva hubungan laju regangan (*strain rate*) atau laju *creep* dan waktu selama uji *creep* beban konstan ditunjukkan dalam Gambar 2.20, memberikan 3 tahap yang berbeda (Campbell, 2012).

### A. *Primary Creep.*

Pada kondisi ini, spesimen mengalami perpanjangan awal ( $\epsilon_o = \epsilon_e + \epsilon_p$ ). *Primary creep*, juga dikenal sebagai *transient creep*, merupakan tahap penyesuaian dalam logam di mana terjadi regangan plastik yang teraktivasi secara termal dan cepat.

### B. *Secondary Creep.*

Pada kondisi ini *creep rate* secara nominal konstan pada tingkat minimum, umumnya dikenal sebagai *creep rate* minimum. *Creep* sekunder, juga dikenal sebagai *steady-state creep*, terjadi ketika terdapat keseimbangan antara proses pengerasan regangan dan pemulihan. Pada temperatur rendah, hasil *creep rate* yang semakin berkurang. Namun, jika temperatur cukup tinggi, dislokasi dapat mengatur ulang dan memusnahkan diri melalui pemulihan. Selama deformasi *creep*, material juga semakin terdegradasi atau rusak karena jumlah *creep strain* meningkat seiring waktu.

### C. *Power Law Model* dari kondisi *Steady-State Creep rates*.

Dalam rezim suhu menengah ( $0,4 T_m < T < 0,6 T_m$ ), tingkat *creep* bervariasi nonlinier dengan tegangan, baik sebagai fungsi daya atau fungsi tegangan eksponensial. Pada tekanan dan suhu yang menarik bagi insinyur, perilaku berikut ini umumnya dipatuhi yang diusulkan oleh *Norton* dan *Bailey* [(ASM International Committee, 2000), (JR, William D. Callister, 2015)] :

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \cdot \sigma^n \quad (2.41)$$

$$\ln \dot{\epsilon}_{ss} = \ln A + n \cdot \ln \sigma \quad (2.41a)$$

Dimana A dan n merupakan konstanta *stress-independent*. Selain itu, karena satu kontribusi untuk *creep* adalah proses difusi yang diaktifkan secara termal, dengan energi aktivasi karakteristik Q untuk mekanisme pengontrol laju, yang disebut persamaan *Arrhenius*:

$$\dot{\epsilon}_{ssArrh} = A \cdot \sigma^n \exp^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad (2.42)$$

Dimana berturut-turut  $\dot{\epsilon}_{ss}$ ,  $\sigma$ , Q, R dan T adalah *steady-state creep rates*, tegangan elastis, energi aktivasi, konstanta gas universal (8,314 J/mol. K) dan temperatur

absolut (K). Sedangkan  $A$  dan  $n$  adalah konstanta (nilai  $n$  bervariasi antara 3 sampai dengan 10).

Sementara, untuk kondisi *steady-state creep* (distribusi tegangan) pada silinder/*tubes* dalam arah tangensial ( $\sigma_{Hss}$ ), arah aksial/longitudinal ( $\sigma_{Zss}$ ) dan arah radial ( $\sigma_{Rss}$ ) dapat dituliskan dalam persamaan dibawah ini.

a. Tegangan *steady-state creep* arah tangensial ( $\sigma_{Hss}$ ).

$$\sigma_{Hss} = \frac{P}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^{\frac{2}{n}} - 1} x \left[ 1 + \left(\frac{2-n}{n}\right) x \left(\frac{r_o}{r}\right)^{\frac{2}{n}} \right] \quad (2.43)$$

b. Tegangan *steady-state creep* arah aksial/longitudinal ( $\sigma_{Zss}$ ).

$$\sigma_{Zss} = \frac{P}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^{\frac{2}{n}} - 1} x \left[ 1 + \left(\frac{1-n}{n}\right) x \left(\frac{r_o}{r}\right)^{\frac{2}{n}} \right] \quad (2.44)$$

c. Tegangan *steady-state creep* arah radial ( $\sigma_{Rss}$ ).

$$\sigma_{Rss} = \frac{P}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^{\frac{2}{n}} - 1} x \left[ 1 - \left(\frac{r_o}{r}\right)^{\frac{2}{n}} \right] \quad (2.45)$$

Dimana  $n$  merupakan eksponen *Norton*.

Sehingga Regangan *steady-state* ( $\epsilon_{ss}$ ) yang terjadi pada silinder/*tube* dalam arah tangensial ( $\epsilon_{Hss}$ ), arah aksial/longitudinal ( $\epsilon_{Zss}$ ) dan regangan ( $\epsilon_{Rss}$ ) dapat ditunjukkan dalam persamaan:

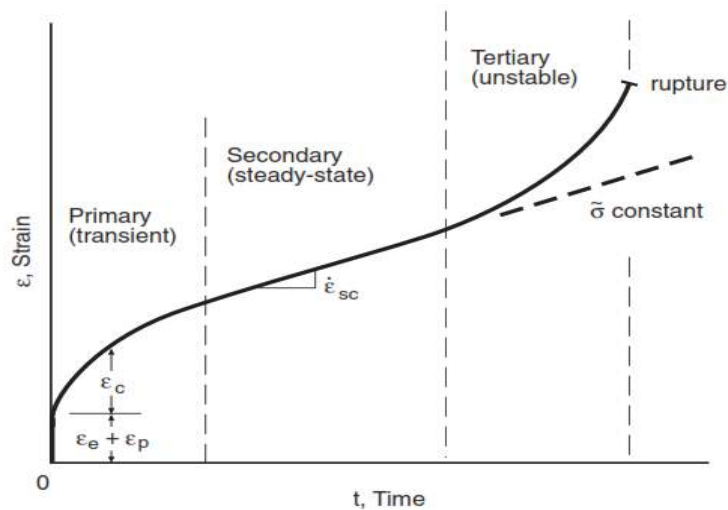
$$\epsilon_{Hss} = \frac{1}{E} [\sigma_{Hss} - \nu(\sigma_{Rss} + \sigma_{Zss})] \quad (2.46)$$

$$\epsilon_{Zss} = \frac{1}{E} [\sigma_{Zss} - \nu(\sigma_{Rss} + \sigma_{Hss})] \quad (2.47)$$

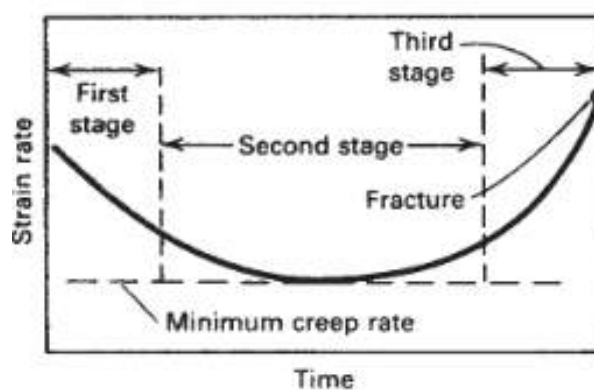
$$\epsilon_{Rss} = \frac{1}{E} [\sigma_{Rss} - \nu(\sigma_{Hss} + \sigma_{Zss})] \quad (2.48)$$

D. *Tertiary creep*. Pada kondisi ini laju regangan meningkat secara drastis dengan ekstensi yang cepat hingga terjadi patah (*fracture*). *Tertiary creep* didominasi oleh sejumlah ketidakstabilan metalurgi yang melemah, seperti *necking* yang

terlokalisasi, korosi, fraktur antar-kristal, pembentukan mikrovoid, presipitasi partikel fase kedua yang rapuh, dan pembubaran fase kedua yang awalnya berkontribusi pada penguatan paduan. Selain itu, rekristalisasi butiran yang dikeraskan dapat merusak keseimbangan antara proses pengerasan dan pelunakan material. Berbeda dengan tes beban konstan, tes tegangan konstan tidak sering menunjukkan perilaku tersier. Durasi *tertiary creep* juga penting, karena merupakan faktor keamanan yang memungkinkan deteksi komponen yang gagal sebelum patah katastrofik (Campbell, 2012).



**Gambar 2.19** Ilustrasi Kurva *creep* (Dowling, 2012).



**Gambar 2.20** Ilustrasi kurva hubungan laju regangan (*strain rate*) atau laju *creep* dan waktu selama uji *creep* beban konstan, tingkat *creep* minimum dicapai selama *creep* tahap kedua (Campbell, 2012).

Sementara untuk mekanisme deformasi *creep* dibagi menjadi 4 (empat) bagian, dimana dipengaruhi oleh modulus geser/*shear modulus* ( $G$ ), yaitu:

1) Dislokasi meluncur (*dislocation glide*).

Pada kondisi ini melibatkan dislokasi yang bergerak di sepanjang bidang slip dan mengatasi hambatan dengan aktivasi termal. Mekanisme ini terjadi pada tegangan tinggi, ditandai dengan nilai  $\sigma/G > 10^{-2}$ .

2) Dislokasi mulur (*dislocation creep*)

Pada kondisi ini melibatkan pergerakan dislokasi yang mengatasi hambatan dengan mekanisme yang dibantu secara termal yang melibatkan difusi kekosongan atau interstisial, ditandai dengan nilai  $10^{-4} < \sigma/G < 10^{-2}$ .

3) Difusi *creep* (*diffusion creep*)

Pada kondisi ini melibatkan aliran kekosongan dan interstisial melalui kristal di bawah pengaruh tegangan yang diterapkan, ditandai dengan nilai  $\sigma/G < 10^{-4}$ . Kategori ini mencakup *Nabarro-Herring creep* dan *Coble creep*.

4) Geser batas butir (*grain boundary sliding*)

Pada kondisi ini melibatkan geseran butir melewati satu sama lain.

