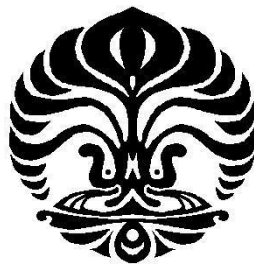


**Studi Kasus Kegagalan Material ASTM A335/P12
dalam Aplikasi *Boiler Steam Pipe***

**Tesis ini diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh
gelar Magister dalam bidang Ilmu Material**

**Haris Effendi
6305002079**



**PROGRAM PASCA SARJANA
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA**

2008

LEMBAR PESETUJUAN

Tesis ini telah diperiksa dan disetujui oleh:

Prof.Dr.Ir. Johny Wahyuadi, DEA
Pembimbing

Dr. Budhy Kurniawan
Penguji

Dr.Azwar Manaf, M.Met
Penguji

Dr.Djoko Triyono, M.Met
Penguji

Dr. Bambang Soegijono
Ketua Program Studi Ilmu Material
Program Pascasarjana
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indonesia

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas penulisan Tesis ini untuk memenuhi syarat gelar Magister Science di Program Pascasarjana Material Science Universitas Indonesia.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi Soedarsono, DEA selaku dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu dengan penuh kesabaran memberikan arahan, bimbingan dan saran dalam penulisan Tesis ini.

Ucapan terimakasih juga penulis sampaikan kepada :

1. Ibunda dan mertua tercinta yang telah memberikan dukungan moril sehingga tesis ini dapat selesai.
2. Isteri tercinta, *Silvia A*, yang telah memberikan dukungan moril dan materiil sehingga tesis ini dapat selesai dan yang telah mengisi relung hatiku selama ini.
3. Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA selaku mantan Ketua Departemen Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan dukungan yang begitu besar kepada penulis untuk dapat menyelesaikan tesis ini.
4. Dr. Bambang Soegijono selaku Ketua Program Pascasarjana Ilmu Material Universitas Indonesia
5. Dr. Azwar Manaf, M.Met selaku Ketua Departemen Fisika Universitas Indonesia
6. Staf Pengajar dan Karyawan Program Pascasarjana Ilmu Material Universitas Indonesia
7. Rekan satu angkatan Material Science.

Dengan keterbatasan ilmu pengetahuan dan pengalaman, penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna sehingga segala kritik dan saran yang bersifat membangun sentiasa penulis harapkan dimasa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat sesuai apa yang diharapkan.

ABSTRAK

Kegagalan komponen boiler yaitu steam pipe pada bagian platen dan pendant tube telah diidentifikasi sebagai kegagalan akibat proses creep. Fenomena ini dapat diketahui melalui bentuk perpatahan, proses deformasi dan waktu yang dibutuhkan dalam terjadinya kegagalan. Kegagalan juga dapat terjadi akibat pengaruh lingkungan, walaupun material yang digunakan telah sesuai untuk aplikasi temperatur tinggi, yaitu baja Cr-Mo.

Proses identifikasi diawali dengan mencari faktor-faktor penyebab terjadinya gagal creep. Pengujian dilakukan terhadap bagian sampel yang representatif yang dapat memberikan informasi tentang karakteristik material. Selain itu dilakukan juga pengujian creep untuk mengetahui perilaku creep material pada temperature operasi, dan dari bentuk kurva ada, diperoleh data-data untuk proses analisis mengenai kegagalan material.

Selanjutnya, dari proses analisis diperoleh kesimpulan bahwa kegagalan pada platen tube terjadi seketika akibat material tidak mampu menahan tekanan yang cukup besar. Perubahan struktur mikro material menjadi penyebab dari kegagalan tersebut. Kehadiran klorida juga mempengaruhi ketahanan material pada temperature operasi, dimana sangat mungkin terjadi hot spot akibat reaksi kimia dengan material sehingga terjadi konsentrasi tegangan. Sedangkan kegagalan pada pendant tube lebih disebabkan pengaruh aliran fluida yang mengakibatkan korosi erosi, hingga munculnya crack tip. Perubahan struktur mikro memberi pengaruh terhadap perilaku creep material dimana terjadi penurunan kekuatan akibat deformasi..

Kata Kunci: *boiler, gagal, creep, temperatur, konsentrasi tegangan, fungsi waktu, korosi.*

ABSTRACT

The failure of boiler component takes place when the steam pipes of the platen part and the pendant tube have been identified as failure due to the creep process. This phenomenon is recognized not only from the broken pieces but also the deformation process and the failure duration. It may occur by the environmental influence despite the appropriate usage of the material suitable for high temperature application, steel Cr-Mo.

The identification process is initialized by searching the factors causing the creep failure. The analysis is conducted to the representative samples giving information on the characteristics of the material. Creep analysis is also conducted to find out the features of its material on the operational temperature. In addition, the curve also provides data on the material failure used for the analysis process.

The analysis process has concluded that the failure of the platen tube instantly occurs due to the inability to hold quite a large pressure, where the changes of micro structure of the material have brought failure. The existence of chloride has also influenced the material resistance towards operational temperature, where hot spot is likely to occur due to the chemical reaction with the material leading to voltage concentration. On the contrary, the failure of the pendant tube is mainly influenced by the flow of the fluid causing the erosion of corrosion leading to crack tip. The changes of micro structure have given influences to the characteristics of the material creep where deformation has lowered its power

Keywords: *Boilers, failure, creep, temperature, stress concentration, time-dependent, corrosion.*

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
BAB I	
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	1
1.3 Batasan Masalah	1
BAB II	
TINJAUAN PUSTAKA	3
II.1 Teori Steam Boiler	3
II.1.1 Konsep Desain Komponen Boiler	5
II.1.2 Dasar Pemilihan Material Boiler	6
II.1.2.1 Pengaruh Paduan pada penguatan Material Baja	10
II.1.2.2 Pengaruh Kondisi Operasi terhadap Perilaku Material	12
II.2 Perilaku Material pada Temperatur Tinggi	13
II.2.1 Fenomena Creep Temperatur Tinggi	13
II.2.2 Korosi Temperatur Tinggi	17
II.2.2.1 Pengaruh Komposisi Material terhadap Korosi Temperatur Tinggi	21
II.2.2.2 Pengendalian Korosi pada Steam Boiler	22
II.3 Kegagalan Material Boiler	23
II.3.1 Mekanisme Kegagalan	25
II.3.2 Metode Investigasi	26
II.4 <i>Prevention dan Control</i>	27
II.4.1 <i>Material Life Assessment</i>	27
II.4.2 <i>Monitoring and Inspection</i>	30
BAB III	
METODE PENELITIAN	32
III.1 Metodologi Umum	32
III.2 Metode Pengambilan Data	33
III.3 Pengujian	34
III.3.1 Uji Komposisi (<i>Spectrometer</i>)	34
III.3.1.1 Mekanisme Pengujian Sampel	34
III.3.2 Uji <i>Electron Dispersive Spectrometer</i> (EDS)	35
III.3.2.1 Mekanisme Pengujian Sampel	35
III.3.3 Uji Mikrostruktur (Metalografi)	36
III.3.3.1 Mekanisme Pengujian Sampel	36

III.3.4	Uji Hardness	37
III.3.4.1	Mekanisme Pengujian Sampel	37
BAB IV	HASIL PENGUJIAN	38
IV.1	Visualisasi Steam Pipe yang mengalami Kegagalan	38
IV.1.1	Bent-Tube	38
IV.1.2	U Bent-Tube	39
IV.2	Hasil Pengujian Komposisi Kimia Material	39
IV.2.1	Komposisi Kimia Material Bent-Tube.	39
IV.2.2	Komposisi Kimia Material U Bent-Tube	40
IV.3	Hasil Pengujian Struktur Mikro	40
IV.3.1	Mikrostruktur Material Bent-Tube	41
IV.3.2	Mikrostruktur Material U Bent-Tube	42
IV.4	Hasil Pengujian Kekerasan	43
BAB V	PEMBAHASAN	44
V.1	Bent-Tube	44
V.1.1	Analisa Fraktografi	44
V.1.2	Mikrostruktur Material	45
V.1.3	Aspek Lingkungan	48
V.1.4	Mekanisme Kegagalan Bent Tube	49
V.2	U Bent-Tube	50
V.2.1	Fraktografi	50
V.2.2	Mikrostruktur Material	51
V.2.3	Aspek Lingkungan	53
V.2.4	Mekanisme Kegagalan	55
BAB VI	KESIMPULAN DAN SARAN	57
VI.1	Kesimpulan	57
VI.2	Saran	57
	DAFTAR PUSTAKA	xi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram komponen boiler (dengan Drum)	4
Gambar 2.2	Diagram hubungan antara tekanan, temperatur, dan volume spesifik pada masing-masing komponen dalam sistem pembangkitan listrik dengan turbin uap	6
Gambar 2.3	Pengaruh kandungan elemen paduan terhadap penguatan solid solution pada baja	11
Gambar 2.4.	Kestabilan kelarutan partikel pada kesetimbangan fasa Fe	11
Gambar 2.5	Plot pengaruh temperatur terhadap allowable stress berdasarkan ASME Boiler and Pressure Vessel Code pada beberapa jenis baja	12
Gambar 2.6	Kurva Creep	14
Gambar 2.7	Ilustrasi kurva creep berdasarkan perbedaan material dengan parameter temperatur dan tegangan	15
Gambar 2.8	Mekanisme creep menurut difusi dan dislokasi	16
Gambar 2.9	Kekuatan creep pada beberapa jenis baja yang digunakan dan dikembangkan hingga saat ini	17
Gambar 2.10	Hubungan konsentrasi klorida terhadap Weight Loss pada baja; konsentrasi di atas titik kritis meningkatkan Weight Loss secara tajam	18
Gambar 2.11	Permasalahan korosi yang terjadi pada boiler	20
Gambar 2.12	Salah satu desain boiler	22
Gambar 2.13	Segher Boiler Prism	23
Gambar 2.14	Perilaku creep material baja berdasarkan evolusi cavity	24
Gambar 2.15	Plot kurva antara waktu dan temperatur hasil teknik ekstrapolasi ...	29
Gambar 2.16	Prediksi kegagalan material melalui distribusi LMP dan tegangan..	30
Gambar 3.1	Metodologi Umum	32
Gambar 3.2	Sampel Bent Tube yang mengalami failure	33
Gambar 3.3	Sampel U-Bent Tube yang mengalami failure	33
Gambar 3.4	Alat Pengujian Spectro	34
Gambar 3.5	Alat Pengujian EDS	35
Gambar 3.6	Alat Pengujian Metalografi	36

Gambar 3.7	Alat Pengujian Kekerasan (Hardness)	37
Gambar 4.1	Bent-Tube yang mengalami kegagalan	38
Gambar 4.2	U Bent-Tube yang mengalami kegagalan	39
Gambar 4.3	Hasil uji Spektro Material Bent-Tube	39
Gambar 4.4	Hasil uji Spektro Material U Bent-Tube	40
Gambar 4.5	Foto Mikrostruktur material Bent-Tube (Perbesaran 100x)	41
Gambar 4.6	Foto Mikrostruktur material Bent-Tube (Perbesaran 500x)	41
Gambar 4.7	Foto Mikrostruktur material U Bent-Tube (Perbesaran 100x)	42
Gambar 4.8	Foto Mikrostruktur material U Bent-Tube (Perbesaran 500x)	42
Gambar 5.1	Bagian Bent-Tube yang mengalami kegagalan (Perbesaran 100x) .	44
Gambar 5.2	Foto Mikrostruktur material Bent-Tube (Perbesaran 500x) A. Bagian yang mengalami kegagalan, B. Bagian yang utuh	46
Gambar 5.3	Posisi pengujian kekerasan pada material Bent Tube	47
Gambar 5.4	Hasil Pengujian EDS pada bagian yang mengalami kegagalan	48
Gambar 5.5	Kegagalan yang terjadi pada Material U Bent Tube	50
Gambar 5.6	Foto Mikrostruktur (Perbesaran 100x) kegagalan yang terjadi pada material U Bent-Tube	51
Gambar 5.7	Foto Mikrostruktur material steam pipe B (Perbesaran 500x) A. Bagian yang mengalami kegagalan. B. Bagian yang utuh	52
Gambar 5.8	Serangan korosi Batas Butir pada material U Bent-Tube (Perbesaran 100x)	54
Gambar 5.9	Penipisan yang terjadi pada material U Bent-Tube, terjadi pola aliran erosi pada dinding atas pipa	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pemilihan material untuk komponen pada PLTGU, dengan kriteria tertentu	7
Tabel 2.2	Komposisi Material yang digunakan pada komponen Boiler	8
Tabel 2.3	Pengaruh beberapa elemen pada baja terhadap ketahanan jenis korosi tertentu pada temperatur tinggi	9
Tabel 4.1	Komposisi Material Standar Baja Cr-Mo	40
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Kekerasan	43
Tabel 5.1	Hasil Pengujian Kekerasan material steam pipe A	46
Tabel 5.2	Nilai kekerasan pada material steam pipe B	51

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Pada salah satu unit boiler di Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) Priok, terjadi kegagalan berupa *leakage* dan *cracking* pada steam pipe dalam pengoperasiannya pada temperatur tinggi. Dalam hal ini investigasi dan identifikasi dilakukan dalam mendapatkan informasi untuk mencari penyebab kegagalan. Pengumpulan data mengenai material, kondisi operasi, dan aspek lingkungan menjadi parameter dalam metodologi pengujian yang dilakukan. Pendekatan analisis berupa perilaku material pada temperatur tinggi dapat menjadi pokok bahasan yang digunakan untuk mencari penyebab permasalahan.

Pada prinsipnya penanganan masalah yang sering terjadi pada bagian peralatan di PLTGU dapat dilakukan melalui pendeteksian secara dini pada keseluruhan sistem pembangkit listrik. Program monitoring dan inspeksi terhadap unit – unit peralatan secara berkala sangat diperlukan dalam rangka mencegah terjadinya *trouble* yang sama di waktu yang akan datang.

I.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari dan menentukan penyebab terjadinya kegagalan pada steam pipe yang disimpulkan melalui pengamatan terhadap struktur mikro, komposisi kimia material, karakteristik fisik dan mekanis terkait dengan kondisi operasional.

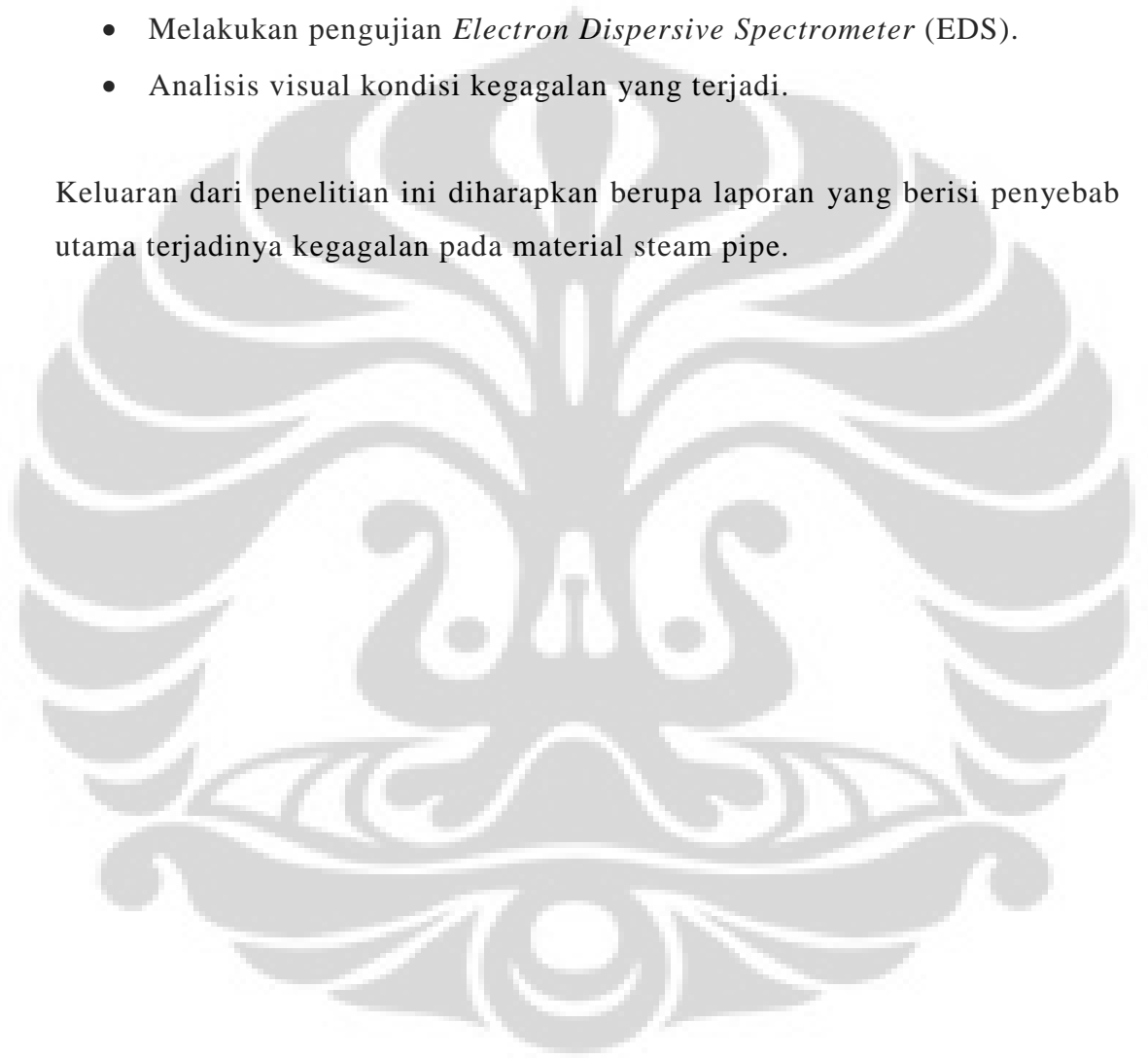
I.4. Batasan Masalah

Dalam menentukan penyebab terjadinya kegagalan, diterapkan suatu

metodologi analisis terpadu melalui pengujian-pengujian di dalam Laboratorium. Secara garis besar ruang lingkup penelitian adalah sebagai berikut :

- Melakukan uji metalografi / mikrostruktur sampel material.
- Melakukan analisis komposisi kimia material.
- Melakukan uji kekerasan material.
- Melakukan pengujian *Electron Dispersive Spectrometer* (EDS).
- Analisis visual kondisi kegagalan yang terjadi.

Keluaran dari penelitian ini diharapkan berupa laporan yang berisi penyebab utama terjadinya kegagalan pada material steam pipe.



BAB II

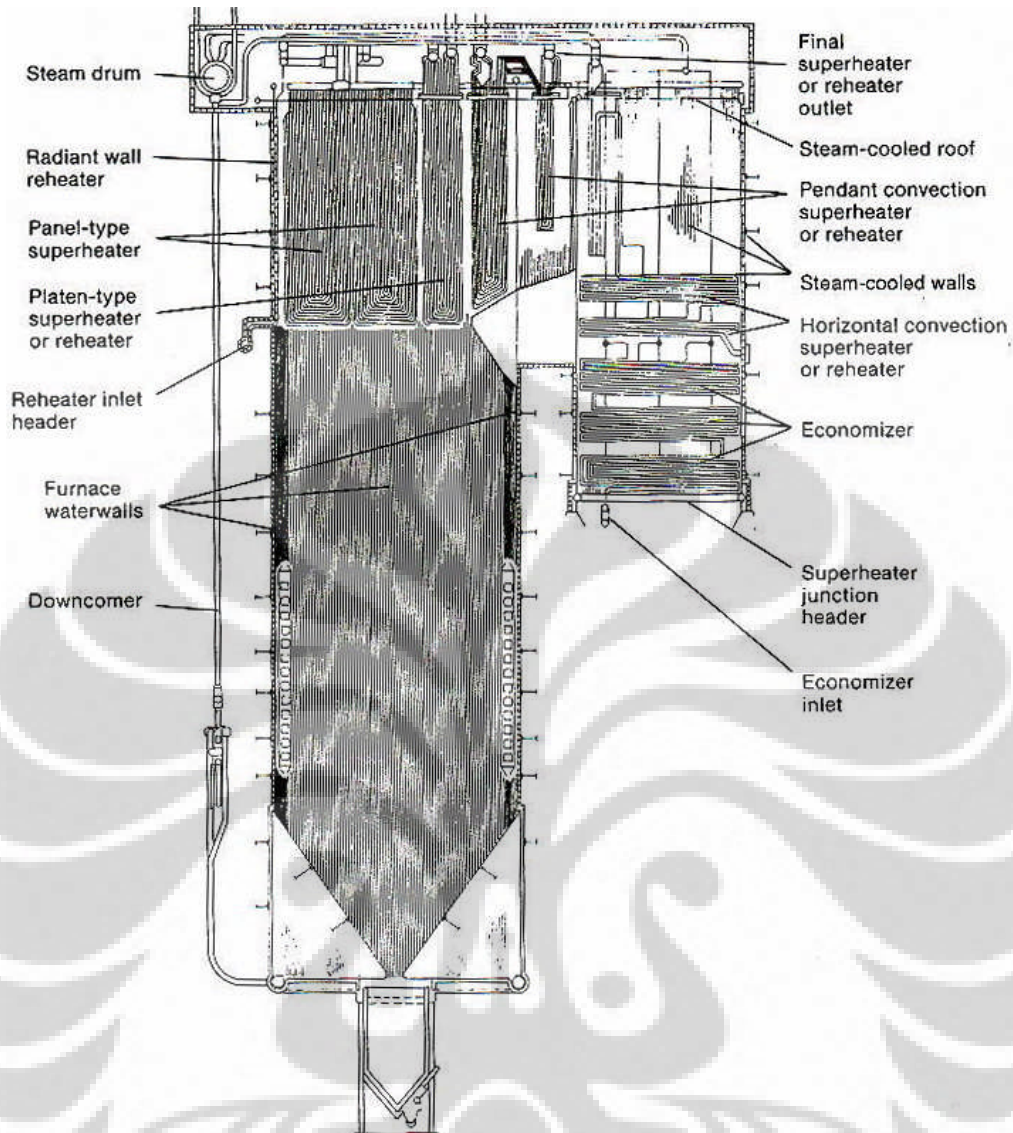
TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Teori Steam Boiler

Perkembangan teknologi pembangkit listrik dalam aplikasi temperatur tinggi utamanya mulai dilakukan pada awal abad 20. Munculnya inovasi dalam konversi energi, seperti pada steam turbin, dan lain-lain membawa kemajuan dalam bidang teknologi bagi masyarakat modern saat ini. Terutama perkembangan teknologi material untuk komponen seperti steam boiler, yang berkaitan langsung dengan perkembangan industri pembangkitan listrik.

Pada sistem pembangkitan listrik, fungsi utama dari steam boiler adalah mengubah air menjadi uap panas (superheated) sebagai penggerak turbin yang disebut turbin uap (steam turbine). Proses yang terjadi di dalam boiler merupakan sebuah siklus tertutup dengan media utama air dan uap panas. Pada salah satu komponen boiler, terdapat steam pipe yang berfungsi untuk mengalirkan uap panas hasil proses evaporasi. Uap panas ini juga dapat berasal dari turbin, sebagai bagian dari siklus generatif Rankine, yang dialirkan dengan bertekanan. Secara skematis, Gambar.2.1 mengilustrasikan diagram masing-masing komponen boiler.

Berdasarkan siklus kerjanya, boiler dapat dibagi menjadi dua klasifikasi yaitu: once-through boiler dan drum boiler. Pada jenis once-through (satu kali proses) tekanan operasi yang digunakan dapat mencapai 24 Mpa (3500 psi). Sedangkan pada drum boiler, tekanan operasi berkisar pada 16,6 Mpa (2400 psi). Namun rata-rata steam boiler beroperasi pada tekanan kritis 22,12 Mpa (3208 psi). Dengan kondisi panas bertekanan tersebut, temperatur operasi boiler bisa mencapai 1100 °F (593 °C).



Gambar 2.1 Diagram komponen boiler (dengan Drum)¹⁹

Proses yang terjadi pada once-through boiler mengubah air menjadi uap panas secara keseluruhan, sehingga sangat rentan terhadap kontaminan yang mungkin ikut dalam air. Kontaminan ini dapat menyebabkan terjadinya korosi ataupun overheating karena sifatnya yang tidak mudah menguap (non-volatile). Pengaruh kontaminan ini dapat dikurangi dengan penggunaan kondenser. Pada drum boiler, hanya sebagian air yang diubah menjadi uap panas, dimana sisanya dipisahkan ke dalam drum untuk disirkulasikan kembali menjadi uap panas. Penanganan terhadap kontaminan pada jenis ini dapat dilakukan dengan mudah karena air dapat langsung dibuang melalui blowdown.

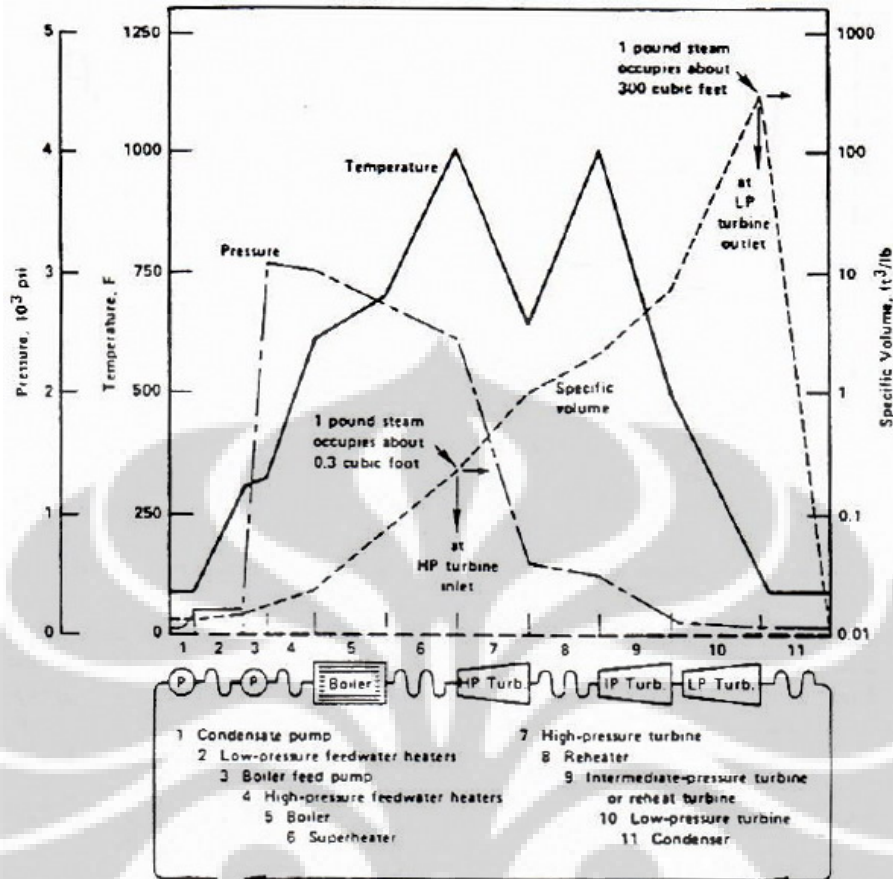
II.1.1 Konsep Desain Komponen Boiler

Setiap komponen dalam pengoperasiannya berada pada kondisi lingkungan, tekanan, dan temperatur yang berbeda-beda, sehingga diperlukan konsep untuk menentukan desain baik untuk material maupun konstruksi seperti pada sistem pembangkit listrik. Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam metodologi desain komponen untuk operasi temperatur tinggi,⁴ yaitu:

- Instabilitas plastis pada temperatur tinggi
- Creep sebagai mekanisme deformasi dan komponen regangan
- Ketergantungan temperatur dan tegangan
- Perpatahan pada temperatur tinggi
- Aspek atau pengaruh lingkungan

Yang menjadi hal utama dalam proses desain suatu komponen untuk aplikasi temperatur tinggi adalah perilaku creep material dimana faktor-faktor dalam fase terjadinya creep menjadi perhatian, yaitu primary creep, steady-state creep, yang merupakan perilaku deformasi yang bergantung pada temperatur dan tegangan. Pendekatan yang dilakukan adalah dengan observasi terhadap kondisi mikrostruktur dan kondisi mekanis material pada temperatur tinggi, dimana dapat diketahui interaksi antara proses pengerasan akibat deformasi dengan proses recovery atau softening yang dicapai pada kondisi primary dan steady state creep.

Desain suatu komponen di dalam pembangkitan listrik ditentukan menurut kebutuhan kondisi proses pada masing-masing komponen. Beberapa parameter yang saling berkaitan pada proses yang terjadi di dalam sistem pembangkitan listrik, digambarkan dalam bentuk seperti pada Gambar 2.2. Berdasarkan diagram tersebut, ditunjukkan bahwa masing-masing komponen dapat memiliki kebutuhan material yang bervariasi menurut kondisi lokal prosesnya.



Gambar 2.2 Diagram hubungan antara tekanan, temperatur, dan volume spesifik pada masing-masing komponen dalam sistem pembangkitan listrik dengan turbin uap¹⁹

II.1.2 Dasar Pemilihan Material Boiler

Semua jenis komponen dalam aplikasi temperatur tinggi biasanya menggunakan logam dan paduannya sebagai bahan material utama dimana yang menjadi perhatian dalam proses desain adalah mekanisme deformasi dan perpatahan yang kemungkinan terjadi selama pengoperasian pada temperatur tinggi. Durabilitas atau daya tahan material terhadap temperatur tinggi sangat bergantung dari kemampuannya dalam mempertahankan bentuk dan sifatnya. Dalam hal ini, besaran yang didapat pada temperatur ruang tidak dapat diaplikasikan, walaupun mekanisme perpatahan pada temperatur tersebut dapat digunakan untuk kondisi tertentu. Di samping kompleksitas fenomena perilaku pada temperatur tinggi dimana bergantung dalam fungsi waktu, terdapat sinergi yang berkaitan dengan aspek lingkungan dimana

interaksi material dengan gas dapat menjadi penyebab utama terjadinya perpatahan pada temperatur tinggi.

Pemilihan material juga harus memperhatikan integritas masing-masing komponen terhadap sistem dengan kriteria-kriteria tertentu, terutama ketahanan pada temperatur tinggi. Tabel 2.1 memperlihatkan jenis-jenis material yang digunakan dalam pembangkitan listrik tenaga gas uap (PLTGU).