Selanjutnya untuk menentukan nilai modulus geser/*shear modulus* ( $G$ ) material logam/*metal* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (ASTM International Committee, 2013) :

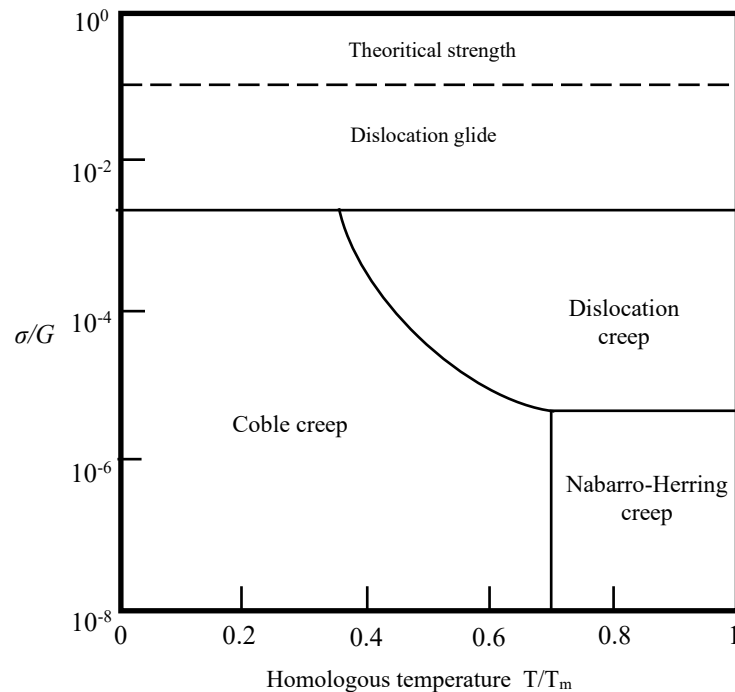
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.49)$$

Dimana  $E$  merupakan modulus elastisitas/*young's modulus* (MPa) dan  $\nu$  merupakan rasio *poisson's*. Pada Gambar 2.21 menampilkan peta mekanisme deformasi yang disederhanakan.

## II.5.8 Pengaruh Beban Faktor Unsur Kimia

Faktor kimia merupakan salah satu beban yang bekerja pada komponen-komponen *boiler*. Efek dari pengaruh faktor kimia bekerja pada komponen *boiler* yang dipengaruhi oleh lingkungan dan fluktuasi temperatur yang sangat rentan terhadap pembentukan korosi dan oksidasi. Sebagai hasil produk pembakaran berupa gas yang mengalir dalam aliran gas buang terdiri dari  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,

$HCl$ ,  $HF$ , dan  $N_2$ , diantara gas-gas ini konstituen,  $SO_2$ ,  $HCl$ , dan  $HF$  dianggap korosif pada temperatur tinggi (ASM International Committee, 2006).

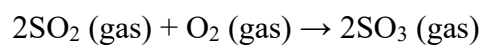


**Gambar 2. 21** Peta mekanisme deformasi yang disederhanakan (Dieter, 1988).

Di sisi api *economizer tube boiler*, ketika bahan bakar yang mengandung belerang atau senyawa belerang mengalami pembakaran, belerang yang ada dalam bahan bakar dioksidasi menjadi  $SO_2$ , dan sejumlah kecil  $SO_3$ ,  $CO_2$ , dan uap air selalu ada dalam pembakaran. Gas  $SO_3$  bergabung dengan uap air membentuk  $H_2SO_4$ .  $H_2SO_4$  mengembun pada permukaan logam dan menimbulkan korosi pada suhu tertentu. Temperatur di mana  $H_2SO_4$  pertama kali mengembun dikenal sebagai titik embun  $H_2SO_4$ . Titik embun  $H_2SO_4$  tergantung pada konsentrasi  $SO_3$  dan uap air dalam gas buang. Secara umum, titik embun meningkat dengan meningkatnya konsentrasi  $SO_3$  dan kadar air dalam gas buang. Konsentrasi  $SO_3$  dalam gas meningkat dengan meningkatnya kecepatan udara berlebih, waktu tinggal gas, dan kandungan sulfur dalam bahan bakar. Kandungan udara dalam gas buang tergantung pada banyak faktor. Kebocoran terutama menyebabkan sumber uap air di tabung boiler dan uap dari jelaga yang bertiup. Ketika suhu komponen logam turun di bawah titik embun gas buang  $H_2SO_4$ ,  $H_2SO_4$  mengembun pada permukaan



logam dan merusak logam. Apa yang disebut korosi ujung dingin terutama ditemukan pada komponen *boiler* tingkat rendah seperti *economizers*, pemanas awal udara, *stacks*, dan lain-lain. Faktor penting yang mengatur korosi ujung dingin termasuk adanya konsentrasi  $\text{SO}_3$  yang memadai dan kelembaban dalam gas dan logam. Disertai suhu permukaan logam di bawah titik embun  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Pada korosi jenis ini, temperatur kritis dan bukan temperatur gas buang. Bahkan jika temperatur gas buang di atas titik embun, korosi mungkin terjadi ketika temperatur logam berada di bawah (ASM International Committee, 2006).



Air dan uap temperatur tinggi bereaksi dengan baja ketel untuk membentuk oksida, hidroksida, hidrat, dan hidrogen, tetapi pembentukan lapisan oksida pelindung, seperti magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), pada permukaan logam umumnya menghambat reaksi lebih lanjut. Film-film oksida pelindung seperti itu dipertahankan dan korosi dicegah dengan kontrol yang sesuai dari kimia air *boiler*. Namun, kotoran berlebih dalam air umpan *boiler* dapat mencegah kontrol yang efektif, membentuk endapan berbahaya, dan memperburuk korosi. Meskipun proses pengendapan, korosi, dan kontrol kimia bervariasi dengan tekanan *boiler* dan desain siklus, proses yang serupa juga dilibatkan untuk berbagai *power boiler* dan untuk banyak *boiler* industri dan generator uap pemulihan panas juga (ASM International Committee, 2006).

Pada sisi air, endapan dan korosi pada *boiler* dikendalikan oleh pemurnian air dan perawatan kimia. Kotoran dihilangkan dengan pemurnian air *makeup*, pemolesan kondensat yang dikembalikan, deaerasi dan *blowdown*. Bahan kimia kemudian ditambahkan untuk mengontrol *pH*, potensial elektrokimia, dan konsentrasi oksigen terlarut. Kehati-hatian juga harus diperhatikan untuk mencegah korosi saat *boiler* tidak beroperasi, siaga atau untuk pemeliharaan. Kontrol kimia air yang tepat meningkatkan keandalan *boiler* dan mengurangi biaya perawatan dan penggantian komponen. Ini juga meningkatkan kinerja dan masa pakai penukar panas, pompa, turbin, dan perpipaan di seluruh siklus pembangkitan, penggunaan

dan kondensasi (ASM International Committee, 2006). Pada Table 2.10 Konsensus ASME, menyarankan untuk batas kimia air umpan pada aplikasi *boiler* industri.

**Tabel 2.10** Konsensus ASME tabel 1, menyarankan untuk batas kimia air umpan pada *boiler* industri (Frayne, 2002).

Drum Operating psig Pressure (1) (11) (MPa)	0-300 (0-2.07)	301-450 (2.08-3.10)	451-600 (3.11-4.14)	601-750 (4.15-5.17)	751-900 (5.18-6.21)	901-1000 (6.22-6.89)	1001-1500 (6.90-10.34)	1501-2000 (10.35-13.79)
<b>Feedwater (7)</b>								
Dissolved oxygen ppm (mg/l) O <sub>2</sub> —measured before chemical oxygen scavenger addition (8)	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007	<0.007
Total iron ppm (mg/l) Fe	≤0.1	≤0.05	≤0.03	≤0.025	≤0.02	≤0.02	≤0.01	≤0.01
Total copper ppm (mg/l) Cu	≤0.05	≤0.025	≤0.02	≤0.02	≤0.015	≤0.01	≤0.01	≤0.0
Total hardness ppm as CaCO <sub>3</sub>	≤0.3	≤0.3	≤0.2	≤0.2	≤0.1	≤0.05	ND	ND
pH @ 25°C	8.3-10.0	8.3-10.0	8.3-10.0	8.3-10.0	8.3-10.0	8.8-9.6	8.8-9.6	8.8-9.6
Chemicals for preboiler system protection	NS	NS	NS	NS	NS	VAM	VAM	VAM
Nonvolatile TOC ppm C (6)	<1	<1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.2	<0.2	<0.2
Oily matter ppm (mg/l)	<1	<1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.2	<0.2	<0.2
<b>Boiler Water</b>								
Silica ppm (mg/l) SiO <sub>2</sub>	≤150	≤90	≤40	≤30	≤20	≤8	≤2	≤1
Total alkalinity ppm as CaCO <sub>3</sub>	<350 (3)	<300 (3)	<250 (3)	<200 (3)	<150 (3)	<100 (3)	NS (4)	NS (4)
Free OH alk. ppm CaCO <sub>3</sub> (2)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	ND (4)	ND (4)
Specific conductance (12) µmhos/cm (µS/cm) @ 25°C without neutralization	5400-1100 (5)	4600-900 (5)	3800-800 (5)	1500-300 (5)	1200-200 (5)	1000-200 (5)	<150	<80
<b>TDS in Steam (9)</b>								
TDS (maximum) ppm (mg/l)	1.0-0.2	1.0-0.2	1.0-0.2	0.5-0.1	0.5-0.1	0.5-0.1	0.1	0.1

NOTES: NS = not specified, ND = not detectable. VAM = Use only volatile alkaline materials upstream of attemperation water source

## II.6 Mekanisme Kerusakan Material Pada Komponen *Boiler Tubes*

*Boiler* berperan penting dalam menghasilkan daya dengan mengubah air menjadi uap dipanaskan lanjut untuk selanjutnya dialirkan untuk menggerakkan turbin uap. Dengan temperatur dan beban kerja yang tinggi, komponen *boiler* dapat menghadapi berbagai permasalahan, mulai dari penurunan kualitas (degradasi) material komponen hingga pada kegagalan. Komponen *boiler* juga memiliki umur pakai yang terbatas dan dapat rusak akibat berbagai macam jenis kegagalan. Degradasi yang dialami oleh material dalam kondisi ekstrim ini dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok (Meyers & Chawla, 2009):

1. Degradasi mekanis. Meskipun pada awalnya menahan beban yang diterapkan, bahan mengalami deformasi anelastik; dimensinya berubah seiring waktu.
2. Degradasi kimia. Hal ini disebabkan oleh reaksi bahan dengan lingkungan kimia dan difusi elemen eksternal ke dalam bahan. Klorinasi (yang mempengaruhi sifat

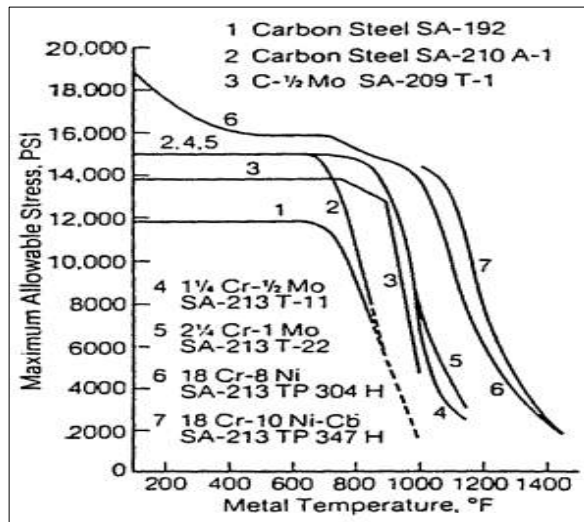
super *alloy* yang digunakan dalam turbin jet) dan oksidasi internal adalah contoh degradasi kimia.

Dalam Tabel 2.11 diuraikan klasifikasi mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada komponen *boiler tube*. Dalam Gambar 2.22 menunjukkan pengaruh temperatur terhadap tegangan maksimum yang diizinkan pada beberapa tingkatan pipa/*tube* baja. Dalam tinjauan kegagalan pada pembangkit listrik tenaga uap fosil, ditemukan bahwa 81 % dari kegagalan itu bersifat mekanis dan sisanya disebabkan oleh korosi. Dari kegagalan mekanis, 65 % diklasifikasikan sebagai waktu singkat (*short-term*) kegagalan dengan temperatur yang meningkat. Hanya 9 % yang disebabkan oleh *creep*, sisanya disebabkan oleh kelelahan, kegagalan las, erosi dan sebagainya (McEvily, 2013).

Dari beberapa klasifikasi kegagalan yang terjadi pada komponen *boiler tube* di atas, akan diuraikan secara singkat terkait dengan penelitian yang akan dilakukan.

**Tabel 2.11** Klasifikasi kegagalan pada komponen *boiler* (ASM International Committee, 2006).

<b>Failure mode</b>	<b>Causal Factor</b>
Stress rupture	Short-term overheating High-temperature creep Dissimilar metal welds
Erosion	Fly ash Falling slag Sootblower Coal particle
Water-side corrosion	Caustic corrosion Hydrogen damage Pitting (localized corrosion) Stress-corrosion cracking
Fatigue	Vibration Thermal Corrosion
Fire-side corrosion	Low-temperature Waterwall Coal ash Oil ash
Lack of quality control	Maintenance cleaning damage Chemical excursion damage Materials damage Welding defect



**Gambar 2.22** Pengaruh temperatur terhadap tegangan maksimum yang diizinkan pada beberapa tingkatan pipa/tube baja berdasarkan *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* (Viswanathan, 1989).

### II.6.1 Kegagalan Akibat *Stress-Rupture* Pada *Boiler Tubes*

Desain didasarkan pada penerapan faktor keamanan pada nilai-nilai ini untuk menghindari kegagalan dan deformasi plastis. Pada prinsipnya, komponen boiler dapat beroperasi tanpa batas waktu jika tidak terjadi fenomena degradasi terkait korosi. Pada temperatur tinggi, deformasi bergantung waktu (*time-dependent*) dan fraktur menjadi operatif oleh karenanya target umur desain dapat dipertimbangkan berdasarkan pada waktu pecah atau waktu untuk menyebabkan derajat deformasi tertentu. Semua faktor ini diperhitungkan dalam desain komponen yang beroperasi pada temperatur tinggi (Viswanathan, 1989).

Dalam *Mandatory Appendix I ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D*, menjelaskan bahwa (ASME BPVC Committee, 2015b) :

- a. Pada temperatur di bawah kisaran di mana kekuatan creep dan *stress-rupture* mengatur pemilihan tegangan, nilai tegangan maksimum yang diizinkan adalah yang terendah dari yang berikut ini:
  - 1) Kekuatan tarik minimum yang ditentukan pada suhu kamar dibagi dengan 3,5.

- 2) Kekuatan tarik pada suhu dibagi dengan 3,5.
  - 3) 2/3 dari kekuatan luluh minimum yang ditentukan pada temperatur kamar.
  - 4) 2/3 dari kekuatan luluh pada temperatur tinggi.
- b. Pada temperatur dalam kisaran di mana kekuatan *creep* dan *stress-rupture* mengatur pemilihan tegangan, nilai tegangan maksimum yang diizinkan untuk semua bahan ditetapkan oleh komite untuk tidak melebihi yang terendah dari yang berikut:
- 1) 100 % dari tegangan rata-rata untuk menghasilkan tingkat *creep* 0,01 %/1000 jam.
  - 2) 67 % dari tegangan rata-rata menyebabkan pecah pada akhir 100.000 jam.
  - 3) 80 % dari tegangan minimum menyebabkan pecah pada akhir 100.000 jam.

Kekuatan *boiler tube* tergantung pada tingkat tegangan serta temperatur ketika temperatur *tube* logam berada dalam kisaran *creep* (Viswanathan, 1989). Kegagalan yang disebabkan mekanisme tegangan-pecah (*stress-rupture*) sering ditemukan pada *superheater* dan *reheater tube* yang didinginkan dengan uap di mana temperatur operasi *tube* berada dalam kisaran *creep*. Akan tetapi, *stress-rupture* juga dapat terjadi pada *tube* berpendingin air, jika pada kondisi tersebut perpindahan panas yang terjadi abnormal sehingga dapat menghasilkan peningkatan temperatur operasi *tube*. Tegangan melingkar (*hoop stress*) dalam *tube* ditentukan oleh diameter dan ketebalan *tube*. Jika ketebalan *tube* dikurangi oleh korosi atau erosi kemungkinan kegagalan akan meningkat. Terdapat 2 mekanisme dari kegagalan *stress-rupture* yang sering terjadi, yaitu *overheating* jangka pendek (*short-term overheating*) dan *creep* temperatur tinggi (*high-temperature creep/long-term overheating*). Masing-masing ilustrasi ditunjukkan dalam Gambar 2.23 dan Gambar 2.24.

Kegagalan *short-term overheating* terjadi pada *tube* pada temperatur yang sangat tinggi karena kondisi tidak normal seperti kehilangan aliran cairan pendingin dan temperatur gas *boiler* yang berlebihan. Kondisi tersebut terjadi karena keadaan berikut:

1. Penyumbatan pada bagian internal *tube*.
2. Kehilangan sirkulasi pendingin atau tingkat air yang rendah.

3. Kehilangan pendingin karena kegagalan pada *tube* bagian hulu.
4. Pembakaran yang berlebihan (*overfiring*) atau tidak merata pada pembakar bahan bakar *boiler*.

Kegagalan *short-term overheating* melibatkan deformasi *tube* yang cukup besar dalam bentuk perpanjangan logam dan pengurangan area dinding atau penampang. Kegagalan seperti itu sering ditandai sebagai memiliki permukaan fraktur ujung pisau. Penampilan *fishmouth* dengan permukaan fraktur tepi tipis dan pembengkakan yang cukup khas untuk *tube* baja feritik yang telah gagal sebelum temperturnya telah melampaui temperatur kritis. Perubahan pengukuran dari diameter dalam dan diameter luar *tube* dapat menjadi indikator *overheating*, bila terjadi peningkatan 5 % atau lebih dari dimensi tersebut, mengindikasikan terjadi *short-term overheating*. Juga, perubahan struktur mikro yang signifikan pada baja karbon akan terjadi ketika baja terlalu panas dan perubahan ini dapat digunakan untuk memperkirakan temperatur logam pada kegagalan.



**Gambar 2.23** *Short-term overheating*, di mana tonjolan terjadi sebelum pecah (Port & Herro, 1991).

Karena kegagalan panas berlebih jangka pendek dapat terjadi dari beberapa penyebab dasar, tindakan korektif yang diperlukan untuk mencegah terulangnya dapat bervariasi. Secara umum, langkah-langkah pengendalian kualitas harus diberlakukan untuk mencegah penyumbatan *tube*, laju aliran cairan pendingin yang rendah, tingkat air *drum* yang rendah dan tingkat pembakaran yang berlebihan. Prosedur perawatan harus diikuti selama pengelasan sambungan *tube* untuk

mencegah alat, memotong serpihan, dan percikan las memasuki sirkuit *tube*. Instruksi pengoperasian harus diikuti untuk menghindari kadar air *drum* yang rendah, laju pembakaran yang berlebihan, operasi pembakar bahan bakar yang tidak tepat, semprotan penghilang panas berlebih atau perpindahan panas yang rendah melalui *waterwall tubes*.

Kegagalan *Creep* temperatur tinggi (*high-temperature creep*) atau sering juga disebut *long-term overheating* dapat terjadi pada komponen *boiler tube* (Viswanathan, 1989). Degradasi logam dan deformasi permanen akan terjadi seiring waktu, tergantung pada temperatur aktual dan tingkat tegangan. Jika temperatur dan tegangan melebihi nilai pemilihan desain, baja *tube* akan menunjukkan tingkat *creep* yang lebih tinggi dan akan gagal lebih awal dari yang diharapkan. Kegagalan dihasilkan dari periode panas berlebih yang relatif terus-menerus yang sedikit (perbedaan antara desain dan temperatur operasi aktual), tingkat temperatur atau tegangan yang meningkat secara perlahan, atau akumulasi dari beberapa periode panas berlebih. Kerusakan *creep* terjadi di sepanjang batas butir baja dan disejajarkan  $90^\circ$  dari arah tegangan tarik yang diterapkan. Deformasi *creep* menghasilkan sedikit atau tidak ada pengurangan ketebalan dinding tetapi menghasilkan perpanjangan *creep* yang terukur atau peningkatan diameter dalam *tube* baja feritik. Stainless steel tidak menunjukkan deformasi dalam kegagalan jangka panjang (*long-term overheating*).



**Gambar 2.24** Kegagalan pada *superheater tube* akibat *creep* (*long-term overheating*) (Port & Herro, 1991).

*Creep* temperatur tinggi berkembang dari sirkulasi pendingin *boiler* yang tidak mencukupi, temperatur gas *boiler* yang meningkat atau sifat material yang tidak memadai untuk kondisi operasi aktual. Kondisi tidak normal ini diciptakan oleh keadaan berikut:

1. Pembatasan internal aliran pendingin *tube* akibat dari *scale*, serpihan atau kondensat.
2. Pengurangan kemampuan transfer panas karena permukaan internal (sisi-uap) terdapat *scale* oksida atau deposit kimia.
3. Pembakaran bahan bakar yang terlalu sering atau tidak merata.
4. Penyumbatan atau *laning* saluran gas boiler.
5. Pengoperasian material *tube* pada temperatur yang lebih tinggi dari yang diizinkan.
6. Meningkatnya tegangan karena penipisan dinding.