Tabel 2.1 Pemilihan material untuk komponen pada PLTGU, dengan kriteria tertentu¹⁹

Component	Major property requirements	Typical materials
Boiler		
Waterwall tubes	Tensile strength, corrosion resistance, weldability	C and C-Mo steels
Drum	Tensile strength, corrosion resistance, weldability, corrosion-fatigue strength	C, C-Mo, and C-Mn steels
Headers	Tensile strength, weldability, creep strength	C, C-Mo, C-Mn, and Cr-Mo steels
Superheater/reheater tubes	Weldability, creep strength, oxidation resistance, low coefficient of thermal expansion	Cr-Mo steels; austenitic stainless steels
Steam pipe	Same as above	Same as above
Turbine		
HP-IP rotors/disks	Creep strength, corrosion resistance, thermal-fatigue strength, toughness	Cr-Mo-V steels
LP rotors/disks	Toughness, stress-corrosion resistance, fatigue strength	Ni-Cr-Mo-V steels
HP-IP blading	Creep strength, fatigue strength, corrosion and oxidation resistance	12% Cr steels
LP blading	Fatigue strength, corrosion-fatigue pitting resistance	12% Cr steels; 17-4 PH stainless steel; Ti-6Al-4V
Inner casings, steam chests, valves	Creep strength, thermal-fatigue strength, toughness, yield strength	Cr-Mo steels
Bolts	Proof stress, creep strength, stress-relaxation resistance, toughness, notch ductility	Cr-Mo-V and 12Cr-Mo-V steels
Generators		
Rotor	Yield strength, toughness, fatigue strength, magnetic permeability	Ni-Cr-Mo-V steels
Retaining rings	High yield strength, hydrogen- and stress-corrosion resistance, nonmagnetic	18Mn-5Cr and 18Mn-18Cr steels
Condensers		
Condensers	Corrosion and erosion resistance	Cupronickels; titanium; brass; stainless steels

Secara spesifik jenis material yang dapat digunakan untuk komponen-komponen boiler menurut fungsi kerja masing-masing ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Komposisi Material yang digunakan pada komponen Boiler

Alloy	ASME or ASTM specification	Grade	Minimum tensile strength, ksi	Minimum yield strength, ksi	Composition(a), %																	
					C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mn										
Carbon steels																						
Low strength	SA-192	...	(47)	(26)	0.06-0.18	0.27-0.63	0.048	0.058	0.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-178 A	...	...	...	0.06-0.18	0.27-0.63	0.050	0.060	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-226	...	(47)	(26)	0.06-0.18	0.27-0.68	0.050	0.060	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Intermediate strength	SA-210 A-1	...	60	37	0.27	0.93	0.048	0.058	0.10 Min	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-178 C	...	60	37	0.35	0.30	0.050	0.060	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-106 B	...	60	35	0.30	0.29-1.06	0.048	0.058	0.10 Min	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-216 WCA	...	60	30	0.25	0.70	0.040	0.045	0.60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	A36	...	58	36	0.26	...	0.040	0.05	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
High strength	SA-106 C	...	70	40	0.35	0.29-1.06	0.048	0.058	0.10 Min	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-299	...	75	40	0.30	0.86-1.55	0.035	0.040	0.13-0.33	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-515 70	...	70	38	0.35	0.90	0.035	0.04	0.13-0.33	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-105	...	70	36	0.35	0.60-1.05	0.040	0.050	0.35	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-216 WCB	...	70	36	0.30	1.00	0.040	0.045	0.60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Ferritic alloys																						
C-0.5Mo	SA-209	T1	55	30	0.10-0.20	0.30-0.80	0.045	0.045	0.10-0.50	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-336	F12	70	40	0.10-0.20	0.30-0.80	0.040	0.040	0.10-0.60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1Cr-1/2Mo	SA-213 T12	...	60	30	0.15	0.30-0.61	0.045	0.045	0.50	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-333 P12	...	60	30	0.15	0.30-0.61	0.045	0.045	0.50	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-387 12C12	...	65	40	0.17	0.36-0.69	0.035	0.040	0.13-0.32	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-182 F12	...	70	40	0.10-0.20	0.30-0.80	0.040	0.040	0.10-0.60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-213 T11	...	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50-1.00	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1.25Cr-0.5Mo	SA-335 P11	...	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50-1.00	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-387 11C12	...	75	45	0.17	0.36-0.69	0.035	0.040	0.44-0.86	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-182 P11	...	70	40	0.10-0.20	0.30-0.80	0.040	0.040	0.50-1.00	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-217 WC6	...	70	40	0.20	0.50-0.80	0.040	0.045	0.60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SA-217 WC6	...	70	40	0.20	0.50-0.80	0.040	0.045	0.60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tabel 2.2 (lanjutan)

2.25Cr-1Mo	SA-213	T22	60	30	0.15	0.30-0.60	0.010	0.030	0.50	...	1.90-2.60	0.87-1.13
	SA-315	P22	60	30	0.15	0.30-0.60	0.010	0.030	0.50	...	1.90-2.60	0.87-1.13
	SA-387	22Cr1	60(0)	30(c)	0.17	0.27-0.63	0.015	0.035	0.50	...	1.88-2.62	0.85-1.15
	SA-387	C12	75(0)	45(d)	0.15	0.30-0.60	0.040	0.040	0.50	...	2.00-2.50	0.87-1.13
	SA-182	F12	75	45	0.18	0.40-0.70	0.040	0.045	0.60	...	2.00-2.75	0.90-1.20
5Cr-0.5Mo	SA-213	75	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50	...	4.00-6.00	0.45-0.65
	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
Austenitic stainless alloys												
18Cr-8Ni	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	...
	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	...
	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	...
	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	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	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	...
	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
16Cr-12Ni-2Mo	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
	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	...
	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
	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	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 + Ti not less than eight times carbon content and not more than 1.00%.

II.1.2.1 Pengaruh Paduan pada penguatan Material Baja

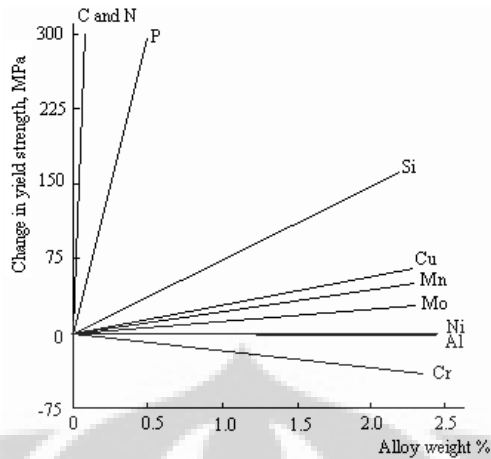
Penambahan paduan seperti kromium, molybdenum, tungsten, dll dapat meningkatkan sifat-sifat mekanis seperti kekerasan, kekuatan dan ketangguhan pada baja. Untuk aplikasi temperatur tinggi, kriteria yang dibutuhkan diantaranya ketahanan creep, dan ketahanan terhadap korosi.

Kunci dalam meningkatkan ketahanan creep adalah dengan meningkatkan ketahanan butir dan batas butir dalam bermigrasi, dan dalam waktu bersamaan menghindari proses recovery, ataupun proses softening lainnya. Pada perilaku creep, dislokasi terjadi dalam bentuk aliran material dimana pada baja, metode dalam menahan dislokasi pada suatu material bisa dilakukan dengan penguatan solid solution dan penguatan presipitasi.

Secara umum material konstruksi untuk boiler dan komponen-komponennya didominasi oleh baja paduan ringan, terutama yang mengandung sejumlah elemen Mo, V, dan Cr yang berperan dalam penguatan solid solution dan pembentukan presipitat dalam penguatan presipitasi.

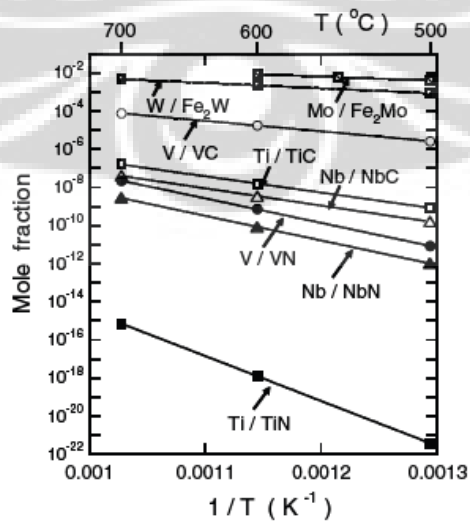
Penguatan solid solution terjadi melalui penambahan elemen paduan seperti kromium (Cr), molibdenum (Mo), vanadium (V), nikel (Ni), dll, yang mampu menahan dislokasi dengan metode cluster. Penambahan kandungan paduan menjadi diminati dalam meningkatkan kekuatan creep. Sebagai contoh, pada jenis-jenis baja dengan kandungan paduan, karbon, 0.5Cr, 0.5Cr-0.5Mo, 1.25Cr-0.5Mo, dan 2.25Cr-1Mo, berturut-turut kekuatan creep meningkat secara progresif¹⁹. Pengaruh kandungan paduan ditunjukkan dalam Gambar 2.3.

Elemen paduan juga dapat membentuk partikel karbida dalam penguatan presipitasi, dan mampu menahan dislokasi dalam mekanisme pengerasan presipitasi (precipitation hardening). Elemen pembentuk karbida yang stabil diantaranya, Cr, Mo, V, dan Nb, yang meningkat secara berurutan.



Gambar 2.3 Pengaruh kandungan elemen paduan terhadap penguatan solid solution pada baja¹⁹

Mekanisme penguatan seperti disebutkan di atas biasanya menjadi tidak stabil pada temperatur yang lebih tinggi. Karena itu kekuatan creep material menjadi terbatas pada temperatur operasi yang dipersyaratkan sesuai dengan kestabilan material. Menurut Abe,² kestabilan ketahanan creep dapat ditingkatkan melalui pembentukan partikel yang stabil, sehingga memiliki waktu tahan yang lebih lama. Penambahan B dan pengurangan kandungan C pada baja adalah salah satu cara yang dapat diterapkan. Dengan mengurangi kadar C, partikel akan mempromosikan N dalam pembentukan karbinitrida dimana memiliki karakteristik lebih halus dan homogen, serta stabil. Pada Gambar 2.4 berikut ini memperlihatkan kestabilan partikel presipitat di dalam fasa Fe pada temperatur tinggi, menurut penelitian Abe.



Gambar 2.4. Kestabilan kelarutan partikel pada kesetimbangan fasa Fe²

II.1.2.2 Pengaruh Kondisi Operasi terhadap Perilaku Material

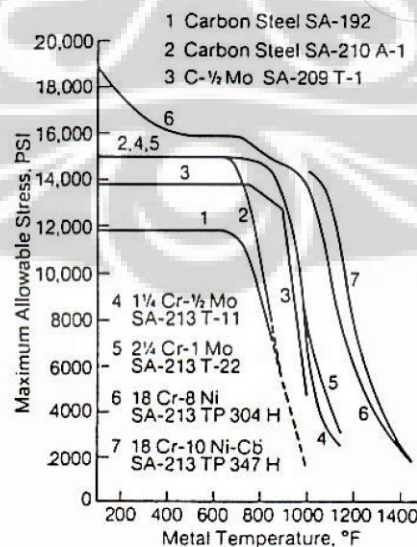
Allowable Stress

Proses desain komponen menggunakan acuan mengenai allowable stress pada temperatur tinggi yang biasanya dipakai dalam analisis pengaruh temperatur terhadap sifat-sifat material yang aktual. Dalam hal ini perlu diketahui pengaruh kondisi operasi berupa tekanan (internal pressure) terhadap komponen dimana pada steam pipe, dinding material dapat mengalami tekanan yang berbeda-beda yang menimbulkan tegangan – hoop stress. Perhitungan hoop stress (σ_h) berdasarkan tekanan dapat dirumuskan melalui persamaan:

$$\sigma_h = Pr/t$$

dimana : P adalah tekanan, r adalah radius pipa, dan t adalah ketebalan dinding.

Batasan-batasan parameter dalam menentukan allowable stress mengacu pada standard ASME Bolier and Pressure Vessel Code, Section-1, dimana plot mengenai hubungan antara temperatur dengan allowable stress diperlihatkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Plot pengaruh temperatur terhadap allowable stress berdasarkan ASME Boiler and Pressure Vessel Code pada beberapa jenis baja¹⁹

II.2 Perilaku Material pada Temperatur Tinggi

II.2.1 Fenomena Creep Temperatur Tinggi

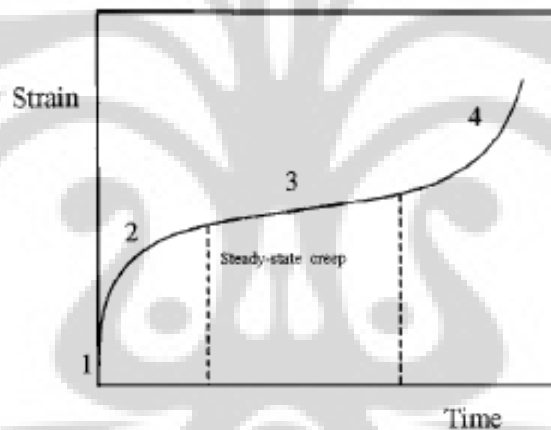
Salah satu faktor penting dalam menentukan integritas komponen dalam suatu sistem pada aplikasi temperatur tinggi adalah perilaku creep. Pada proses termal, suatu material yang mengalami deformasi secara lambat dan kontinyu dalam fungsi waktu dengan beban atau tegangan konstan, hingga patah, maka perilaku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

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

Perilaku creep suatu material dapat diketahui melalui pengujian terhadap suatu spesimen yang diberikan pembebanan atau tegangan konstan yang menghasilkan besaran regangan dalam fungsi waktu. Bentuk kurva yang dihasilkan memiliki karakteristik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Kurva creep terdiri dari fase-fase yang menunjukkan perilaku material pada kondisi temperatur tinggi, yaitu:

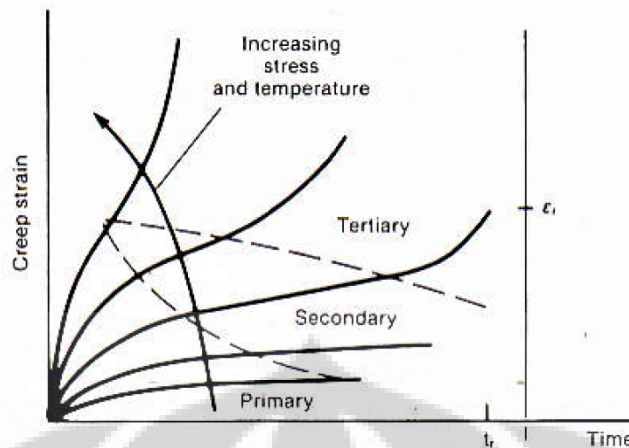
- fase primary, dimana regangan meningkat dengan laju yang lambat,
- fase secondary (steady state), dimana regangan bergerak dengan laju konstan,
- fase tertiary, regangan bergerak dengan laju dipercepat hingga akhirnya patah
- regangan saat patah disebut juga rupture ductility

Penjelasan mengenai fase-fase dari creep merupakan fenomena mekanis material yang umumnya terjadi apabila diberikan pembebanan, dimana (a) terjadi pengerasan regang pada fase primary, (b) dilanjutkan dengan softening pada fase secondary (steady-state), seperti proses recovery, rekristalisasi, strain softening, penuaan presipitasi (precipitation overaging), dan (c) mulai timbulnya cacat pada fase tertiary, seperti cavity, cracking, dan juga necking. Dalam hal ini, faktor pada fase (a) cenderung untuk menurunkan laju creep, sementara fase lain cenderung menaikkan. Interaksi kesetimbangan diantara fase-fase tersebut akan menentukan bentuk kurva creep, dan demikian dapat diketahui karakteristik material pada temperatur tinggi.



Gambar 2.6 Kurva Creep⁹

Pada prinsipnya semakin tinggi kekuatan creep suatu material, maka semakin rendah keuletannya. Material yang ulet atau ductile memiliki daerah secondary yang lebih lebar pada kurva creep, dan waktu perpatahan lebih pendek. Sementara material getas atau brittle yang didefinisikan dengan kekuatan creep tinggi, laju creep pada daerah secondary yang lebih sempit, dan perpatahan yang terjadi seketika dengan keuletan rendah. Gambar 2.7 memperlihatkan bentuk kurva creep yang dipengaruhi jenis material, temperatur dan tegangan.



Gambar 2.7 Ilustrasi kurva creep berdasarkan perbedaan material dengan parameter temperatur dan tegangan¹⁹

Dari Gambar 2.7 juga diperlihatkan pengaruh perubahan temperatur dan tegangan. Kenaikan temperatur dan tegangan memperpendek fase primary dari kurva creep, serta menghilangkan fase secondary, yang berarti laju creep terus meningkat sejak awal hingga patah. Sebaliknya, penurunan temperatur dan tegangan menghasilkan kurva dengan semua fase yang ada, dan total elongasi yang terjadi menjadi lebih kecil.

Laju creep didefinisikan dalam fungsi tegangan (σ), dan temperatur (T) menurut persamaan Arrhenius, melalui pengujian dengan pembebanan ataupun tegangan yang konstan. Persamaan juga mencakup juga aktivasi energi (Q) yang didapat berdasarkan teori laju reaksi kimia dengan perumusan:⁴

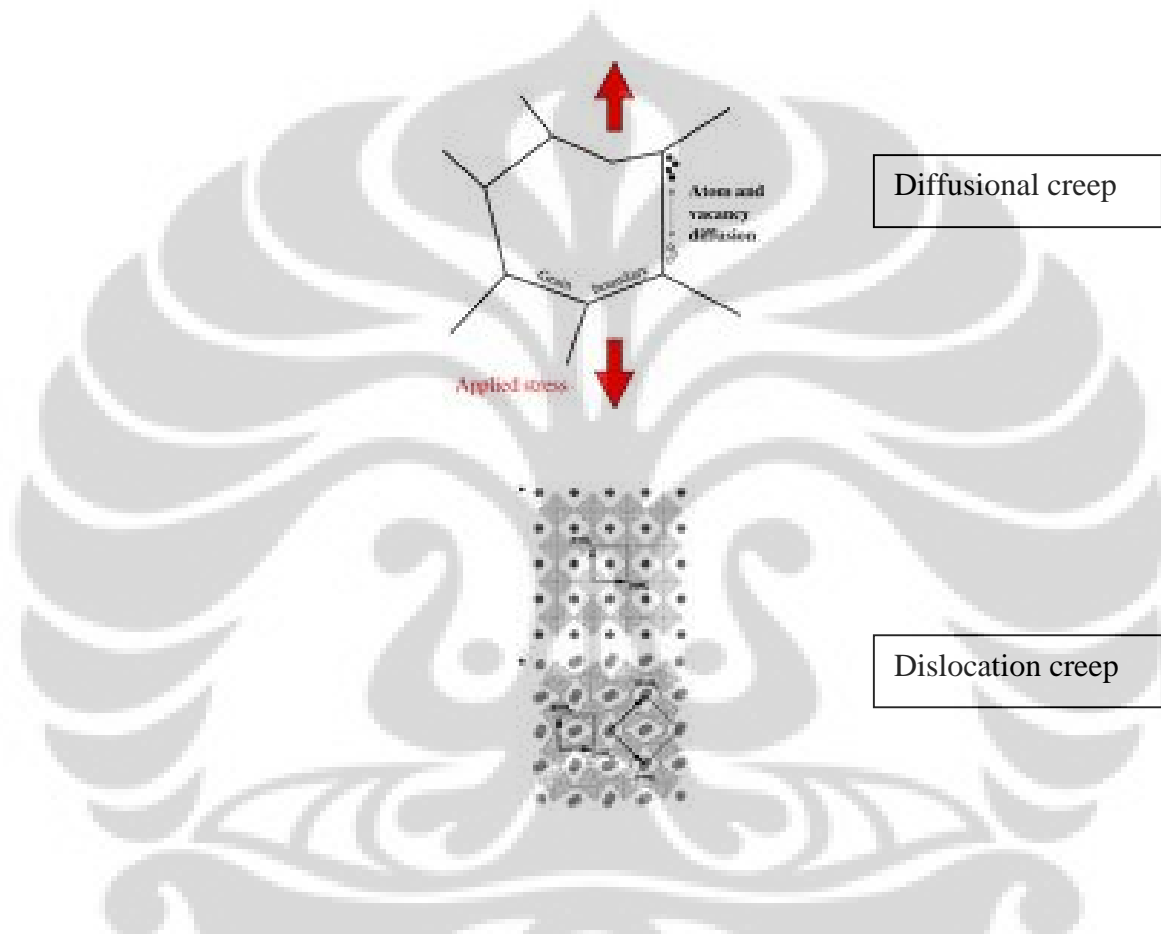
$$\dot{\epsilon} = S\sigma^n \exp(Q/RT)$$

dimana:

S adalah konstanta, yang tergantung dari kondisi struktur mikro.

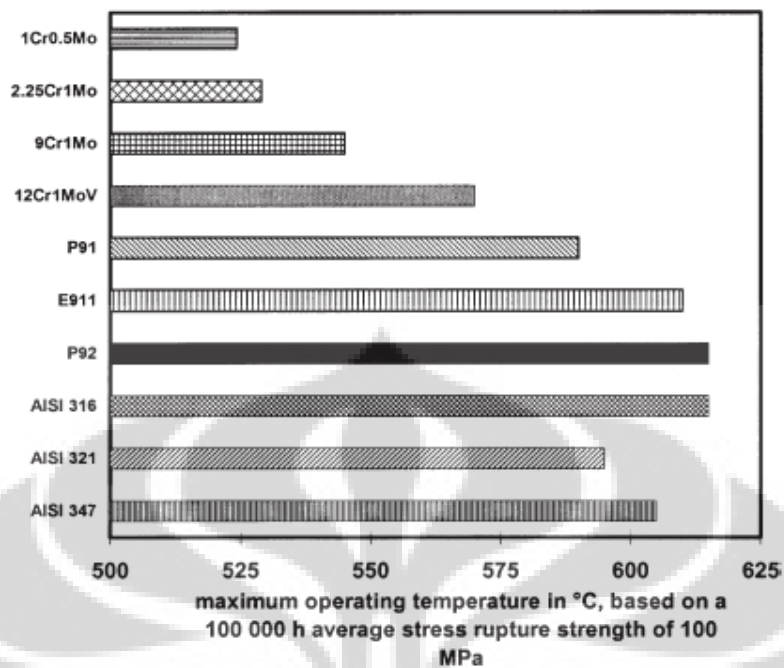
Karakterisasi creep dapat didefinisikan sebagai mekanisme deformasi ataupun komponen regangan. Dalam mekanisme deformasi, proses creep yang terjadi pada logam merupakan hasil dari pergerakan dislokasi. Namun berbeda pada kondisi biasa, dimana pergerakan dislokasi tidak tergantung terhadap waktu dan akan terhambat dengan kehadiran partikel endapan

ataupun lainnya. Pergerakan dislokasi pada creep tidak terhalang oleh adanya presipitat. Pada kondisi steady state, terjadi kesetimbangan antara strain hardening dan recovery dimana interaksi dislokasi terjadi. Mekanisme terjadinya creep ditunjukkan dalam Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Mekanisme creep menurut difusi dan dislokasi¹⁹

Perkembangan material dengan ketahanan creep umumnya dilihat pada efisiensi termal yang terjadi pada proses, dimana efisiensi tinggi dapat dicapai dengan menaikkan temperatur dan tekanan operasi, sehingga diperlukan material yang memiliki ketahanan creep pada temperatur yang lebih tinggi⁶. Pemakaian material dengan grade lebih tinggi dapat memiliki ketahanan creep yang lebih baik pada temperatur yang lebih tinggi. Dalam Gambar 2.9 ditunjukkan kekuatan creep (rupture) dari beberapa grade material baja terhadap temperatur.



Gambar 2.9 Kekuatan creep pada beberapa jenis baja yang digunakan dan dikembangkan hingga saat ini⁶

II.2.2 Korosi Temperatur Tinggi

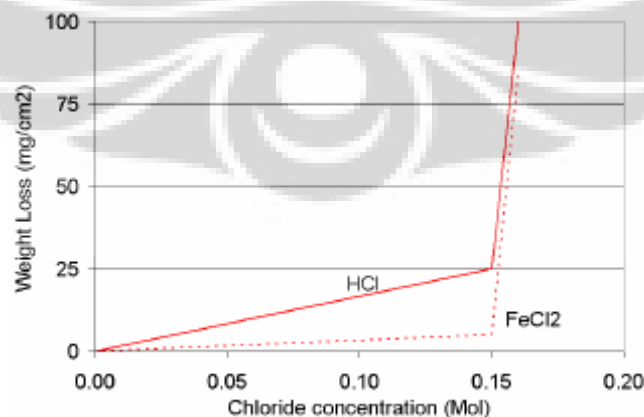
Korosi adalah salah satu faktor yang menjadi penyebab terjadinya penghentian atau shutdown suatu operasi dalam suatu fasilitas industri, yang juga dapat terjadi dalam sistem steam turbine. Pemeliharaan terhadap material akibat korosi membutuhkan biaya besar yang dapat menjadi permasalahan utama, dimana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

Secara spesifik, Huijbregts dan Leferink⁸ mendefinisikan beberapa jenis korosi yang terjadi pada temperatur tinggi berupa:

1. SICC (Strain Induced Corrosion Cracking)
2. Korosi akibat kondisi heat-flux

3. Korosi Erosi akibat wet steam (uap basah)
4. SCC (Stress Corrosion Cracking)

1. Proses korosi pada SICCR dipengaruhi oleh regangan oleh deformasi creep akibat rendahnya ketahanan material terhadap temperatur tinggi. Perubahan struktur mikro terutama akibat proses creep menjadi penyebab utama jenis korosi ini. Model dalam menjelaskan proses yang terjadi yaitu: anodic dissolution dan hydrogen embrittlement, yang dapat terjadi secara berkesinambungan. Umumnya proses korosi ini terjadi secara lokal pada daerah-daerah tertentu, seperti pit, retakan kecil, atau daerah lasan.
2. Proses korosi akibat kondisi heat-flux dipengaruhi oleh pembentukan deposit karena proses oksidasi (metal oxide), dimana air yang melewati lapisan porous oksida tersebut akan terjebak, dan membuat pemanasan lokal (local boiling). Proses boiling ini mengakibatkan pembentukan deposit sulfat atau silikat yang menaikkan temperatur permukaan logam. Dengan kehadiran klorida yang bisa berasal dari bocornya kondenser atau lainnya, akan membentuk lapisan korosi akibat reaksi dengan logam. Peningkatan konsentrasi klorida dapat meningkatkan terjadinya weight loss secara signifikan, dimana akan berpengaruh pada terjadinya kegagalan akibat korosi. Gambar 2.10 memperlihatkan hubungan konsentrasi klorida dan pengaruhnya terhadap weight loss.



Gambar 2.10 Hubungan konsentrasi klorida terhadap Weight Loss pada baja; konsentrasi di atas titik kritis meningkatkan Weight Loss secara tajam⁸.

3. Korosi Erosi terjadi akibat kondisi tekanan seperti pada wet steam dimana aliran fluida mengakibatkan weight loss. Ketahanan material menjadi faktor penting dalam mencegah terjadinya korosi erosi ini. Penambahan elemen seperti Cr dapat meningkatkan kemampuan material terhadap proses korosi erosi. Huijbregts dan Leferink merumuskan Cr-equivalent dalam komposisi material, untuk ketahanan korosi erosi, dengan perumusan:

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

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

Pada steam boiler, berbagai jenis korosi dapat terjadi akibat pengaruh kondisi operasi dan pemilihan material. Kandungan fluida gas dan kondisi lingkungan lain juga menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan penyebab terjadinya korosi, dan faktor-faktor tersebut disimpulkan oleh Lee¹⁵ dalam beberapa hal yaitu:

1. Kontaminasi klorida dari gas ataupun air

Munculnya klorida dapat disebabkan air atau fluida gas yang terkontaminasi, dimana reaksi kimia terjadi terhadap material pada dinding permukaan.

2. Temperatur permukaan

Tingginya temperatur permukaan yang disebabkan oleh radiasi akibat pembentukan deposit metal klorida dapat meningkatkan laju korosi.

3. Temperatur gas

Perbedaan temperatur ΔT antara gas dan permukaan logam dapat

menyebabkan terjadinya kondensasi dari kontaminan seperti metal klorida yang mengendap di dinding tube. Semakin besar ΔT maka laju pengendapan semakin tinggi, dan konsentrasi klorida meningkat sementara titik lebur deposit menurun.

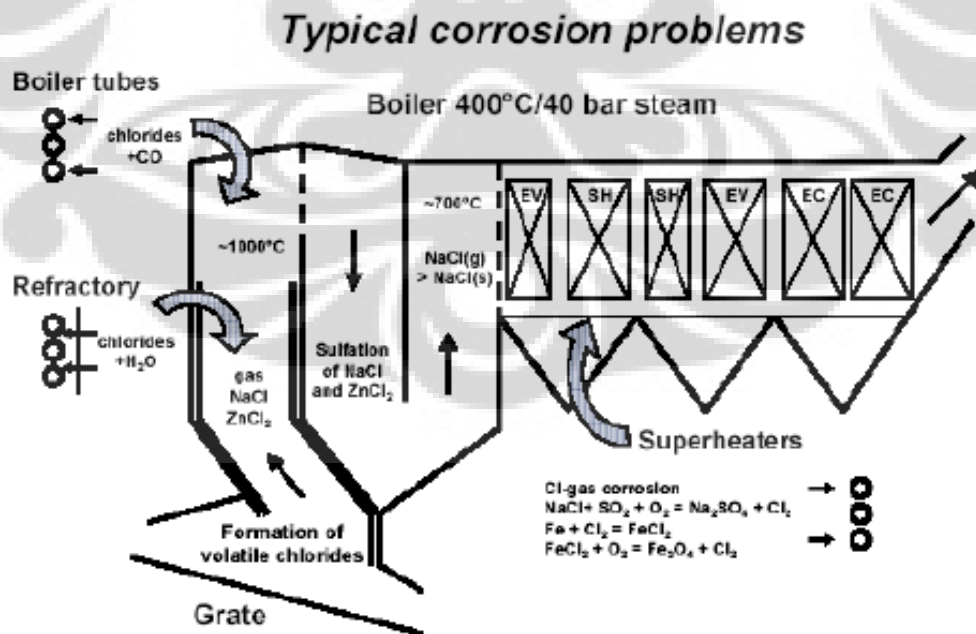
4. Fluktuasi temperatur

Komposisi bahan bakar sisa yang tidak homogen dan tidak meratanya profil temperatur gas pembakaran dapat menyebabkan fluktuasi temperatur, dimana meningkatkan laju korosi.

5. Scaling deposition

Semakin tebal deposit, laju korosi semakin tinggi. Dengan hadirnya gas korosif, mempengaruhi karakteristik sifat mekanis dari deposit seperti permeabilitasnya.

Secara skematis, Gambar 2.11 menunjukkan permasalahan korosi yang terjadi pada steam boiler.



Gambar 2.11 Permasalahan korosi yang terjadi pada boiler¹⁵

II.2.2.1 Pengaruh Komposisi Material terhadap Korosi Temperatur Tinggi

Komposisi material terutama baja seringkali menjadi faktor yang menentukan ketahanan korosi suatu material, terutama pada baja. Pada komponen steam boiler, kegagalan yang terjadi yang disebabkan ketahanan korosi yang buruk, umumnya akibat pemilihan material yang tidak tepat. Sehingga adanya kebocoran (leakage) atau ledakan (explosion) pada suatu boiler biasa terjadi sebagai akibat kelalaian tersebut⁸. Hal ini kemudian mulai menjadi perhatian dalam konsep desain modern untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan oleh korosi ini.

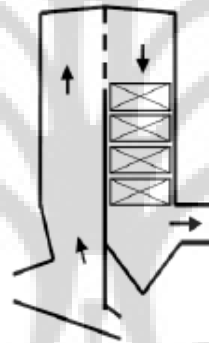
Huijbregts dan Leferink⁸ menyebutkan bahwa beberapa elemen dalam komposisi baja memberikan efek menguntungkan dan juga merugikan terhadap ketahanan beberapa jenis korosi pada temperatur tinggi, seperti didefinisikan sebelumnya. Secara prinsip penambahan Cr dapat meningkatkan ketahanan korosi pada material baja baik pada temperatur ruang maupun temperatur tinggi. Rangkuman tentang elemen-elemen tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Pengaruh beberapa elemen pada baja terhadap ketahanan jenis korosi tertentu pada temperatur tinggi⁸

Type of failures	Beneficial elements in C-steels	Non beneficial elements	Failure mechanism
Boiler corrosion caused by chloride ingress under heat flux conditions	Mn, P, Cr and Mo		Formation of compressive stresses in the magnetite layer
Erosion corrosion in wet steam lines	Cu, Cr and Mo	C	Porosity of the magnetite layer
Nitrate Intergranular Stress Corrosion Cracking	Mo, Cr and Mn	Si, Cu and C	Intergranular corrosion
Strain Induced Corrosion Cracking (in deaerators)	Mo	C	Repassivation capacity on the crack tip

II.2.2.2 Pengendalian Korosi pada Steam Boiler

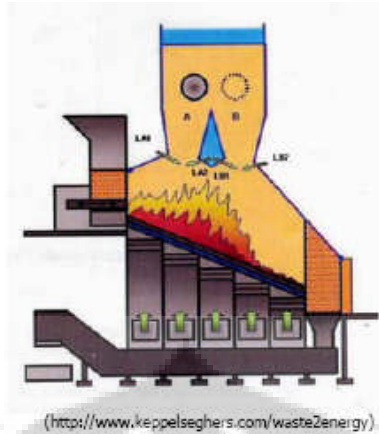
Ada dua hal utama yang dapat dilakukan dalam perlindungan terhadap korosi, yaitu mengendalikan kondisi operasi dan memperpanjang masa umur pakai material¹⁵. Pengendalian kondisi operasi dapat dilakukan dengan menggunakan desain proses yang lebih tepat. Pemilihan desain dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi proses seperti banyaknya ruang, biaya konstruksi yang lebih murah, proses pemanasan yang lebih efisien, dan dengan melihat permasalahan yang terjadi pada masa lalu. Contoh desain boiler dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Salah satu desain boiler¹⁵

Penggunaan material dengan grade yang lebih tinggi juga dapat membantu dalam mengurangi pengaruh korosi. Dalam hal ini, material dengan kandungan elemen penguat lebih tinggi, memperbaiki ketahanan material pada operasi temperatur tinggi. Sehingga umur pakai material dapat menjadi lebih lama. Selain itu, pengendalian korosi juga dapat dilakukan dengan perlindungan coating terhadap material.

Metode lain dalam mempengaruhi kondisi operasi adalah pemasangan komponen tambahan seperti Segher Boiler Prism, seperti dalam Gambar 2.13, dimana udara diinjeksikan ke dalam ruang pembakaran gas. Tujuannya adalah (1) untuk menurunkan temperatur pada saluran udara, (2) mengurangi fluktuasi temperatur dan meningkatkan turbulensi, (3) mencegah hotspot.