*Creep* temperatur tinggi biasanya menghasilkan fraktur longitudinal pada sisi *tubes* yang dipanaskan. Luasnya fraktur dapat bervariasi dan memiliki penampilan fisik yang berbeda. Fraktur kecil akan membentuk bukaan tipe *blister*, sedangkan fraktur besar menunjukkan penampilan tipe mulut ikan (*fishmouth*) yang lebar. Permukaan fraktur memiliki tepi yang tebal karena kerusakan *creep* menciptakan hubungan rongga individual dan retakan yang diisi oksida hitam. Retak sekunder yang berdekatan dengan fraktur utama luas dan merupakan indikasi positif *creep*, meskipun tidak adanya retakan longitudinal dalam skala oksida besi getas tidak berarti bahwa pembengkakan *creep* belum terjadi.

Pembilasan cairan tekanan tinggi atau pembersihan bahan kimia mungkin diperlukan untuk mengembalikan aliran cairan pendingin desain atau karakteristik perpindahan panas pada *tube*. Kegagalan karena tegangan berlebih yang disebabkan oleh penipisan dinding dapat dikontrol dengan menerapkan pengukuran ketebalan dinding ultrasonik dengan perkiraan sisa umur. Teknik estimasi sisa kehidupan seperti itu telah berhasil digunakan di banyak negara untuk menentukan *tube* mana yang melebihi ketebalan dinding kritis dan harus segera diganti untuk mencegah kegagalan dalam layanan dalam periode operasi berikutnya.

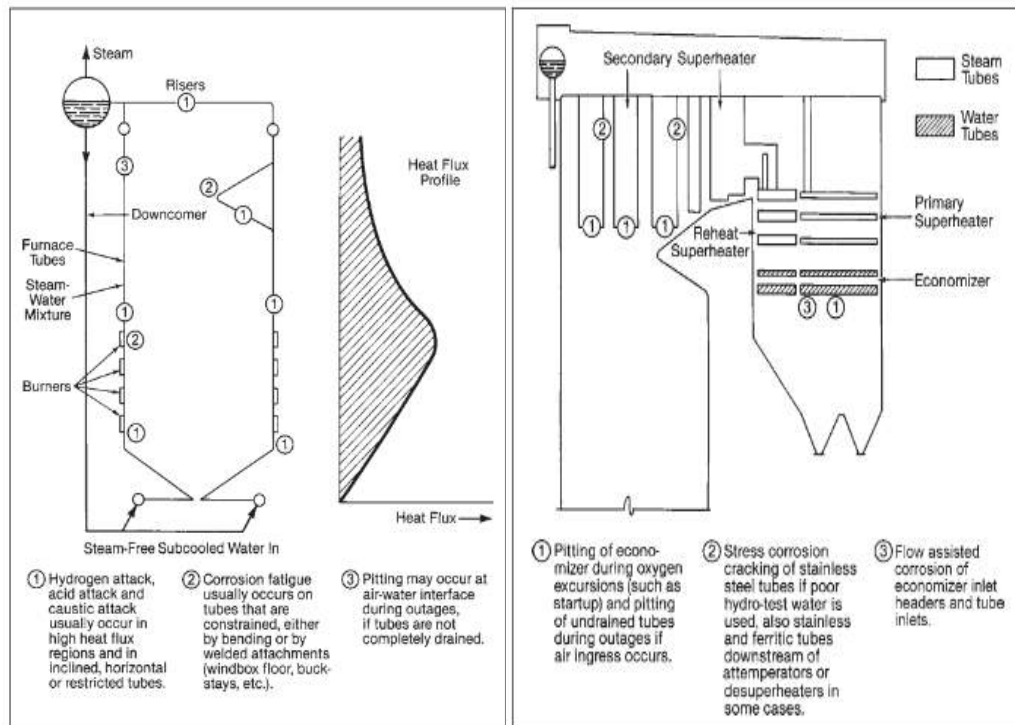


Kegagalan dari kerusakan *creep* yang disebabkan oleh periode operasi pada temperatur logam di atas batas desain dapat dikontrol dengan mengembalikan kondisi desain *boiler* atau dengan meningkatkan material tabung. Pengukuran temperatur *tube* yang sebenarnya dapat menunjukkan dimana batas desain terlampaui. Ketika temperatur aktual tidak dapat dikurangi, material *tube* harus diganti dengan baja feritik kadar kromium yang lebih tinggi atau *stainless steel austenitic*. Perkiraan sisa kehidupan dapat dilakukan untuk menentukan kapan terjadi kegagalan tabung sehingga tindakan korektif dapat diambil sebelumnya.

## **II.6.2 Korosi Pada Sisi Air/Uap (*Water/Steam-Side Corrosion*) Pada Boiler Tube**

Air dan uap suhu tinggi bereaksi dengan baja ketel (*boiler*) untuk membentuk oksida, hidroksida, hidrat dan hidrogen, tetapi pembentukan lapisan oksida pelindung, seperti magnetit ( $Fe_3O_4$ ), pada permukaan logam umumnya menghambat reaksi lebih lanjut. Film-film oksida pelindung tersebut dipertahankan dan korosi dicegah dengan kontrol yang sesuai dari susunan kimia air boiler. Namun, kotoran yang berlebihan dalam air umpan boiler dapat mencegah kontrol yang efektif, membentuk endapan berbahaya, dan memperburuk korosi. Meskipun proses pengendapan, korosi dan kontrol kimia berbeda-beda sesuai dengan tekanan boiler dan desain siklus, proses serupa juga terlibat untuk berbagai *boiler* industri dan juga pada generator uap pemulihan panas. Pemetaan lokasi berbagai jenis korosi pada sisi air/steam (*Water/steam-side Corrosion*) pada *water tube boiler* ditunjukkan dalam Gambar 2.25 (J.B. Kitto & Stultz, 2005).

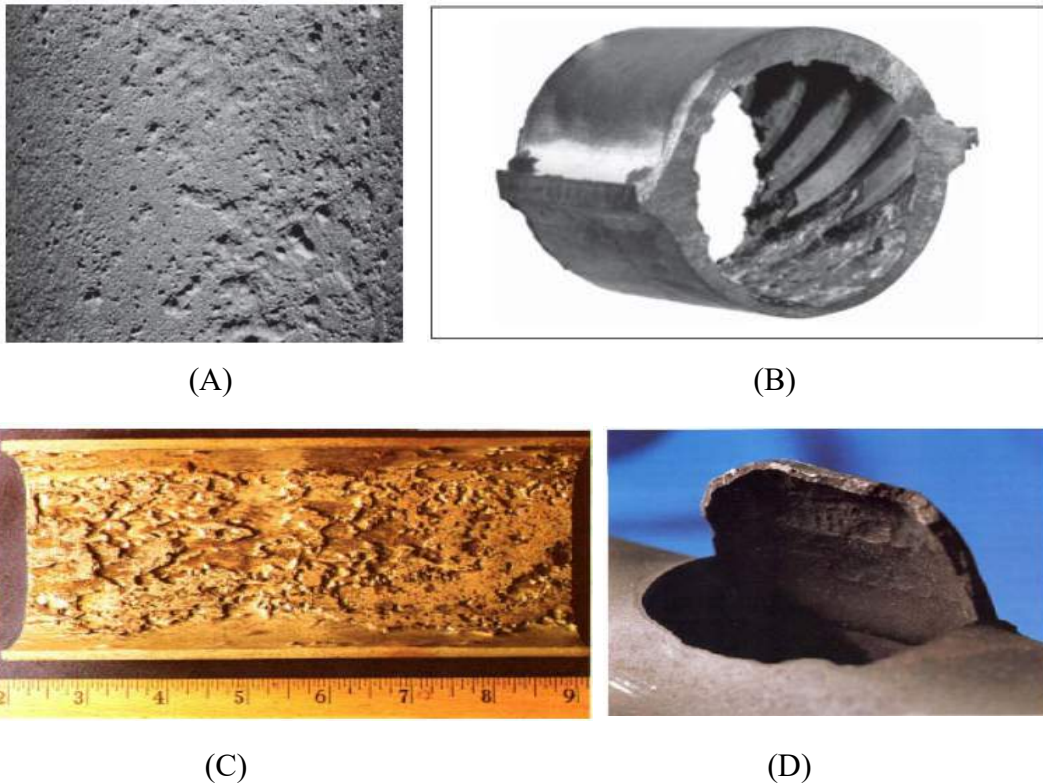
Sebagai bentuk uap, padatan terlarut berkonsentrasi dalam air *boiler*. Jika kelarutan pengotor terlampaui, pembentukan uap dapat meninggalkan endapan yang diendapkan. Deposit ini pada gilirannya menyediakan lingkungan terlindung yang semakin meningkatkan konsentrasi kimia dan laju pengendapan. Dalam *boiler tubes* yang bersih, konsentrasi bahan kimia di permukaan tabung dibatasi oleh pertukaran cairan bebas antara permukaan dan air ketel yang mengalir melalui *tubes*. Bahkan di mana ada endapan yang tipis, mendidih umumnya menghasilkan aliran yang cukup dalam endapan untuk membatasi tingkat konsentrasi.



**Gambar 2.25** Pemetaan lokasi berbagai jenis korosi pada sisi air/steam (*Water/steam-side Corrosion*) pada *water tube boiler* (J.B. Kitto & Stultz, 2005).

Namun, ketika deposit menumpuk, mereka membatasi aliran ke permukaan. Endapan *boiler* umumnya bersifat endapan kekerasan (garam kalsium dan magnesium) dan oksida logam. Pada Gambar 2.26 ditunjukkan beberapa contoh jenis korosi yang terjadi pada *boiler tube*.

Kerak (*scaling*) terjadi ketika mineral dan oksida ini mengendap dan melekat pada permukaan internal *boiler*, dimana akan menghambat perpindahan panas, sehingga *tube* akan mengalami panas yang berlebih. Ketika berkonsentrasi, beberapa bahan kimia menjadi korosif. Korosi dapat terjadi bahkan dalam boiler yang bersih, tetapi kemungkinan korosi substansial jauh lebih besar di bawah endapan berpori tebal yang memfasilitasi proses konsentrasi. Ketika endapan menumpuk, kontrol kimia air *boiler* untuk menghindari pembentukan konsentrat korosif menjadi semakin penting dan sulit. Oleh karena itu, pengoperasian *boiler* dengan endapan yang sangat tebal harus dihindari (ASM International Committee, 2006).



**Gambar 2.26** Korosi yang terjadi pada *boiler tube*, (A) *oxygen pitting* pada inlet *feedwater economizer*, (B) korosi *Acid phosphate*, (C) korosi *chelant*, (D) kerusakan akibat *Hydrogen (hydrogen damage)* (Port & Herro, 1991).