Gambar 2.13 Segher Boiler Prism¹⁵

II.3 Kegagalan Material Boiler

Dalam mempelajari penyebab kegagalan suatu material, diperlukan pemahaman tentang proses hingga terjadinya perpatahan. Secara umum proses terjadinya perpatahan diakibatkan oleh adanya aplikasi tegangan yang tinggi. Namun, perpatahan intergranular juga dapat terjadi akibat tegangan rendah pada temperatur tinggi.

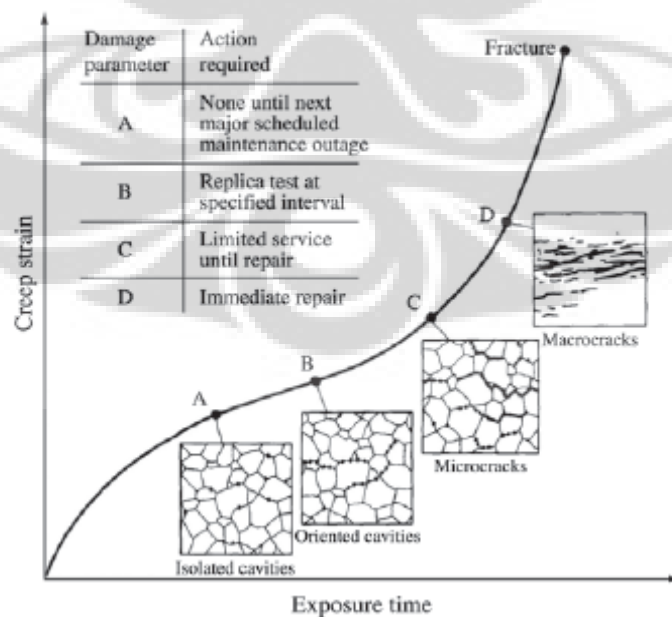
Permasalahan yang sering terjadi pada steam boiler adalah creep, dan juga oksidasi pada temperatur tinggi, disamping permasalahan lainnya. Pada steam pipe, dimana mempunyai bentuk berupa pipa dengan panjang tertentu, dapat memiliki konsentrasi tegangan pada daerah seperti siku (elbow) ataupun lekukan (bent) yang dapat menyebabkan creep. Walaupun tidak memiliki sambungan (joint ataupun weld), konsentrasi tegangan dapat juga terjadi pada daerah sepanjang seam weld (untuk jenis seam weld-roll pipe). Sehingga, kriteria desain suatu steam pipe untuk ketahanan creep selalu ditentukan pada saat produksi.¹⁹

Rupture ductility dapat menjadi ukuran kekuatan creep suatu material, yang disebut rupture life. Rupture life juga dipengaruhi oleh kemampuan material dalam menjaga efisiensi termal, dalam arti proses perpindahan panas tidak mengalami hambatan akibat pengaruh lingkungan ataupun kondisi operasi.

Terhambatnya perpindahan panas yang diakibatkan proses oksidasi pada material logam, dapat menaikkan temperatur permukaan yang melebihi batas kemampuan creep dimana menyebabkan perpatahan.¹²

Pada prinsipnya, logam paduan akan kehilangan keuletan selama dipergunakan pada temperatur tinggi. Hal ini ditunjukkan dari fungsi temperatur dan laju regangan dimana adanya daerah kritis untuk terjadinya penggetasan. Pada laju regangan tetap, nilai keuletan akan menurun dengan meningkatnya temperatur, yang dapat disebabkan oleh pengaruh nukleasi retak pada batas butir (intergranular crack) selama proses deformasi.

Seperti dijelaskan sebelumnya, cacat berupa cavity yang terdapat pada material sering menjadi indikator dalam menentukan perilaku creep suatu material, terutama baja. Menurut Neubauer and Wedel¹² proses evolusi cavity dalam perilaku creep terjadi dalam empat tahap seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14. Berdasarkan kurva tersebut, dapat diprediksi waktu terjadinya perpatahan serta tindakan yang harus dilakukan sebelum terjadinya perpatahan.



Gambar 2.14 Perilaku creep material baja berdasarkan evolusi cavity¹²

II.3.1 Mekanisme Kegagalan

Sebuah komponen disebut mengalami kegagalan apabila terjadi kebocoran ataupun perpatahan pada material, dan/atau terdapat penipisan dinding material yang cenderung untuk menjadi kegagalan material, sehingga memerlukan penggantian. Seperti dijelaskan sebelumnya, kegagalan material boiler dapat berupa perpatahan creep dan juga korosi. Dan secara garis besar, Rogers¹⁴ mengklasifikasikan mekanisme kegagalan material boiler dalam:

1. Stress Rupture
2. Water/gas-side corrosion
3. Fire-side corrosion
4. Erosion
5. Fatigue

1. Stress Rupture, adalah mekanisme kegagalan akibat tegangan yang dapat dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal. Kegagalan ini terjadi akibat: (1) adanya overheating, (2) creep pada temperatur tinggi, (3) cacat lasan karena material yang berbeda. Overheating terjadi dalam waktu yang singkat (short-term), dimana menurut Neves dipengaruhi oleh terhambatnya aliran proses karena pembentukan lapisan oksida internal di dalam boiler, tidak adanya sirkulasi pendinginan boiler, dan terjadinya overfiring oleh gas pembakar. Terjadinya creep juga, seperti diketahui, dipengaruhi faktor eksternal maupun internal, seperti adanya deposit (abu, debu, ataupun scale), radiasi panas, imbas dari pemanasan gas yang terlalu tinggi, adanya tegangan sisa pada lasan, dan terakhir adalah pemilihan material yang salah.

2. Water/gas-side corrosion, yaitu proses korosi yang terjadi pada dinding tube bagian dalam. Jenis korosi yang terjadi dapat berupa:
- (1) caustic corrosion, disebabkan oleh deposit akibat heat flux
 - (2) kerusakan akibat hydrogen,

- (3) pitting, disebabkan konsentrasi oksigen dan kontak dengan air
- (4) SCC.

3. Fire-side corrosion, yaitu proses korosi yang terjadi pada dinding luar tube. Masalah yang timbul dipengaruhi: (1) rendahnya temperatur permukaan, (2) dinding waterwall, (3) kehadiran abu dari bahan bakar.
4. Erosion, proses pengikisan yang disebabkan oleh aliran debu ataupun abu, jatuhan slag, soot blower, dan partikel sisa pembakaran.
5. Fatigue, didefinisikan sebagai kegagalan akibat tegangan cyclic, yang dipengaruhi oleh: (1) vibrasi, (2) panas (termal), dan (3) proses korosi.

Kurangnya perhatian terhadap perawatan/ pemeliharaan kondisi komponen dari aspek: cleaning, chemical, material, dan kondisi lasan dapat menjadi penyebab utama terjadinya kegagalan dengan mekanisme seperti di atas.

II.3.2 Metode Investigasi

Seperti diketahui, kegagalan suatu material pada komponen boiler dapat menyebabkan penghentian operasi. Pendeteksian secara dini terhadap cacat ataupun retak pada komponen boiler dilakukan untuk mencegah kerusakan yang lebih parah. Metode investigasi yang dapat dilakukan, menurut Smith¹⁶ adalah melalui monitoring (acoustic) dan juga NDT. Dalam hal ini perlu ditentukan metodologi pengambilan data hingga analisis terhadap permasalahan yang terjadi. Rogers¹⁴ membagi tahapan-tahapan dalam investigasi, yaitu:

1. Mempersempit lingkup permasalahan pada lokasi dan posisi dimana material mengalami kegagalan.
2. Menentukan mekanisme kegagalan dengan melihat hubungan dengan kerusakan lain yang mungkin terjadi.

3. Menentukan akar permasalahan atau penyebab kegagalan berdasarkan pengamatan yang ada.
4. Melakukan pengujian dalam memverifikasi penyebab kegagalan.
5. Menyusun suatu metodologi dalam membuat kesimpulan dan tindakan yang selanjutnya.
6. Membuat program preventif untuk mencegah terjadinya kegagalan serupa di masa mendatang.

II.4 Prevention dan Control

II.4.1 Material Life Assessment

Pengujian creep merupakan basis pengambilan data dalam menentukan kekuatan creep dan juga perpatahannya. Seperti diketahui perilaku creep pada material, terutama baja, sangat bergantung pada temperatur operasi dan tegangan. Kegagalan suatu material disebut sebagai kegagalan akibat creep, jika memang tidak ada faktor lain yang menyebabkan kegagalan prematur material tersebut. Dengan mengasumsikan temperatur dan tegangan yang diaplikasikan pada material, seperti pada steam pipe, maka kita dapat memperkirakan batas/umur pakai creep material berdasarkan waktu yang diberikan²⁰.

Teknik Ekstrapolasi

Suatu komponen dalam aplikasi temperatur tinggi seperti steam boiler, dan peralatan industri lain pada umumnya didesain untuk waktu operasi lebih dari 100000 jam. Karena itu diperlukan teknik dalam merencanakan karakteristik creep material, terutama logam, melalui teknik ekstrapolasi terhadap kondisi aktual. Data yang diperoleh dalam pengujian creep diperlukan untuk membuat estimasi perilaku creep material untuk jangka waktu yang lama dengan variasi temperatur. Teknik ekstrapolasi digunakan

untuk memprediksi kekuatan creep hingga patah untuk jangka waktu yang lama berdasarkan data pengujian dalam waktu yang lebih singkat ¹⁹.

Dasar dari ekstrapolasi adalah dengan memplot data tentang waktu, tegangan dan temperatur dalam suatu persamaan, dimana dijadikan acuan dalam menentukan umur material berdasarkan kondisi creep. Beberapa konsep parameter yang telah dikembangkan diantaranya adalah:

1. Larson-Miller Parameter : $P = T(K_1 + \log t_r)$

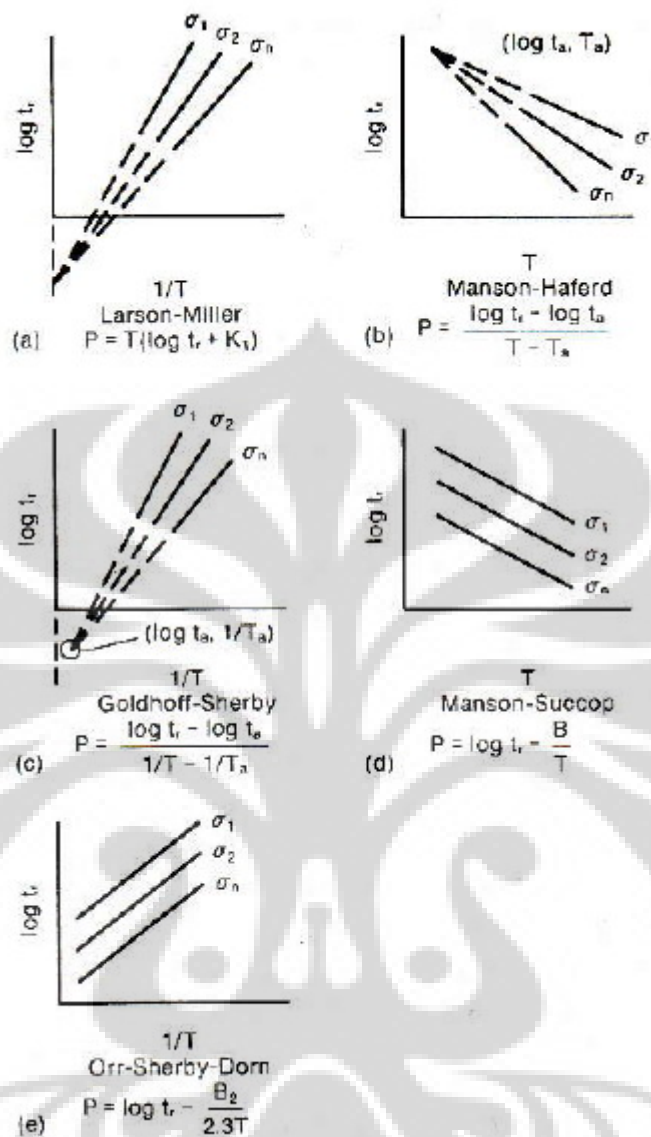
2. Orr-Sherby-Dorn Parameter : $P = \log t_r - \frac{B}{2.3T}$

3. Manson-Hafner Parameter : $P = \frac{\log t_r - \log t_a}{T - T_a}$

4. Goldhoff-Sherby : $P = \frac{\log t_r - \log t_a}{1/T - 1/T_a}$

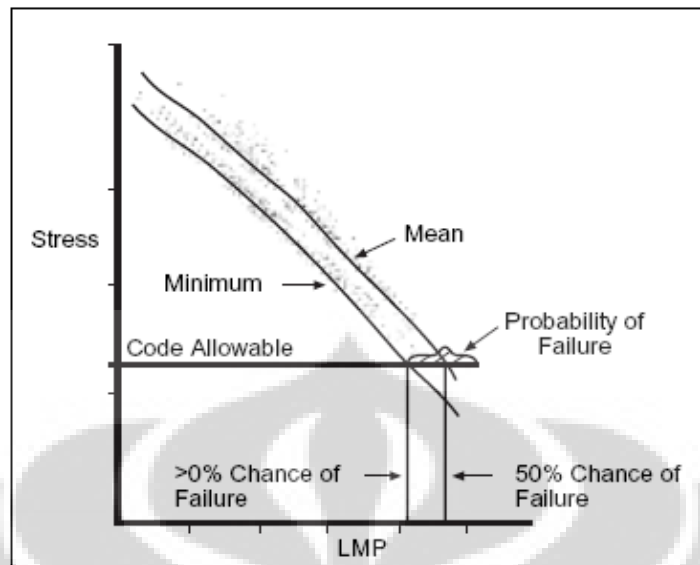
5. Manson-Succop : $P = \log t_r - \frac{B}{T}$

dengan T adalah temperatur, t adalah waktu, dan K dan B adalah konstanta. Hasil plot dari masing-masing parameter menghasilkan grafik antara waktu dan temperatur dengan variable tegangan, ditunjukkan dalam Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Plot kurva antara waktu dan temperatur hasil teknik ekstrapolasi¹⁹

Salah satu teknik parameter, seperti Larson-Miller Parameter atau dikenal dengan LMP, dapat digunakan untuk memprediksi kegagalan suatu material melalui perilaku creep, dengan mendefinisikan tegangan yang diaplikasikan. Oleh Wardle²⁰, hubungan antara tegangan dan LMP, ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Prediksi kegagalan material melalui distribusi LMP dan tegangan²⁰

II.4.2 Monitoring and Inspection

Perlunya tindakan preventif dalam menanggulangi permasalahan yang sering terjadi pada boiler membutuhkan keseriusan dari para operator. Program monitoring maupun inspeksi sebisa mungkin dilakukan secara berkala untuk menghitung segala resiko yang ada, sehingga dapat membuat penilaian terhadap karakteristik material dan kondisi proses yang terjadi. Ada beberapa hal yang harus diverifikasi dalam menganalisis kondisi yang terjadi di dalam boiler¹⁴, diantaranya:

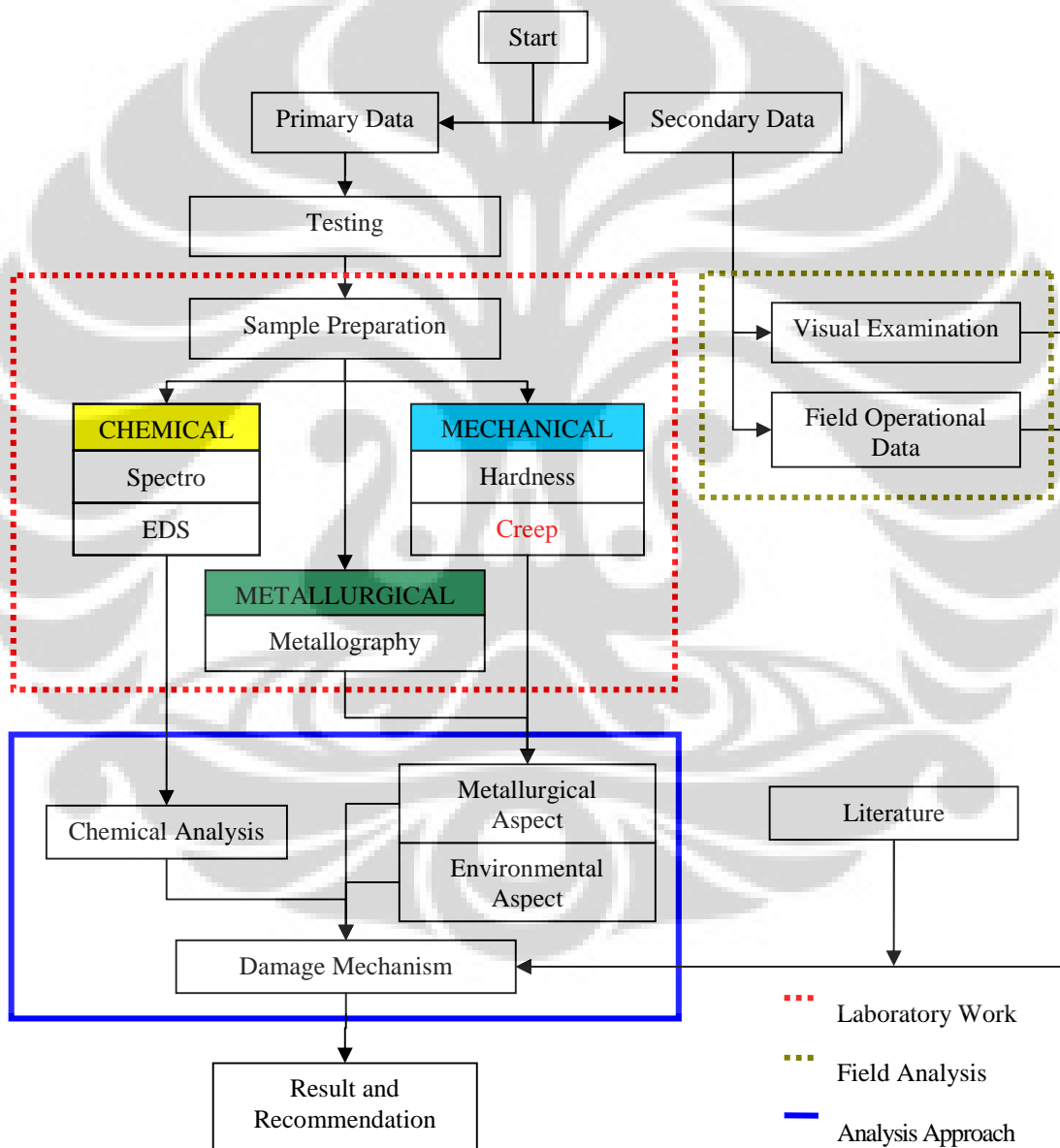
- Temperatur material
- Tegangan material
- Ketebalan material
- Mikrostruktur material
- Sifat-sifat material
- Kondisi kimia dari air
- Kondisi aliran
- Konstituen dalam bahan bakar

- Karakteristik slag
- Kecepatan dan pola aliran gas (uap)
- Temperatur flue gas (gas buang)
- Ketebalan deposit yang terdapat pada material



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

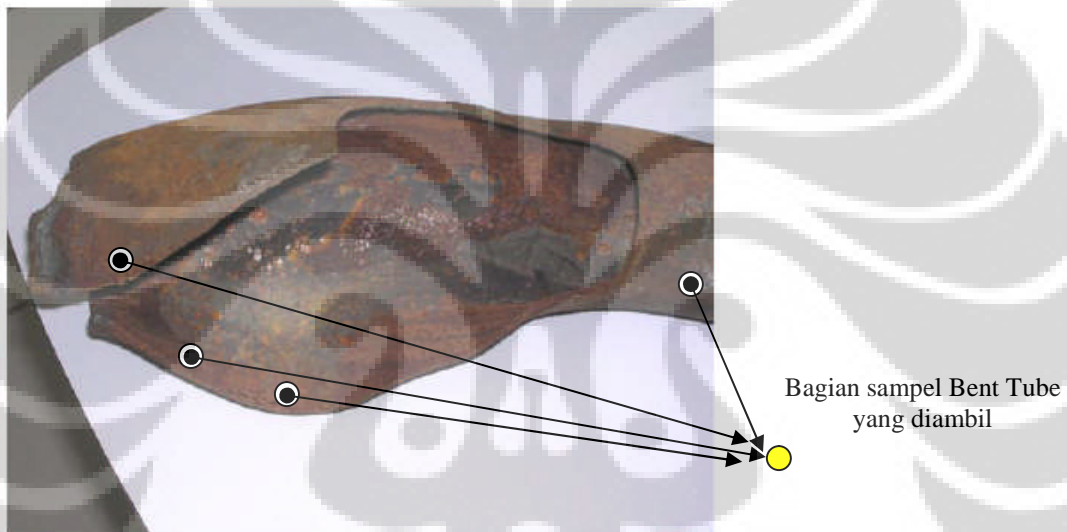
III.1 Metodologi Umum



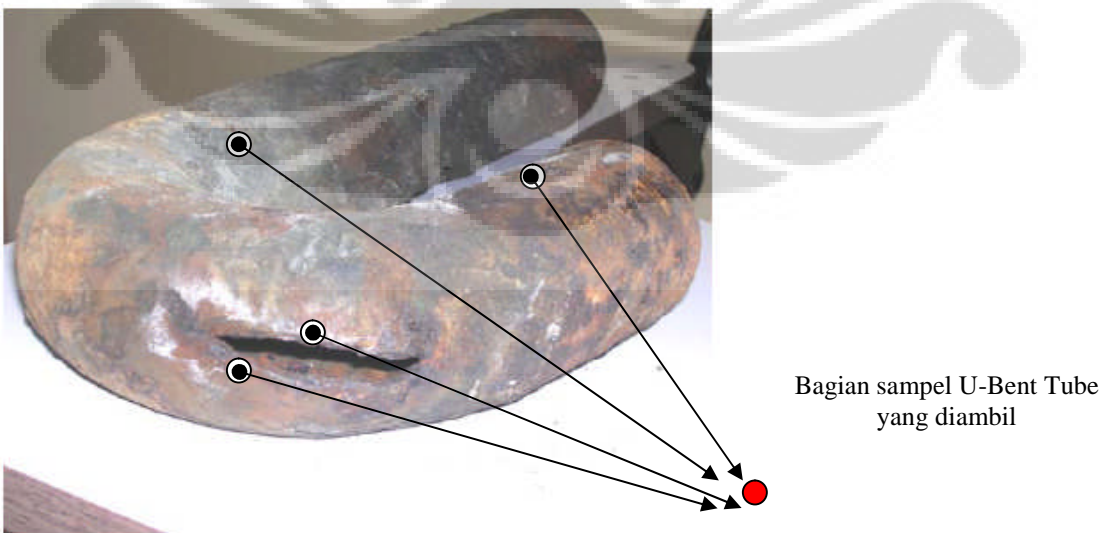
Gambar 3.1 Metodologi Umum

III.2 Metode Pengambilan Data

Dalam memperoleh data yang representatif, dilakukan metodologi pengambilan sampel pada material yang mengalami failure dan membandingkannya dengan bagian yang tidak mengalami failure (utuh) pada komponen-komponen yaitu: Bent-Tube (Platen) dan U Bent-Tube (Pendant). Pengujian-pengujian dilakukan dalam Laboratorium di Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia dengan mengacu pada standard yang dipersyaratkan.



Gambar 3.2 Sampel Bent Tube yang mengalami failure



Gambar 3.3 Sampel U-Bent Tube yang mengalami failure

III.3 Pengujian

III.3.1 Uji Komposisi (Spectrometer)

III.3.1.1 Mekanisme Pengujian Sampel

Sampel diambil pada bagian yang masih utuh yang representatif, kemudian dilakukan preparasi permukaan hingga cukup halus dan rata (dipoles).

Metode Spectro memanfaatkan emisi elektron dalam mengidentifikasi dan menghitung jumlah kandungan elemen pada material sampel. Dengan menggunakan metode analisis terhadap spectrum dari pengukuran kandungan elemen pada material sampel, memungkinkan penentuan komposisi dengan mengambil rata-rata jumlah elemen pada material sampel..

Hasil dari Uji Spectro berupa daftar elemen secara kualitatif dan kuantitatif yang terkandung dalam material sampel.



Gambar 3.4 Alat Pengujian Spectro

III.3.2 Uji Electron Dispersive Spectrometer (EDS)

III.3.2.1 Mekanisme Pengujian Sampel

Sampel diambil pada bagian representatif, dan digerus hingga menjadi serbuk. Setelah itu sampel dimasukkan dalam tabung kecil untuk sampel EDS yang kemudian diisolasi dengan menggunakan plastik.

Metode EDS memanfaatkan energi yang terukur dari tiap-tiap elemen untuk mengidentifikasi dan menghitung jumlah kandungan elemen pada material sampel. Melalui elektron yang dipancarkan dengan penetrasi hingga beberapa mikron di bawah permukaan sampel, memungkinkan penentuan komposisi secara cepat pada lapisan atas permukaan.

Hasil dari Uji EDS ini berupa gambar profil elemen secara kuantitatif yang terkandung dalam material sampel.



Gambar 3.5 Alat Pengujian EDS

III.3.3 Uji Mikrostruktur (Metalografi)

III.3.3.1 Mekanisme Pengujian Sampel

Sampel terdiri atas 2 (dua) bagian, yaitu sampel pada bagian yang mengalami failure, dan sampel pada bagian yang tidak mengalami failure (utuh) pada masing-masing material yang diuji.

Berikutnya sampel diampelas hingga permukaan datar dan halus dengan menggunakan amplas halus dan dipoles sampai permukaan sampel terlihat mengkilap. Setelah siap, sampel terlebih dahulu dietsa menurut jenis material dan dilakukan pengamatan mikrostruktur dengan Mikroskop Optik.

Hasil dari pengujian Metalografi adalah Foto Mikrostruktur dengan perbesaran tertentu, sehingga diperoleh informasi kualitatif tentang fasa-fasa yang terdapat dalam masing-masing material.



Gambar 3.6 Alat Pengujian Metalografi

III.3.4 Uji Hardness

III.3.4.1 Mekanisme Pengujian Sampel

Sampel terdiri atas 2 (dua) bagian, yaitu sampel pada bagian yang mengalami failure, dan sampel pada bagian yang tidak mengalami failure (utuh) pada masing-masing material yang diuji. Setelah itu dilakukan preparasi permukaan hingga cukup halus dan rata.

Dengan menggunakan metode Brinell, permukaan sampel diindentasi dengan bola indenter dengan beban tertentu (d disesuaikan dengan standard ASTM A370). Kemudian lubang bekas indentasi diukur luas permukaannya.

Hasil dari Uji Kekerasan adalah besaran beban per luas permukaan material yang terindentasi dinotasikan dalam Brinell Hardness Number (BHN).



Gambar 3.7 Alat Pengujian Kekerasan (Hardness)

BAB IV

HASIL PENGUJIAN

Pengujian-pengujian yang dilakukan bersifat analisis terhadap aspek internal material yang meliputi komposisi kimia dan karakteristik fisik/mechanis dari material.

IV.1 Visualisasi Steam Pipe yang mengalami Kegagalan

IV.1.1. Bent-Tube



Bagian sampel Bent Tube yang dilakukan pengujian awal

Gambar 4.1. Bent-Tube yang mengalami kegagalan

IV.1.2. U Bent-Tube



Bagian sampel U-Bent Tube yang dilakukan pengujian awal

Gambar 4.2. U Bent-Tube yang mengalami kegagalan

IV.2. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Material

Pengujian komposisi kimia material dilakukan terhadap dua sampel steam pipe pada bagian yang representatif.

IV.2.1. Komposisi Kimia Material Bent-Tube.

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	97.386	0.131	0.302	0.527	0.0293	0.0068	0.841	0.569
2	97.448	0.119	0.281	0.516	0.0283	0.0063	0.849	0.552
Ave	97.417	0.125	0.292	0.522	0.0288	0.0066	0.845	0.561
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	< 0.0050	< 0.0010	0.0029	0.0159	< 0.0020	0.0046	0.0044	< 0.0150
2	< 0.0050	< 0.0010	0.0030	0.0178	< 0.0020	0.0041	0.0036	< 0.0150
Ave	< 0.0050	< 0.0010	0.0029	0.0169	< 0.0020	0.0043	0.0040	< 0.0150
	Pb	Sn	B	Ca	Zr	As	Bi	
1	< 0.0250	0.0100	< 0.0010	0.0003	0.0060	0.0165	0.141	
2	< 0.0250	0.0084	< 0.0010	0.0003	0.0068	0.0137	0.139	
Ave	< 0.0250	0.0092	< 0.0010	0.0003	0.0064	0.0151	0.140	

Gambar 4.3. Hasil uji Spektro Material Bent-Tube

IV.2.2. Komposisi Kimia Material U Bent-Tube

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	97.150	0.122	0.255	0.530	0.0300	0.0086	0.871	0.554
2	97.201	0.115	0.249	0.521	0.0307	0.0084	0.867	0.553
Ave	97.176	0.119	0.252	0.526	0.0303	0.0085	0.869	0.553
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.116	< 0.0010	0.0087	0.190	< 0.0020	0.0265	0.0051	< 0.0150
2	0.114	< 0.0010	0.0080	0.185	0.0021	0.0277	0.0050	< 0.0150
Ave	0.115	< 0.0010	0.0083	0.187	0.0020	0.0271	0.0051	< 0.0150
	Pb	Sn	B	Ca	Zr	As	Bi	
1	< 0.0250	0.0176	< 0.0010	> 0.0010	0.0079	0.0242	0.0760	
2	< 0.0250	0.0177	< 0.0010	> 0.0010	0.0027	0.0243	0.0639	
Ave	< 0.0250	0.0176	< 0.0010	> 0.0010	0.0053	0.0242	0.0700	

Gambar 4.4. Hasil uji Spektro Material U Bent-Tube

Pengujian Komposisi kimia dilakukan sebagai langkah konfirmasi penggunaan material ASTM A335/P12 pada aplikasi steam pipe. Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa material steam pipe yang mengalami kegagalan merupakan jenis Baja Cr-Mo yang umum dipakai pada aplikasi temperatur tinggi. Jenis material tersebut sesuai dengan komposisi kimianya masuk dalam spesifikasi ASTM A335/P12 (Tabel 4.1).

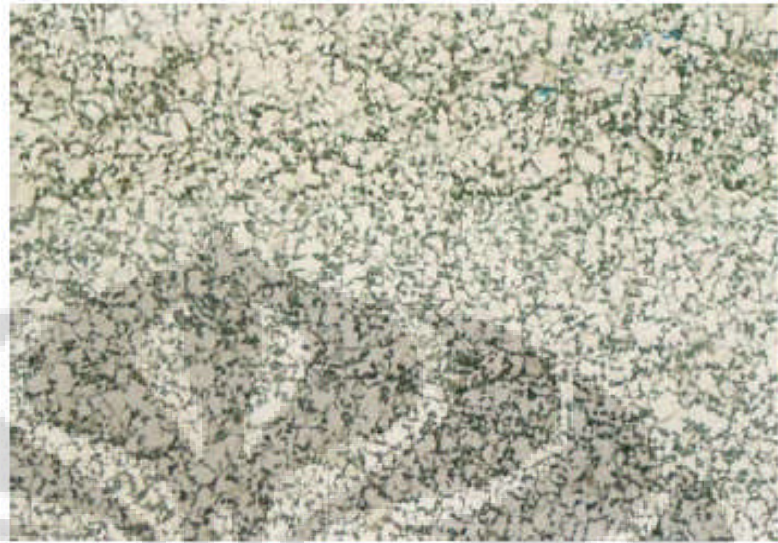
Tabel 4.1. Komposisi Material Standar Baja Cr-Mo

Chrome Moly Chemical Composition												
Specification	C %	Mn %	P % Max	S % Min	Si %	Cr %	V % Max	Mo % Max	N % Max	Ni %	Al %	Cb %
ASTM A335/P1	0.10 - 0.20	0.30 - 0.80	0.025	0.025	0.10 - 0.50	-	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P2	0.10 - 0.30	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.10 - 0.30	0.50 - 0.81	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P5	0.15MAX	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.50MAX	4.00 - 6.00	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P9	0.15MAX	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.25 - 1.00	3.00 - 10.00	-	0.60 - 1.10	-	-	-	-
ASTM A335/P11	0.05 - 0.15	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.50 - 1.00	1.00 - 1.50	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P12	0.05 - 0.15	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.50MAX	0.30 - 1.25	-	0.44 - 0.65	-	-	-	-
ASTM A335/P22	0.05 - 0.15	0.30 - 0.60	0.025	0.025	0.50MAX	1.90 - 2.60	-	0.87 - 1.13	-	-	-	-
ASTM A335/P91	0.06 - 0.12	0.30 - 0.60	0.020	0.010	0.20 - 0.50	8.00 - 9.50	0.18 - 0.25	0.85 - 1.05	0.03 - 0.07	0.40MAX	0.40MAX	0.06 - 0.10

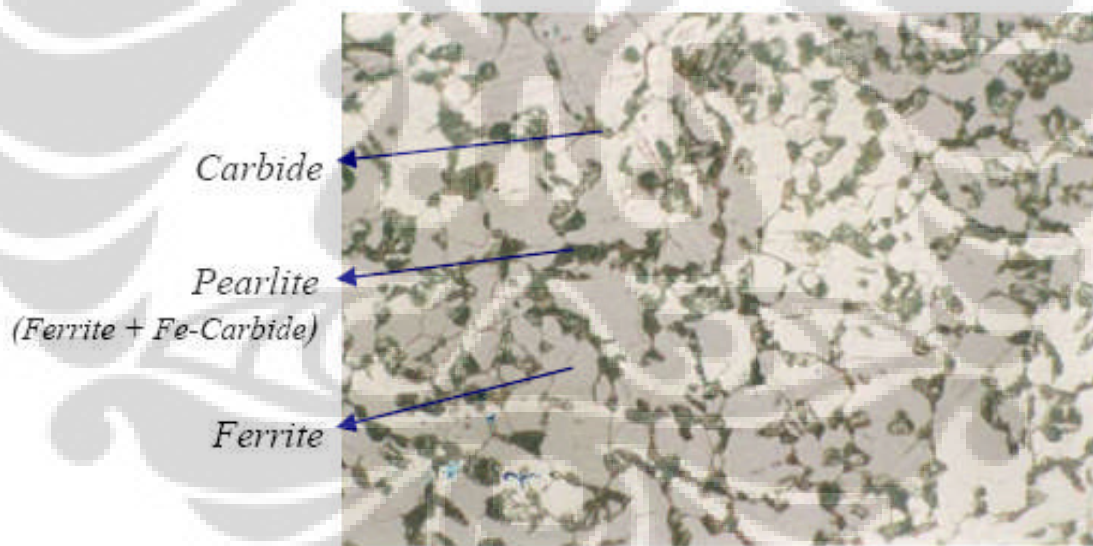
IV.3. Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian mikrostruktur dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai fasa - fasa apa saja yang terkandung dalam material Steam Pipe sehingga bisa diketahui juga perubahan fasa yang mungkin terjadi.

IV.3.1. Mikrostruktur material Bent-Tube



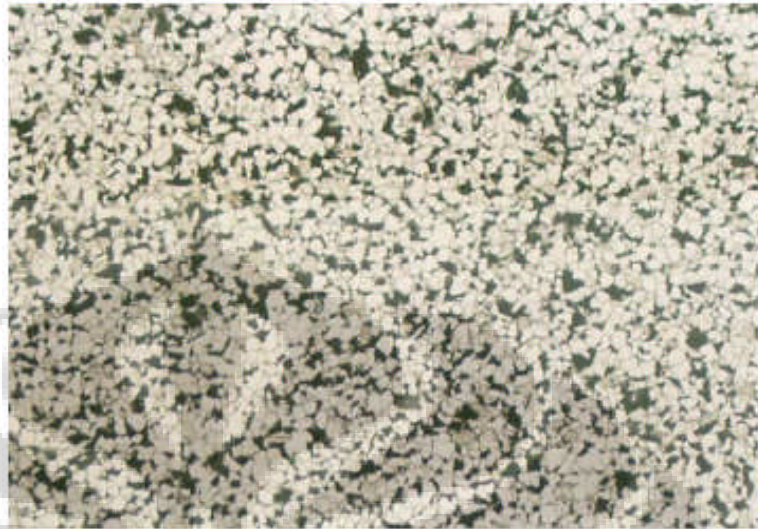
Gambar 4.5. Foto Mikrostruktur material Bent-Tube (Perbesaran 100x)



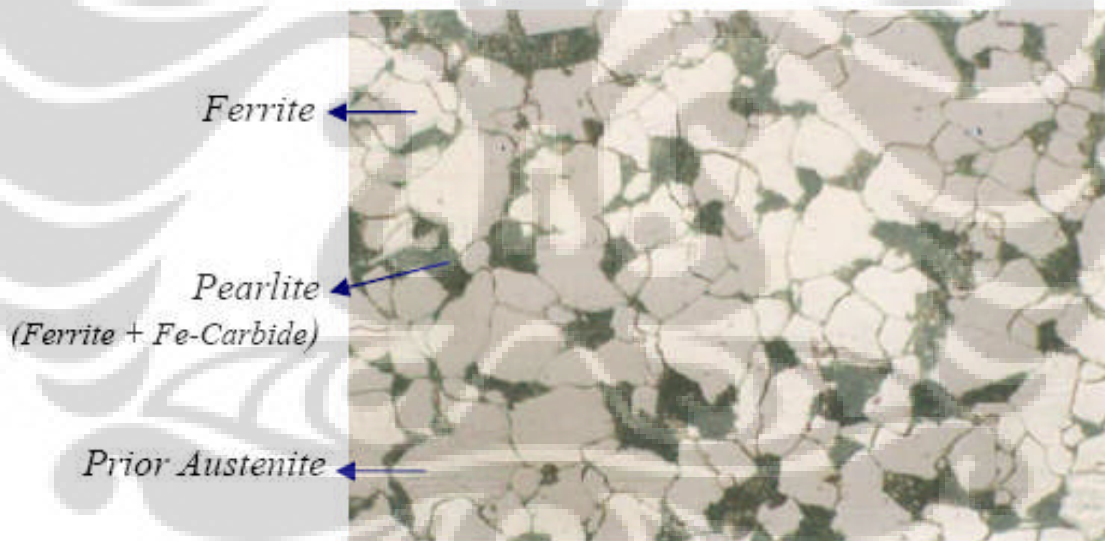
Gambar 4.6. Foto Mikrostruktur material Bent-Tube (Perbesaran 500x)

Hasil pengujian mikrostruktur material Bent-Tube menunjukkan bahwa dengan bentuk mikrostrukturnya, disusun oleh fasa ferrite (warna terang) dan pearlit (berwarna gelap) serta beberapa karbida (berwarna agak terang).

4.3.2. Mikrostruktur material U Bent-Tube.



Gambar 4.7. Foto Mikrostruktur material U Bent-Tube. (Perbesaran 100x)



Gambar 4.8. Foto Mikrostruktur material U Bent-Tube. (Perbesaran 500x)

Dari hasil foto mikrostruktur pada Gambar 4.7 dan 4.8 diatas, dengan jelas terlihat bentuk fasa penyusun mikrostruktur adalah fasa ferrite (berwarna terang) pearlite (berwarna gelap) beberapa alloy yang membentuk prior austenite (berwarna agak terang).

Perbedaan bentuk mikrostruktur antara material Bent-Tube dan U Bent-Tube antara lain disebabkan oleh adanya kondisi operasional serta karakteristik awal dari material.

IV.4. Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan Metode Brinnel ditujukan untuk mengetahui karakteristik fisik dari material. Dengan diketahuinya nilai kekerasan material, bisa diprediksikan juga kekuatan tariknya.

Tabel 4.2. Hasil Pengujian Kekerasan

No	Sampel	BHN (<i>Brinnel Hardness Number</i>)	Predicted Tensile Strength (PSI)
1	<i>Steam Pipe A</i>	169	76860
2	<i>Steam Pipe B</i>	135	64110

Hasil pengujian menunjukkan perbedaan nilai kekerasan yang cukup signifikan antara material Bent-Tube dan U Bent-Tube, dimana material Bent-Tube lebih keras. Kondisi ini merupakan cerminan dari perbedaan mikrostruktur diantara kedua material tersebut diatas.

BAB V

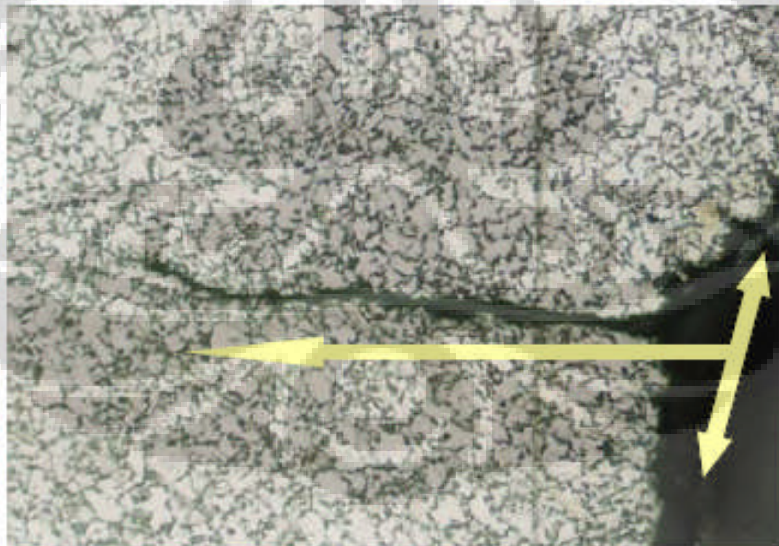
PEMBAHASAN

V.1.Bent-Tube

Kegagalan yang terjadi pada material Bent-Tube, disebabkan oleh kombinasi faktor internal material dan juga faktor operasional.

V.1.1. Analisa Fraktografi

Dengan melihat mode kegagalan/perpatahan yang terjadi, bisa diketahui juga penyebab keagalannya.



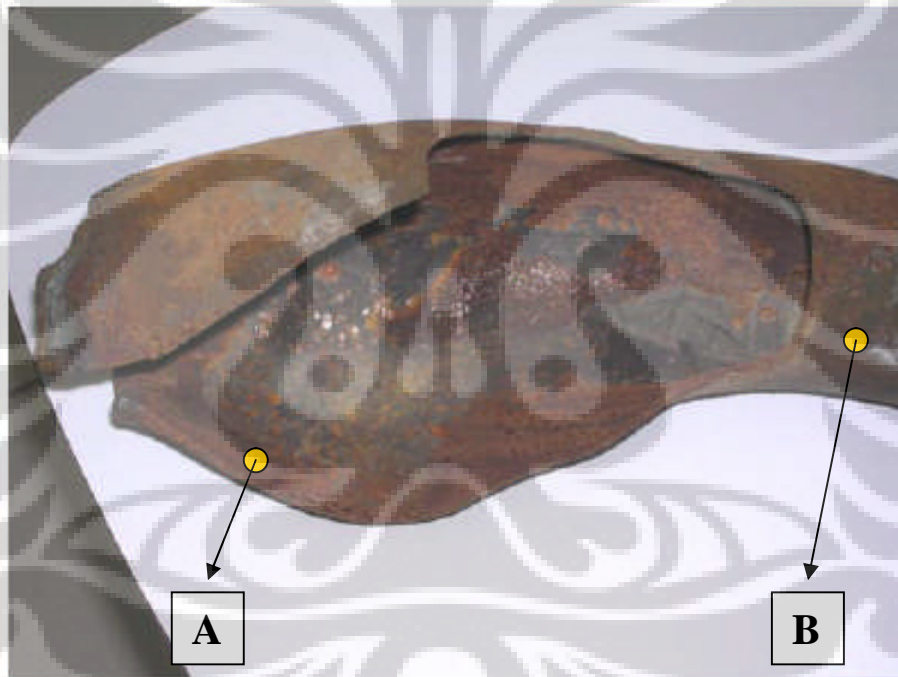
Gambar 5.1. Bagian Bent-Tube yang mengalami kegagalan. (Perbesaran 100x)

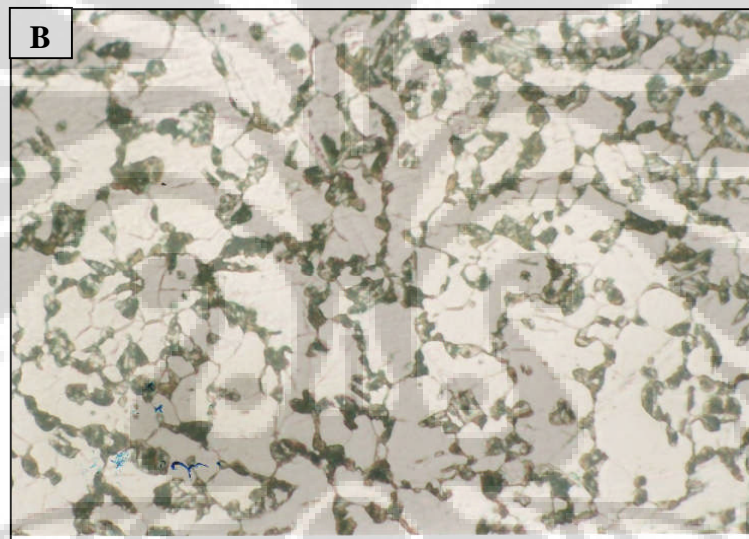
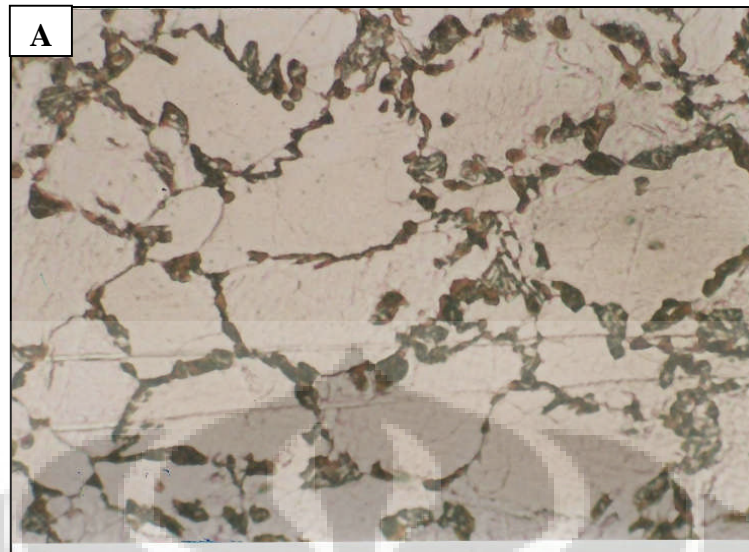
Jejak perpatahan seperti terlihat pada Gambar 5.1 merupakan perpatahan yang bercabang (sesuai arah anak panah). Ini menunjukkan bahwa kegagalan yang terjadi berlangsung seketika akibat suatu tekanan yang cukup besar dimana kondisi material sudah tidak dapat menahan tekanan yang terjadi

tersebut. Perpatahan yang terjadi diperkirakan bersifat kombinasi antara granular (memotong butir) dan intergranular (memotong batas butir) yang umumnya terjadi pada temperatur tinggi.

V.1.2. Mikrostruktur Material

Dari hasil pengujian mikrostruktur terhadap bagian dari material yang mengalami kegagalan dan yang masih utuh, didapatkan perbedaan yang cukup signifikan antara kondisi material pada bagian yang mengalami kegagalan dan tidak.

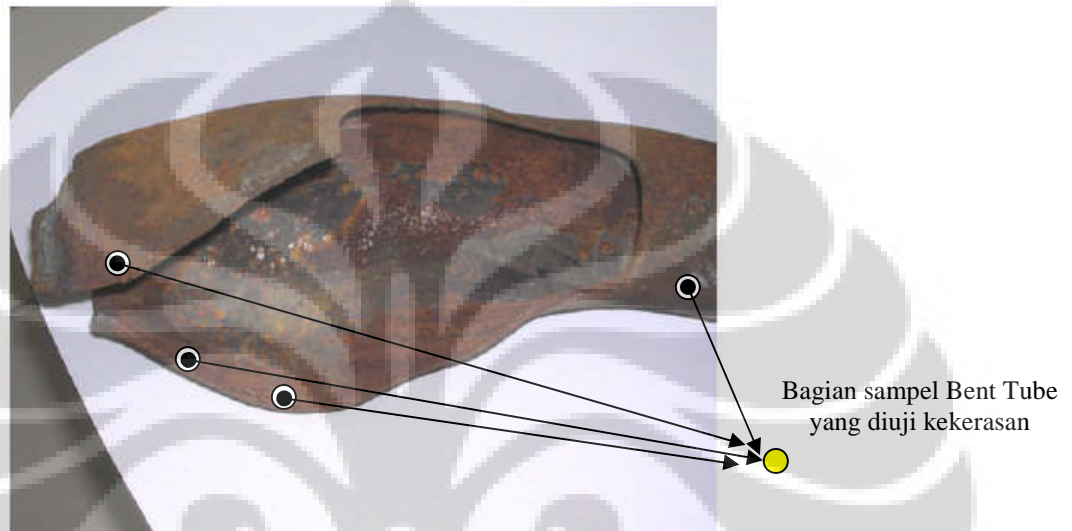




**Gambar 5.2. Foto Mikrostruktur material Bent-Tube (Perbesaran 500x)
A. Bagian yang mengalami kegagalan, B. Bagian yang utuh**

Terlihat pada Gambar 5.2, mikrostruktur material pada bagian yang mengalami kegagalan dan yang tidak, telah mengalami perubahan yang sangat signifikan. Dengan tingkat perbesaran yang sama (500x) mikrostruktur pada bagian yang gagal telah mengalami pembesaran butir terutama pada fasa ferrite-nya (fasa berwarna terang). Kondisi ini disebabkan oleh adanya efek dari creep mengikat expose pada temperatur yang cukup tinggi yaitu $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ dalam jangka waktu tertentu. Perubahan mikrostruktur yang lain yang juga mencerminkan adanya proses creep adalah terjadinya pengurangan luas fasa pearlite dan juga pengurangan kerapatan karbida

dibatas butir yang mana proses penguatan material oleh adanya karbida (precipitation hardening) menjadi kurang efektif lagi. Dengan perubahan mikrostruktur tersebut, dipastikan kekuatan pada bagian material steam pipe yang telah mengalami creep akan mengalami penurunan yang sangat signifikan.