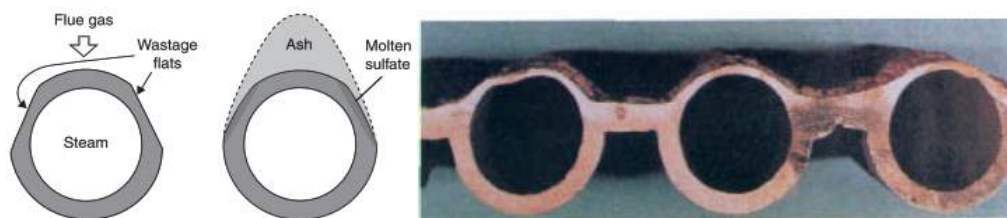
Beberapa jenis korosi yang dapat terjadi pada sisi air/uap pada *boiler tube*, yaitu: korosi akibat aliran dipercepat (*flow accelerated corrosion*), *chelant corrosion*, korosi lubang oksigen (*oxygen pitting*), korosi bahan pengompleks (*complexing agent corrosion*), korosi *fatigue (fatigue corrosion)*, korosi asam di bawah deposit dan kerusakan hidrogen (*under-deposit acid corrosion and hydrogen damage*), korosi fosfat (*phosphate corrosion*) dan *caustic stress-corrosion cracking*.

### II.6.3 Korosi Pada Sisi Api (*Fire-Side Corrosion*) Pada *Boiler Tube*

Kegagalan korosi sisi api tergantung pada jenis lingkungan bahan bakar dan suhu komponen logam (ASM International Committee, 2006). Batubara dan minyak sebagai bahan bakar dari boiler paling banyak mengandung residu yang

menyebabkan korosi, terutama pada bagian api dari tube boiler. Dalam batubara, pengotor utama adalah belerang, logam alkali, dan klorin. Polutan yang paling berbahaya dalam bahan bakar minyak adalah vanadium, natrium, belerang, dan klorin. Selama pembakaran, berbagai pengotor ini diproduksi dalam fase uap dan kondensasi. Misalnya, produk pembakaran belerang didominasi  $\text{SO}_2$  atau  $\text{H}_2\text{S}$  dalam fase gas, tergantung pada stoikiometri campuran udara/bahan bakar. Spesies uap seperti alkali sulfat, alkali vanadat, dan vanadium sulfat juga terbentuk dan kemudian mengembun dalam *boiler tubes* suhu rendah. Suhu logam yang lebih rendah tak terhindarkan memungkinkan akumulasi endapan yang berkelanjutan, sehingga menciptakan lingkungan lokal di dalam pipa yang sangat berbeda dari kebanyakan produk pembakaran. Secara umum, mekanisme korosi lainnya beroperasi pada permukaan tabung, seperti yang ditentukan oleh kimia lokal dari gas dan endapan pembakaran, komposisi tabung ketel, suhu gas dan logam.

Konstituen korosif dalam bahan bakar pada suhu logam yang tepat dapat meningkatkan korosi api unggun dari baja *boiler tubes*. Untuk batu bara, lignit, minyak, atau limbah, bahan korosif dapat membentuk cairan (korosi abu cair) yang melarutkan film oksida pada pipa dan bereaksi dengan logam dasar untuk mengurangi ketebalan dinding *tubes*.



**Gambar 2.27** Korosi abu bahan bakar (*coal ash corrosion*) pada *superheater tube*, *reheater tube* dan *waterwall tubes* menunjukkan kehilangan logam maksimum [(ASM International Committee, 2006), (Port & Herro, 1991)].

Hal ini dapat terjadi di zona pembakaran (*water wall tubes*) atau jalur konveksi (*superheater tubes*). Pembentukan fase cair pada permukaan *tubes* memungkinkan korosi panas menyerang, yang menyebabkan pembubaran dan pergantian skala oksida pelindung yang terbentuk pada paduan. Gas pembakaran

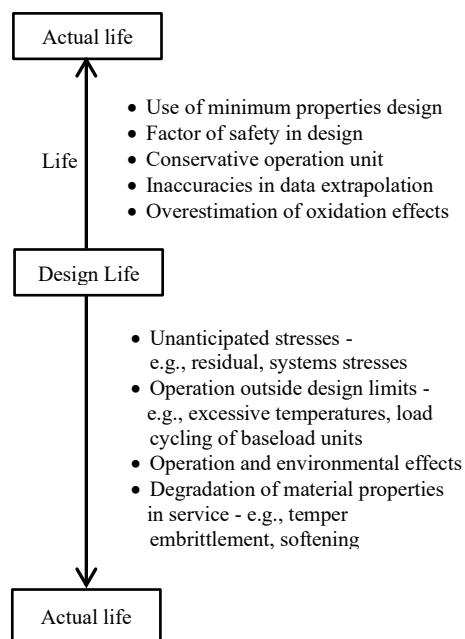
biasanya mengoksidasi, mengandung sekitar 3 % kelebihan oksigen. Akibatnya, belerang hadir dalam gas buang, terutama SO<sub>2</sub> dan SO<sub>3</sub>. Pada Gambar 2.27, terdapat korosi abu batubara pada *superheater tubes*, *reheater tubes*, dan *water wall tubes* yang menunjukkan kehilangan logam maksimum.

## II.7 Penilaian Evaluasi Pada Komponen *Boiler*

Komponen yang beroperasi pada suhu rendah di bawah rezim *creep* umumnya dirancang berdasarkan kekuatan luluh, kekuatan tarik, dan kekuatan kelelahan dengan menerapkan faktor keamanan yang sesuai dengan nilai-nilai ini. Karena deformasi dan fraktur tidak tergantung waktu (*time-dependent*) dalam keadaan ini, tidak ada nilai khusus "umur desain" yang terkait dengannya. Pada prinsipnya, selama tegangan yang diterapkan tidak melebihi tegangan desain, komponen-komponen ini harus bertahan tanpa batas waktu, meskipun dalam praktiknya berbagai faktor menyebabkan pengurangan kehidupan. Dalam kasus komponen suhu tinggi yang beroperasi dalam rezim *creep*, baik deformasi dan fraktur tergantung waktu (*time-dependent*). Oleh karena itu mereka dirancang sehubungan dengan target hidup yang biasanya didasarkan pada jumlah tertentu dari regangan yang diizinkan atau pecah dalam 100.000 jam. Faktor keselamatan lebih lanjut diterapkan dalam memilih tegangan, yang diterjemahkan ke dalam usia yang diharapkan 30 hingga 40 tahun, yang mengarah pada gagasan umur desain 30 hingga 40 tahun untuk komponen tersebut. Banyak faktor metalurgi dan operasional dapat memperpanjang umur komponen aktual di luar umur desain. Atau, jika faktor-faktor ini merugikan, kehidupan yang sebenarnya dapat dikurangi. Beberapa dari banyak faktor yang menguntungkan dan tidak menguntungkan yang memegang keseimbangan antara kehidupan desain dan kehidupan aktual diilustrasikan secara skematis pada Gambar 2.28 (Viswanathan, 1989).

Dalam melakukan penilaian evaluasi terhadap komponen *boiler* mengacu pada pemeriksaan dan pengujian yang bersifat tidak merusak (*nondestructive test*) dan pengujian merusak (*destructive test*) (J.B. Kitto & Stultz, 2005). Evaluasi tidak merusak (*nondestructive examination*) terkadang menggunakan beberapa istilah,

seperti pengujian tidak merusak (*nondestructive test*), inspeksi tidak merusak (*nondestructive inspection*), yang mana kegiatan ini meliputi pengujian, inspeksi dan pemeriksaan, yang serupa karena melibatkan terutama melihat atau mengukur sesuatu tentang objek untuk menentukan beberapa karakteristik objek atau untuk menentukan objek tersebut mengandung penyimpangan, diskontinuitas, atau kekurangan (ASM International Committee, 1997).



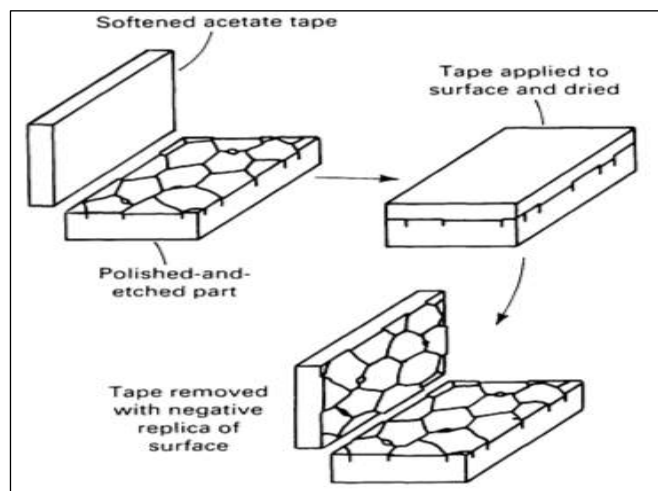
**Gambar 2.28** Ilustrasi skema faktor yang menguntungkan dan merugikan mempengaruhi usia manfaat komponen (Viswanathan, 1989).

Evaluasi tidak rusak (*non destructive examination*) dapat dengan mudah dibagi menjadi 9 (sembilan) bidang yang berbeda (ASM International Committee, 1997):

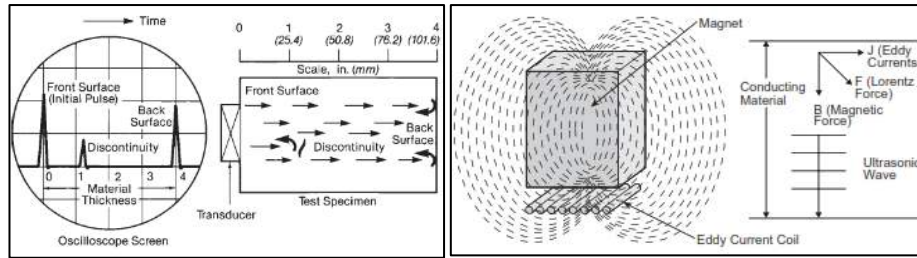
1. Deteksi dan evaluasi cacat (*flaw detection and evaluation*).
2. Deteksi dan evaluasi kebocoran (*leak detection and evaluation*).
3. Metrologi-pengukuran dimensi dan evaluasi (*metrology-measurement of dimension and evaluation*).
4. Penentuan dan evaluasi lokasi (*location determination and evaluation*).
5. Karakterisasi struktur atau mikro (*structure or microstructure characterization*).

6. Estimasi sifat mekanik dan fisik (*estimation of mechanical and physical properties*).
7. Tegangan-regangan dan penentuan respons dinamis (*stress-strain and dynamic response determination*).
8. Analisis *signature* (*signature analysis*).
9. Penentuan komposisi kimia (*chemical composition determination*).

Beberapa metode pengujian tidak merusak (*non destructive test*) yang digunakan dalam mengevaluasi pembangkit tenaga listrik dan pabrik proses industri meliputi; inspeksi visual, uji partikel magnetik (*magnetic particle test*), uji penetrasi cair (*liquid penetrant test*), uji ultrasonik (*ultrasonic test*), uji arus eddy (*eddy current*), uji radiografi (*radiography test*), fluoresensi nuklir (*nuclear fluorescence/x-ray fluorescence*), akustik elektromagnetik (*electromagnetic acoustics*), emisi akustik (*acoustic emissions*), replikasi metalografi (*metallographic replication*), pengukuran regangan (*strain measurement*) dan pengukuran suhu (*temperature measurement*) (J.B. Kitto & Stultz, 2005). Pada Gambar 2.29 ditunjukkan skema teknik replica dan Gambar 2.30 prinsip dasar pengoperasian *electromagnetic acoustic transducer*. Tabel 2.12 menunjukkan teknik inspeksi untuk komponen *boiler* dan mekanisme kegagalan primer.



**Gambar 2.29** Ilustrasi skema teknik replika *plastic* [(Viswanathan, 1989), (ASM International Committee, 1997)].



(A)

(B)

**Gambar 2.30** Prinsip dasar pengoperasian, (A) Respons sinyal *ultrasonic*, (B) *electromagnetic acoustic transducer* (EMAT) (J.B. Kitto & Stultz, 2005).

**Tabel 2.12** Komponen *boiler*, teknik inspeksi dan mekanisme kegagalan primer (Viswanathan, 1989).

Boiler area	Tube samples required	Boat samples for testing	Replicas	Inspection methods (a)	Primary failure mechanism (b)
Secondary superheater:					
Outlet header		X	X	ABCHEFK	123
Tube bank(s)	X			G	1237
Inlet header			X	EHK	123
Attemperator				CF	125
Connection piping		X	X	GM	123
Reheater/superheater:					
Outlet header(s)		X	X	ABCEHFK	123
Tube bank(s)	X			G	12347
Inlet header			X	EHK	123
Attemperator				CF	125
Connection piping		X	X	GM	123
Primary superheater:					
Outlet header(s)			X	ABCEHFK	123
Tube bank(s)	X			G	1234
Inlet header(s)			X	EHK	235
Connection piping			X	GM	235
Economizer:					
Inlet header(s)				AFK	2356
Tube bank(s)	X			GL	2346
Outlet header(s)				AF	2346
Furnace enclosure tubes	X			DGL	2345
Convection pass enclosure				DGL	234
Drum				EHJ	2356
Waterwall header or collection header				AC	23
Waterwall tubes at attachments	X			DL	23

(a) A-Header stub and hard hole cap removal and internal inspection. B-Header dimensional measurements. C-Ultrasonic flaw detection (angle/beam). D-Radiography. E-Dye penetrant. F-Fiber optic probe. G-Ultrasonic thickness testing (scope-type). H-Magnetic particle. I-Field alloy detector. J-Wet-fluorescent magnetic particle. K-Stub tube magnetic particle. L-Tube removal at attachments. M-Strain monitoring (dimensional).  
(b) 1-Creep. 2-Fatigue. 3-Corrosion. 4-Erosion. 5-Thermal shock. 6-Deposition. 7-DMW.



## II.7.1 Metode Prediksi Penilaian Sisa Umur (*Remaining-Life Assessment*) Pada Komponen *Boiler Tube*

Beberapa teknik evaluasi pada komponen *boiler tube* yang akan digunakan, yaitu mulai dari analisa kekuatan konstruksi termasuk analisa tegangan yang bekerja pada komponen *boiler*, selanjutnya dengan menggunakan jenis pengujian tidak merusak (*non-destructive test*) dan pengujian merusak (*destructive test*), maka selanjutnya dapat dilakukan penilaian terhadap tingkat kerusakan dan penentuan prediksi penilaian sisa umur (*remaining-life assessment*).

Metode analisis ditujukan untuk memperkirakan usia pakai berdasarkan riwayat operasi, geometri komponen dan material properti. Prosedur analisis merupakan langkah pertama yang diperlukan dalam mengidentifikasi daerah yang berpotensi mengalami kerusakan. Pengukuran dimensi terkadang dapat memberikan perkiraan umur komponen boiler yang tersisa (Viswanathan, 1989).

Erosi dan korosi merupakan penyebab paling umum penipisan dinding diameter luar (*outside diameter*) *tube*. Erosi biasanya terjadi pada diameter luar *tube* dalam bentuk berkurangnya ketebalan dinding (J.B. Kitto & Stultz, 2005). Oleh karena itu penting untuk dilakukan perhitungan ulang terhadap komponen *boiler tube*. Dalam *ASME Boiler dan Pressure Vessel Code section I*, kekuatan konstruksi dinding *tube* dirancang untuk menahan tekanan, temperatur dan beban mekanis tertentu yang ditunjukkan dalam persamaan (ASME BPVC Committee, 2015c):

$$t_{min} = \frac{P \cdot O_D}{2 S \cdot w + P} + 0.005 O_D + e \quad (2.50)$$

Atau

$$MAWP = S \cdot w \left[ \frac{2t - 0,01O_D - 2e}{O_D - (t - 0,005O_D - e)} \right] \quad (2.51)$$

Dimana berturut-turut  $t_{min}$ ,  $P$ ,  $O_D$ ,  $S$  dan  $MAWP$  adalah ketebalan minimum yang dibutuhkan ( $mm$ ), tekanan desain/tekanan internal ( $MPa$ ), diameter luar dari *tube* ( $mm$ ), nilai tegangan maksimum yang diizinkan pada temperatur desain dari

material *tube*/logam (MPa) dan tekanan kerja maksimum yang diizinkan (MPa). Selanjutnya,  $w$  dan  $e$  konstanta faktor pelemahan kekuatan sambungan las dan konstanta faktor penambahan ketebalan untuk tube yang diperluas/*expanded* (mm).

Dalam beberapa standar atau *code* sebagai salah satunya, yaitu *API 579-1/ASME FFS-1 2016 Fitness-For-Services* dijelaskan bahwa nilai spesifik minimum kekuatan tarik dan kekuatan luluh tergantung temperatur dapat mengacu pada *Materials Properties Council (MPC)* dan *Welding Research Council (WRC) Bulletin 541*.

Dalam penelitian ini, nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluh mengacu pada *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D*. Sementara, nilai tegangan maksimum yang diizinkan ( $S$ ) pada fungsi temperatur (di atas temperatur ambien) ditunjukkan dalam persamaan (ASME BPVC Committee, 2015b):

$$S = \frac{(1,1 \times 0,85)}{3,5} T_{ST} \cdot R_T \quad (2.52)$$

Dimana,  $S$  merupakan tegangan maksimum yang diizinkan pada fungsi temperatur (MPa),  $T_{ST}$  adalah kekuatan tarik pada temperatur ruang atau pada fungsi temperatur (MPa) dan  $R_T$  merupakan rasio dari nilai kurva tren rata-rata temperatur dependen antara kekuatan tarik pada temperatur tertentu terhadap kekuatan Tarik pada temperatur ruang.

Desain komponen pembangkit listrik dan industri dirancang untuk beroperasi lebih dari 100.000 jam. Kesulitan yang lebih besar ditemui dalam memperkirakan sisa hidup *creep* dalam komponen layanan, di mana keputusan harus dibuat berdasarkan tes laboratorium yang sangat singkat (biasanya kurang dari 1000 jam). Oleh karena itu, kebutuhan akan teknik ekstrapolasi yang memungkinkan estimasi *long-term creep* dan *rupture-strength* dari bahan berdasarkan uji durasi pendek sangat penting dalam desain, kontrol kualitas, dan evaluasi pabrik (Viswanathan, 1989).

Metode teknik parametrik ekstrapolasi menjadi solusi untuk hal tersebut, lebih dari 30 pengembangan terhadap metode tersebut (Meyers & Chawla, 2009). Berikut beberapa parametrik ekstrapolasi untuk memprediksi sisa umur/*creep*-

*rupture* yang tergantung waktu dan temperatur (*time-temperature dependence*) digunakan (Viswanathan, 1989):

a. Parameter *Larson-Miller* ( $P_{LM}$ ).

$$P_{LM} = f(\sigma) = T(\log t_r + C) \quad (2.53)$$

$$t_r = 10^{\left[\frac{P_{LM}}{T+273} - C\right]} \quad (2.53a)$$

Atau

$$P_{LM} = A_0 + A_1 \cdot \log_{10}[\sigma] + A_2 \cdot (\log_{10}[\sigma])^2 + A_3 \cdot (\log_{10}[\sigma])^3 \quad (2.54)$$

Dimana  $P_{LM}$  adalah parameter *Larson-Miller* sama dengan fungsi tegangan (*ksi* atau *MPa*). Selanjutnya berturut-turut,  $T$ ,  $t_r$  dan  $C$  adalah temperatur (*Rankine* atau *Kelvin*), waktu pecah (*jam*) dan konstanta (nilai  $C = 20$  pada awalnya diusulkan, tetapi nilai-nilai yang dioptimalkan antara 10 dan 40 kemudian ditemukan cocok tergantung pada jenis material). Sementara untuk  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  dan  $A_3$  merupakan konstanta/parameter yang nilainya juga tergantung pada jenis material/bahan (M. Prager et al., 2014).

b. Parameter *Orr-Sherby-Dorn* ( $P_{OSD}$ ).

$$P_{OSD} = f(\sigma) = \log t_r - \left(\frac{Q}{2.3RT}\right) \quad (2.55)$$

atau

$$P_{OSD} = f(\sigma) = \log t_r - \frac{0.217 Q}{T} \quad (2.56)$$

Dimana  $P_{OSD}$  adalah parameter *Orr-Sherby-Dorn* sama dengan fungsi tegangan (*MPa*), selanjutnya berturut-turut,  $T$ ,  $t_r$ ,  $Q$  dan  $R$  adalah temperatur (*Kelvin*), waktu pecah (*jam*), energi aktivasi (*cal/mole*) dan konstanta gas universal ( $R = 1,987$  *cal/(mole. K)*).

c. Parameter *Manson-Hafner* ( $P_{MH}$ ).

$$P_{MH} = f(\sigma) = m = \frac{\log t_r - \log t_a}{T - T_a} \quad (2.57)$$

Dimana  $P_{MH}$  adalah parameter *Manson-Haferd* sama dengan fungsi tegangan, selanjutnya berturut-turut,  $t_r$  dan  $T$  adalah waktu pecah (*jam*) dan temperatur ( $K$ ), untuk  $t_a$  dan  $T_a$  ( $K$ ) merupakan konstanta dari material.

Pada Tabel 2.12 beberapa harga nilai dari konstanta parameter tergantung waktu ditunjukkan.

**Tabel 2.13** Beberapa harga nilai dari konstanta parameter tergantung waktu (*time-temperature parameters*) (Meyers & Chawla, 2009).

Material	Sherby-Dorn $Q$ , <i>kJ/mol</i>	Larson-Miller $C$	Manson -Haferd	
			$T_a$ , $K$	$\log t_a$
Various steels and stainless steels	$\approx 400$	$\approx 20$	-	-
Pure aluminium and dilute alloys	$\approx 150$	-	-	-
S-590 alloy (Fe based)	350	17	172	20
A-286 stainless steel	380	20	367	16
Nimonic 81A (Ni-based)	380	18	311	16
1 % Cr-1 % Mo-0,25 % V steel	460	22	311	18

Adapted from N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993), p. 699, Table 15.1.

d. Parameter *Nabarro-Herring* ( $P_{NH}$ )

$$P_{NH} \approx \frac{14\sigma b^3 D_v}{kTd^2} \quad (2.58)$$

Dimana  $P_{NH}$  adalah parameter *Nabarro-Herring* sama dengan *steady-state creep*, selanjutnya berturut-turut,  $\sigma$ ,  $b$ ,  $D_v$ ,  $k$ ,  $T$  dan  $d$  adalah tegangan yang bekerja (MPa), *Burgers vector* dari dislokasi ( $\approx 0,25$  nm), koefisien *lattice self-diffusion*, konstanta *Boltzmann's* ( $1,38 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>), temperature absolut (K) dan diameter butir/*grain* (mm) (Dieter, 1988).

e. Parameter *Coble* ( $P_{Co}$ )

$$P_{Co} \approx \frac{50\sigma b^4 D_{gb}}{kTd^2} \quad (2.59)$$

Dimana  $P_{Co}$  adalah parameter *Coble* sama dengan *steady-state creep*, selanjutnya berturut-turut,  $\sigma$ ,  $b$ ,  $D_{gb}$ ,  $k$ ,  $T$  dan  $d$  adalah tegangan yang bekerja (MPa), *Burgers vector* dari dislokasi ( $\approx 0,25$  nm), koefisien *grain-boundary diffusion*, konstanta

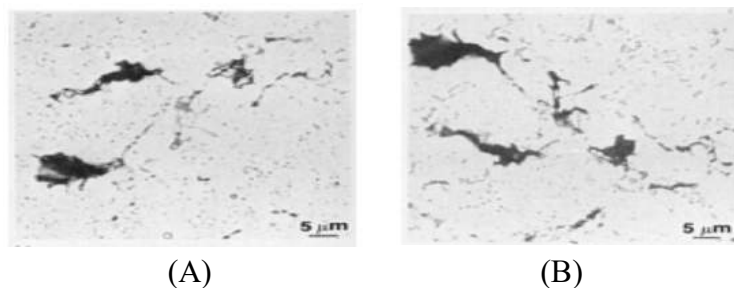
*Boltzmann's* ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ), temperatur absolut (K) dan diameter butir/*grain* (mm) (Dieter, 1988).

Pada penelitian ini menggunakan teknik parametrik yang populer, yaitu Parameter *Larson-Miller* ( $P_{LM}$ ). Metode pengukuran ketebalan *scale* oksida untuk sisi uap/air juga dapat digunakan sebagai evaluasi untuk memprediksi sisa umur dari *boiler tube*, hanya saja tidak dibahas lebih lanjut pada penelitian ini.

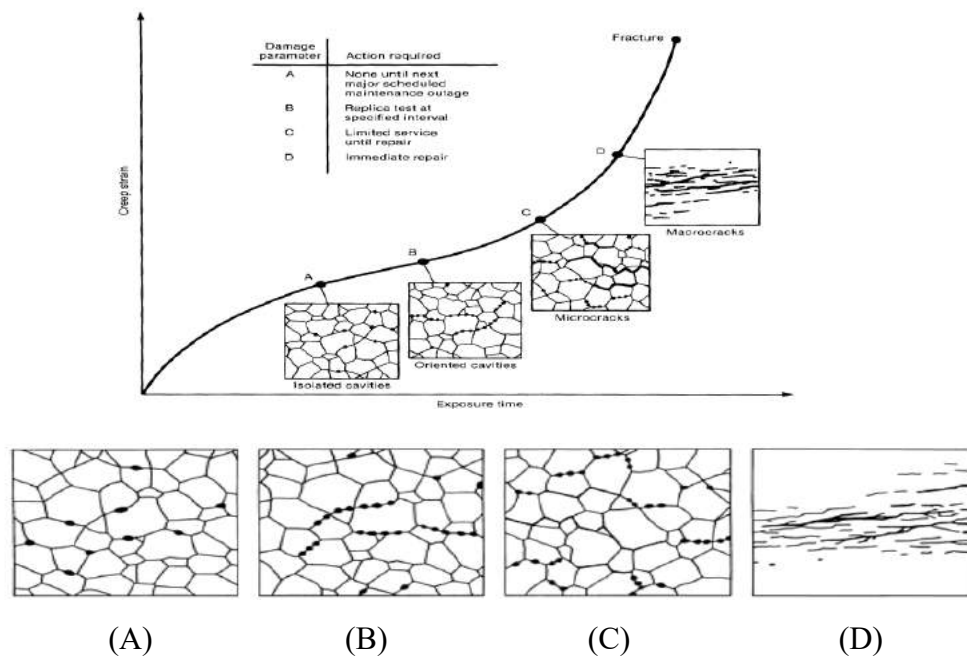
Dengan metode teknik metalograf (*metallographic methods*) juga dapat digunakan sebagai metode konservatif. Sebagai perbandingan hasil struktur mikro hasil *replica* dan struktur mikro secara langsung ditunjukkan dalam Gambar 2.31.

*Wedel* dan *Neubauer* membangun konservatisme dalam rekomendasinya dan memandang teknik yang digunakan lebih mengarah pada teknik pemantauan dibandingkan sebagai teknik prediksi kehidupan, ditunjukkan dalam Gambar 2.32. Dengan menggunakan pengalaman ini, mereka merumuskan rekomendasi yang sesuai dengan 4 (empat) tahap evolusi rongga (*cavity*) pada baja, (Viswanathan, 1989) yaitu :

1. Untuk kerusakan kelas A (*isolated cavities*), tidak ada tindakan perbaikan yang diperlukan, direkomendasikan untuk dilakukan inspeksi ulang setelah sekitar 20.000 jam layanan.
2. Untuk kerusakan kelas B, yang terdiri dari rongga berorientasi (*oriented cavities*), inspeksi ulang dalam 1,5 hingga 3 tahun akan diperlukan.
3. Untuk kerusakan kelas C (*microcracks*), perbaikan atau penggantian akan dibutuhkan dalam waktu 6 (enam) bulan.
4. Untuk kerusakan kelas D (*macrocracks*), perbaikan segera akan diperlukan.



**Gambar 2.31** Perbandingan rongga *creep*, (A) replika, (B) struktur mikro secara langsung (ASM International Committee, 1997).



**Gambar 2.32** Penilaian *creep-life* berdasarkan klasifikasi rongga. Skema pembentukan *creep-crack*, (A) Rongga kecil, (B) Menghubungkan dari waktu ke waktu, (C) Membentuk retakan *intergranular*, (D) Akhirnya *macrocracks* [(Viswanathan, 1989), (ASM International Committee, 1997)].

## II.8 Beberapa Penelitian Yang Dilakukan Sebelumnya

Dalam penelitiannya, *E. J. Pavlina* dan *C. J. Van Tyne* menjelaskan bahwa nilai kekerasan dan nilai kekuatan tarik dan luluh disusun untuk lebih dari 150 baja *hypoeutectoid, non-austenitic* dengan berbagai komposisi berbagai mikrostruktur. Struktur mikro termasuk ferit, perlit, martensit, bainit, dan struktur multifase kompleks dengan kekuatan luluh mulai dari 300 MPa hingga lebih dari 1700 MPa. Nilai kuat tarik bervariasi pada daerah 450-2350 MPa. Menggunakan analisis regresi menunjukkan hubungan antara kekuatan luluh dan kekuatan tarik dengan nilai kekerasan piramida intan pada baja. Hubungan empiris disediakan yang memungkinkan estimasi kekuatan dari pengukuran kekerasan massal. Baik kekuatan luluh dan kekuatan tarik baja menunjukkan korelasi linier dengan kekerasan pada seluruh rentang nilai kekuatan. Efek lemah dari potensi pengerasan regangan pada hubungan kekuatan luluh juga diamati (Pavlina & Van Tyne, 2018).

R. Seshadri, dalam penelitiannya, menjelaskan bahwa prediksi realistis umur *tubes* pemanas sangat penting untuk desain yang aman dan ekonomis, inspeksi strategis, dan evaluasi *tubes*. Beberapa pedoman umum terkait dengan penilaian interval hidup yang tersisa dan frekuensi pemeriksaan. Paling penting dalam perbedaan ini adalah interaksi gradien siklus termal radial, yang ada di dinding *tubes*, dengan tegangan yang diinduksi stres yang mengakibatkan peningkatan kerusakan. Prosedur analitis sederhana memperoleh perkiraan batas atas untuk deformasi dan kerusakan *creep*. Prosedur ini mempertimbangkan interaksi nonlinier antara siklus tegangan termal dan tegangan yang diinduksi tegangan dan pengaruhnya terhadap penggunaan waktu pecah dan akumulasi regangan inelastis. Kehadiran siklus tegangan termal *tubes* berdinding tebal dapat secara signifikan mengurangi umur *tubes*. "Faktor peningkatan *creep* mencirikan efek ini" (Seshadri, 1988).

D.R.H. Jones, dalam penelitiannya, menjelaskan bahwa *tubes* tekanan internal merupakan komponen penting dalam aplikasi pertukaran panas, seperti *boiler tubes*, elemen *superheater*, dan *reformer tubes* pabrik kimia. *Tubes* dalam aplikasi seperti itu rentan terhadap temperatur, akibatnya material dapat memasuki rezim mulur dan deformasi mulur (*bulging*). Bahkan fraktur berikutnya (*longitudinal rupture*) dapat terjadi, dengan konsekuensi yang parah. Diperkirakan 10% dari semua gangguan pembangkit listrik disebabkan oleh retakan rangkai pada tabung boiler. Secara umum, 30% dari semua kegagalan tabung di *boiler* dan *reformer* disebabkan oleh *creep*. Dalam penelitian yang dilakukan, terdapat 4 (empat) studi kasus dimana *tubes* dengan tekanan internal mengalami kegagalan akibat penonjolan dan *creep-rupture*. Kondisi temperatur dan waktu di mana kegagalan terjadi disimpulkan dari morfologi patahan dan transformasi mikro dan dikorelasikan dengan mekanisme deformasi bahan *tubes* dan peta mekanisme patahan (Jones, 2004).

Urbi Pal dan rekan-rekannya, dalam penelitiannya, mempresentasikan analisis korosi titik embun asam di pembangkit listrik. Penelitiannya memberikan informasi tentang penyebab korosi, mekanisme, dan kemungkinan tindakan pencegahannya. Investigasi kegagalan sistematis *economizer tubes* dimulai karena

korosi di dekat zona las. Berikutnya, diikuti oleh pertumbuhan multi arah. Endapan dicirikan sebagai oksida besi dengan konsentrasi sulfur internal yang parah. Korosi terjadi karena fenomena titik embun, yang menyebabkan kondensasi asam sulfat, mempercepat laju degradasi. disebut sebagai "korosi titik embun". Beberapa tindakan pencegahan terhadap kegagalan ini dijelaskan. Korosi titik tersebut dapat dihindari dengan menjaga suhu *tubes* logam di atas titik tersebut dan permukaan *tubes* bebas dari korosi. Selanjutnya pemantauan suhu *economizer* dilakukan untuk mengoperasikan *economizer* di atas titik embun. Temperatur gas buang dan dinding *tubes* harus diatur secara moderat dan dijaga tetap tinggi untuk menghindari korosi pada titik embun. Penambahan aditif penetral dapat mengurangi efek pembentukan asam dan dapat menggunakan sensor suhu titik embun asam (Pal et al., 2019).

*J. Ahmad* dan rekan, dalam penelitian mereka, mempresentasikan investigasi kegagalan pada *rear water wall tubes* dengan SA-210 Gr. A1. Dengan inspeksi visual di lokasi kerja, ketebalan dinding *tubes* dan pemeriksaan mikroskopis dari *rear water wall tubes* telah gagal dengan cerat terbuka lebar dan terletak di area bengkok bawah. Pengukuran ketebalan dinding di tempat dilakukan pada semua *rear water wall tubes* yang terletak pada tingkat yang sama dengan *tubes* yang pecah. Pemeriksaan mikroskopis daerah pecah yang gagal dan daerah yang agak jauh dari *tubes* yang diterima juga dilakukan untuk menentukan mekanisme kegagalan dan akar penyebab kegagalan. Penyebab kegagalan dan temuan dari inspeksi lokasi, pengukuran ketebalan dinding, pemeriksaan mikroskopis, dan analisis *creep* akhirnya dapat mengungkapkan mekanisme kegagalan dan akar utama kegagalan. Mekanisme kegagalan Identifikasi akibat kombinasi penipisan dinding lokal yang signifikan dari *rear water wall tubes* karena erosi abu terbang dan proses masalah *creep* yang diaktifkan secara termal karena kenaikan temperatur (Ahmad et al., 2009).

*Patel Sunny Sanjay* dan *Dr. R. K. Mandloi*, dalam penelitian mereka, menyajikan penyelidikan kegagalan dalam *water wall tubes* dengan SA-210 C dengan inspeksi visual di tempat, ketebalan dinding *tubes*, uji komposisi kimia, uji kekerasan, dan analisis struktur mikro dengan bukti yang dikumpulkan untuk mengidentifikasi penyebab pasti kegagalan. *Water wall tubes* gagal dengan



melepuh, bengkak, dan retak *creep* di permukaan luar dekat *soot blower*. Pengukuran ketebalan dinding di tempat dilakukan pada beberapa *water wall tubes* yang terletak pada tingkat yang sama dengan *tubes* pecah. *Tubes* memiliki penipisan dinding yang signifikan dan erosi dari luar. Deposit korosi kecil juga terlihat di bagian dalam. Pemeriksaan mikroskopis daerah pecah yang rusak dan beberapa jarak dari *tubes* yang diterima juga dilakukan untuk menentukan mekanisme kegagalan dan akar penyebabnya. Mekanisme kegagalan juga dibahas, dan data yang relevan dari beberapa bulan terakhir hingga kegagalan dikumpulkan untuk menemukan alasan kegagalan. Mekanisme kegagalan Diidentifikasi sebagai hasil kombinasi dari penipisan dinding yang signifikan dari *water wall tubes* karena panas berlebih dan *creep* dalam jangka panjang. Korosi akibat oksigen juga menjadi penyebab penipisan dinding. Analisis akar penyebab mengidentifikasi bahwa *deaerator* tidak efisien menghilangkan gas terlarut yang menyebabkan korosi (Sanjay & Mandloi, 2016).

*Kavita Sankhala* dan rekan-rekannya, dalam penelitiannya, mempresentasikan *Remaining Life Assessment* dengan beberapa metode pada komponen penting dari *boiler*. Salah satu metode yang digunakan untuk evaluasi metalografi adalah dengan meninjau berbagai mekanisme berdasarkan studi struktur mikro, dari penelitian yang dilakukan terhadap perubahan sifat mikro dan *boiler tubes* yang terpapar 106.720 jam kerja pada *boiler* berkapasitas 120 MW. Waktu operasi yang terus menerus dan temperatur yang tinggi dapat menyebabkan perubahan pada struktur baja. Akan terjadi perubahan pada konstituen baja ferit dan perlit. Butir ferit tumbuh dan membeku, perlit berkurang. Pengoperasian yang lama pada suhu kerja 545 °C menyebabkan perubahan kekuatan tarik maksimum, kekuatan luluh, kekuatan impak, kekerasan, perpanjangan dan penurunan luas penampang (Sankhala et al., 2014).

*Anatoli Vakhuelt* dan rekan, dalam penelitiannya, mempresentasikan penelitian sistematis yang dilakukan untuk mengkorelasikan hasil uji non-destruktif dengan kondisi *boiler tubes*. Evaluasi meliputi ketebalan dinding non-kontak menggunakan teknologi *Electro-Magnetic Acoustic Transducer* (EMAT) ditambah pengukuran ultrasonik khusus dari lapisan oksida internal. Metode pertama

menunjukkan ketebalan dinding *tubes* yang tersisa, sehingga memungkinkan untuk menghitung total dan potensi akhir degradasi mikrostruktur tidak langsung, yang sampai saat ini hanya dapat ditentukan dengan analisis destruktif. Kriteria *tubes* yang ada memperlakukan setiap mekanisme kerusakan secara terpisah, sedangkan efek gabungan dari penipisan dinding dan tingkat panas berlebih menentukan kondisi *tubes* yang sebenarnya. Sebuah prosedur yang memanfaatkan hasil dari kedua metode non-destruktif dikembangkan untuk metodologi yang lebih baik untuk menilai kondisi tabung dan untuk memprediksi sisa umurnya (Vakhguel't et al., 2017).

*Babak Haghghat-Shishavan* dan rekan menjelaskan operasi metalurgi, pengamatan mikro dan makroskopik, evaluasi kekerasan, *X-Ray Diffraction* (XRD), dan analisis *Energy-Dispersive Spectroscopy* (EDS) yang diinduksi selama suhu tinggi dalam *tubes* yang mengakibatkan kegagalan yang relatif singkat. Sebuah *superheater tubes* ASTM A213 T12 yang digunakan dalam pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil dan dibangun oleh berbagai *steel tubes* yang disatukan oleh pencarian ditemukan. Secara makroskopis menunjukkan deformasi tipis dan memanjang dari *superheater tubes* di daerah yang dekat dengan zona api, di samping produk korosi tebal di sisi lain *tubes*. Pengukuran menunjukkan penurunan yang luar biasa dalam nilai kekerasan logam *superheater* dekat zona kegagalan, menunjukkan bahwa redaman terjadi, butiran kasar atau mikro lainnya. Menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) membuktikan keuletan retakan dan membenarkan kegagalan yang berkepanjangan. Rongga-rongga yang diamati pada struktur mikro bagian yang gagal menunjukkan terjadinya fenomena mulur. Menjelaskan XRD dan EDS yang menunjukkan sifat sedimen yang terbentuk pada *tubes* dan bagaimana pembentukan produk korosi ini berkontribusi pada penghilangan setiap lapisan pelindung yang mungkin, memaparkan *superheater tubes* pada kerusakan korosif lebih lanjut dan membuat analisis yang membuat fenomena yang akan menyebabkan *creep* dan terjadinya kegagalan pada *tubes* (Haghghat-Shishavan et al., 2019).

Dalam penelitiannya, *Chaitanya Bakre dan Cliff J. Lissenden* menggunakan evaluasi non-destruktif dengan sistem ultrasonik komponen struktural dan

mekanik. Gelombang *Rayleigh* nonlinier memiliki keunggulan unik dibandingkan tahapan material karena nonlinier material menyebabkan distorsi bentuk gelombang. Dalam mengkarakterisasi kekasaran permukaan menggunakan *Gwyddion*, yaitu perangkat lunak untuk menganalisis data *Statistical Parametric Mapping* (SPM) (Bakre & Lissenden, 2021).

Dalam artikel mereka, *David Nečas dan Petr Klapetek* menggunakan perangkat lunak *Gwyddion* untuk memindai mikroskop data probe. Desain arsitekturnya menekankan modularitas dan integrasi algoritma yang mudah yang tersedia di perangkat lunak lain berdasarkan desain. Secara khusus, perangkat lunak ini menyediakan data dari area non-persegi panjang, analisis butir dan partikel, dan dukungan dari lembaga metrologi. Ditunjukkan bahwa berdasarkan pengembangan perangkat lunak yang dapat diakses secara terbuka, paket perangkat lunak yang berfungsi penuh dapat dibuat yang mencakup sebagian besar komunitas pengguna mikroskop pemindaian (Nečas & Klapetek, 2012).