Gambar 5.3. Posisi pengujian kekerasan pada material Bent-Tube

Hasil pengujian kekerasan sendiri menunjukkan adanya efek dari proses deformasi yang terjadi, dimana pada bagian yang gagal (mengalami deformasi) kekerasannya sedikit lebih tinggi dibandingkan pada bagian yang tidak terdeformasi seperti terlihat pada Tabel 5.1. Peningkatan kekerasan pada bagian yang terdeformasi merupakan efek dari work hardening.

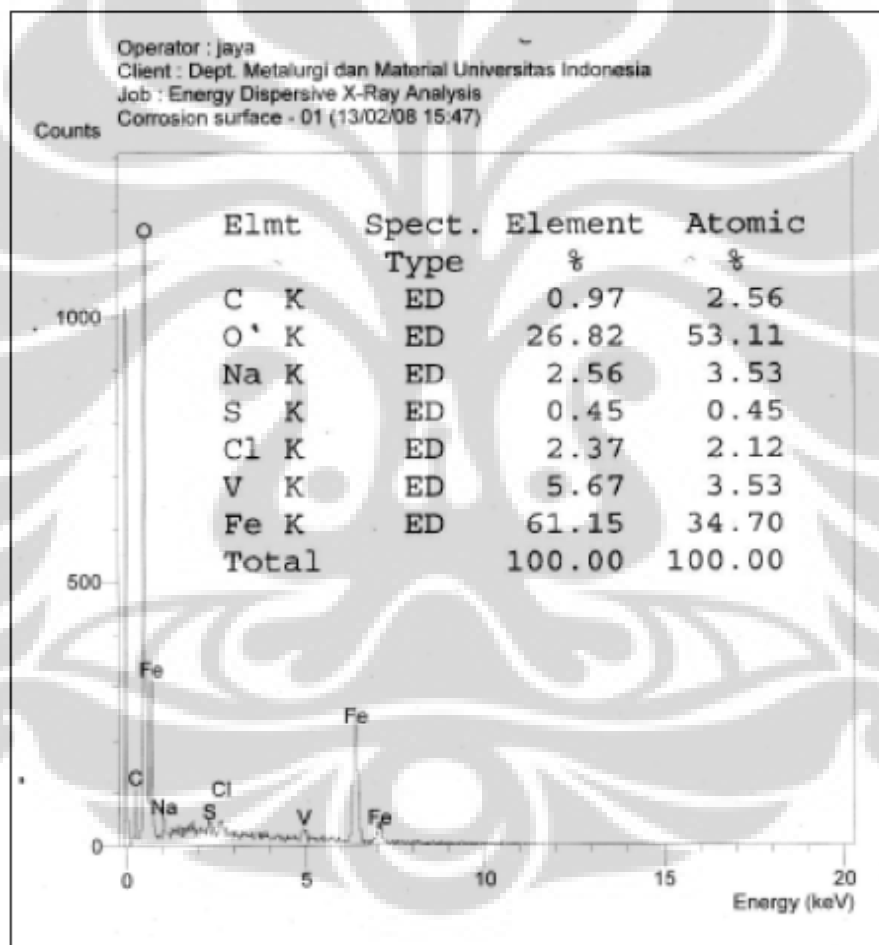
Tabel 5.1. Hasil Pengujian Kekerasan material Bent Tube

No	Sampel	BHN (<i>Brinell Hardness Number</i>)
1	<i>Failure Area</i>	171,174,176
2	<i>Non Faiilure Area</i>	169

V.1.3. Aspek Lingkungan

Untuk mengetahui jejak – jejak korosi yang mungkin terjadi pada material, dapat dilihat dengan melakukan pengujian Electron Dispersive Spectrometer (EDS) pada bagian material yang mengalami kegagalan. Gambar 5.4 memperlihatkan hasil pengujian EDS.

Dari hasil pengujian EDS diatas, terlihat bahwa elemen – elemen klorida sebagai salah satu elemen penyebab korosi terdeteksi..



Gambar 5.4. Hasil Pengujian EDS pada bagian yang mengalami kegagalan

Adanya klorida pada hasil uji EDS menunjukkan terbentuknya endapan klorida pada produk korosi yang dihasilkan. Adanya klorida ini tentunya berasal dari lingkungan operasional dari material steam pipe, dimana pada

suatu saat tertentu aliran fasa cair yang mengandung klorida melewati material steam pipe tersebut

Serangan klorida sendiri berkaitan dengan adanya fasa cair/kelembaban yang mengandung klorida yang terperangkap pada permukaan internal steam pipe akibat kesetimbangan tekanan dan temperatur operasi pada suatu saat tertentu. Serangan korosi ini lebih mudah terjadi dengan telah berubahnya beberapa bagian mikrostruktur dari material steam pipe, yaitu semakin luasnya daerah fasa ferrite yang cukup rentan terhadap korosi dibandingkan fasa - fasa lain dari mikrostruktur. Ditambah lagi kondisi temperatur dan tekanan yang tinggi, mempercepat terjadinya serangan korosi. Selain itu konsentrasi klorida yang semakin tinggi akan meningkatkan serangan korosi yang dihasilkan. Hal ini dijelaskan pada Gambar 2.10.

Korosi yang diakibatkan oleh klorida ini umumnya bersifat lokal dan hanya membentuk crack tip. Dengan adanya tekanan yang besar crack tip tersebut akan mengalami perambatan secara cepat dan terjadilah kegagalan.

V.1.4. Mekanisme Kegagalan Bent Tube

Dalam kasus kegagalan yang terjadi pada Bent-Tube, serangan klorida (pembentuk crack tip) merupakan faktor utama yang mempercepat terjadinya kegagalan selain dari telah terdegradasinya material akibat temperatur dan tekanan operasi.

Kegagalan yang terjadi pada dasarnya bersifat statistik, tergantung pada bagian mana dari material yang kondisinya paling lemah pada saat terjadi serangan korosi ataupun akibat load dari tekanan operasi. Degradasi material yang terjadi sangat dipengaruhi oleh internal stress pada material yang bisa berupa tegangan sisa akibat proses deformasi pada saat fabrikasi ataupun sebagai akibat dari ketidakhomogenan dari mikrostruktur.

Faktor lain yang menyebabkan adanya perbedaan tingkat degradasi material yang terjadi pada steam pipe adalah berkaitan dengan terjadinya pemanasan yang lebih tinggi pada area tertentu pada steam pipe sebagai efek hot spot pada saat proses pembakaran dalam boiler.

V.2. U Bent-Tube.

Kegagalan yang terjadi pada material U Bent-Tube pada dasarnya hampir sama dengan yang terjadi pada material Bent-Tube yaitu kombinasi dari perubahan karakteristik material dan lingkungan operasi.

V.2.1. Fraktografi

Hasil foto pada daerah yang mengalami kegagalan seperti terlihat pada Gambar 5.5. mengindikasikan mode kegagalan yang berlangsung seketika tetapi dengan kondisi intensitas tekanan yang relatif lebih rendah dibandingkan yang terjadi pada material Bent-Tube.



Gambar 5.5. Kegagalan yang terjadi pada material U Bent-Tube

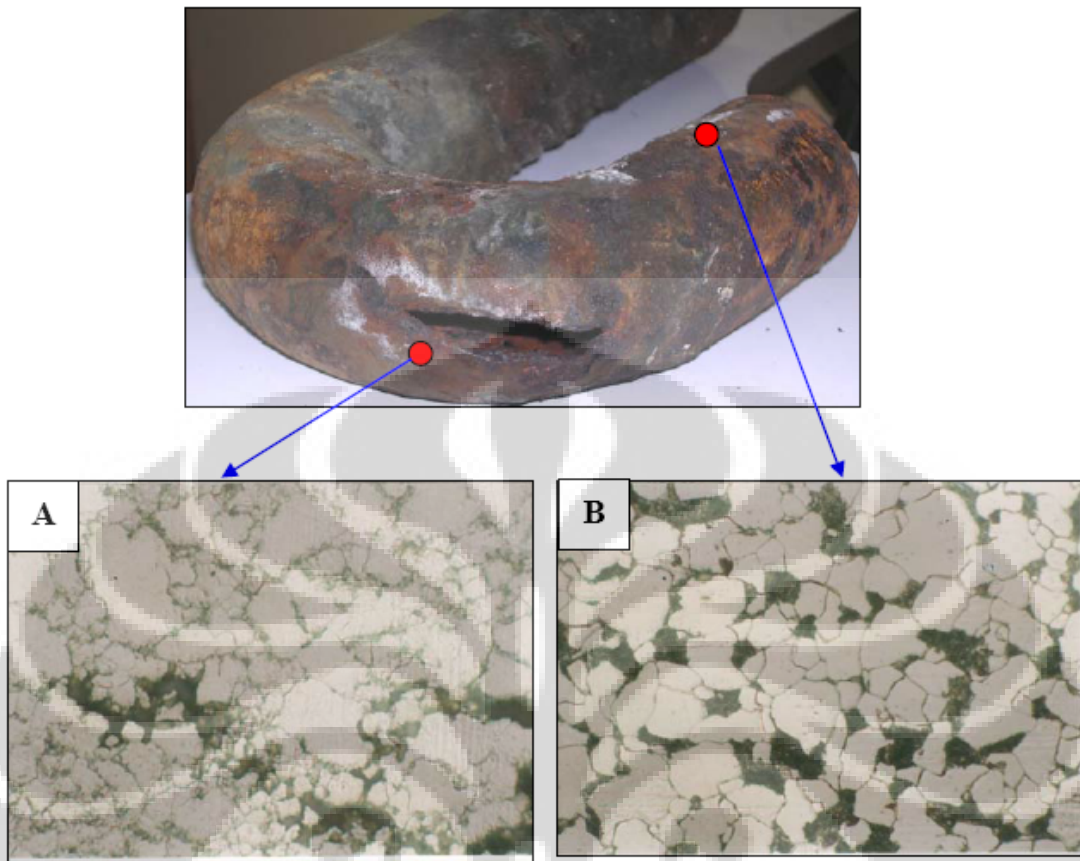


Gambar 5.6. Foto Mikrostruktur (Perbesaran 100x) kegagalan yang terjadi pada material U Bent-Tube

Pada gambar 5.6 terlihat bahwa perputahan terjadi mengikuti pola korosi yang terjadi. Kegagalan/perputahan sendiri terjadi akibat suatu tekanan yang terjadi seketika pada saat material menurun kekuatannya akibat terkorosi. Kegagalan seperti telah disebutkan sebelumnya mengikuti pola korosi yang terjadi dimana bersifat intergranular.

V.2.2. Mikrostruktur Material

Seperti halnya yang terjadi pada Bent-Tube, perubahan mikrostruktur juga terjadi pada U Bent-Tube. Tentunya hal tersebut sangat berkaitan dengan kondisi temperatur operasi yang mencapai +/- 360 °C dan juga tekanan operasi yang mencapai >85 bar.



**Gambar 5.7. Foto Mikrostruktur material steam pipe B (Perbesaran 500x)
A. Bagian yang mengalami kegagalan. B. Bagian yang utuh.**

Pada Gambar 5.7 diatas, terlihat perbedaan mikrostruktur pada bagian material yang mengalami kegagalan jika dibandingkan bagian material yang tidak mengalami kegagalan. Perubahan mikrostruktur yang terjadi mempunyai mekanisme yang relatif sama dengan yang terjadi pada material Bent-Tube. Hanya saja karena adanya perbedaan temperatur dan juga tekanan operasi dari kedua material steam pipe tersebut berbeda, memberikan efek yang berbeda pula.

Pada dasarnya mikrostruktur pada Gambar 5.7 A dan B telah mengalami gejala creep dimana telah terjadi segregasi dari alloy pada butir dengan membentuk prior austenite dan mengendap di batas butir. Dengan kondisi dimana jumlah pearlite yang tidak lagi berimbang dengan jumlah ferrite dan terbentuknya prior austenite pada mikrostruktur, dapat dipastikan mekanisme penguatan untuk aplikasi temperatur tinggi telah terjadi penurunan.

Gambar 5.7 B, memperlihatkan perubahan mikrostruktur yang sangat signifikan pada bagian U Bent-tube yang mengalami kegagalan dibandingkan pada bagian lain yang tidak gagal. Terlihat hampir semua karbida penguat (termasuk yang terdapat dalam fasa pearlite) pada batas butir telah semakin hilang, sehingga kekuatan creep-nya juga jauh lebih rendah dibandingkan pada bagian lain yang tidak gagal.

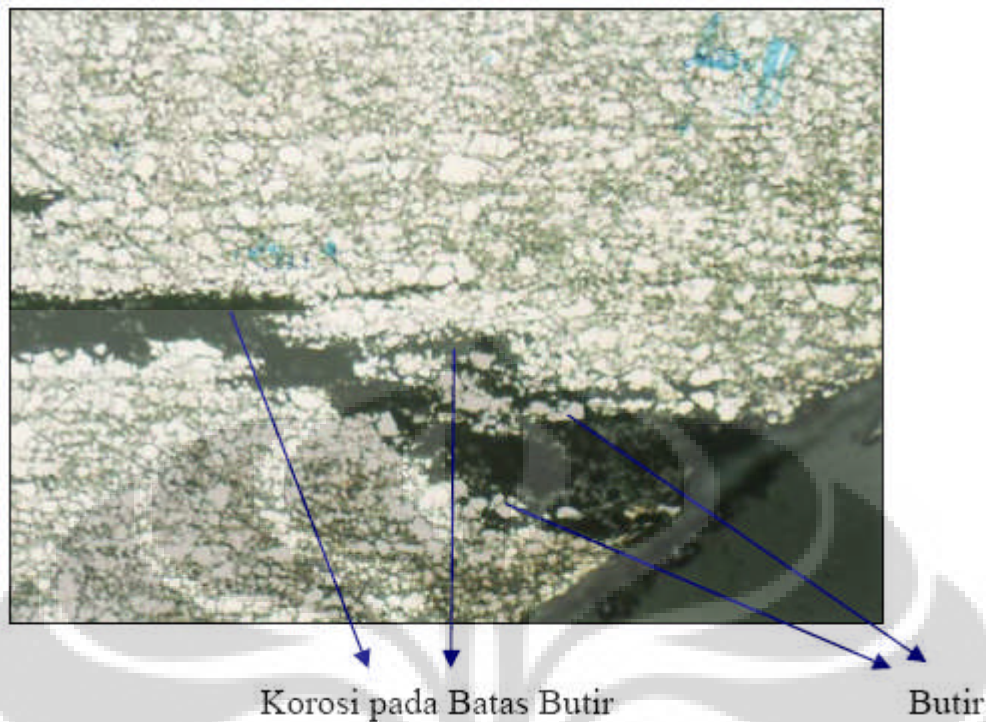
Kegagalan akibat creep sendiri umumnya didahului dengan adanya deformasi plastis pada material mengingat kekuatannya yang telah jauh menurun. Dari perbandingan nilai kekerasan pada daerah yang mengalami kegagalan dan yang tidak, juga tercermin adanya proses creep tersebut (Tabel 5.2). Nilai kekerasan mengalami penurunan pada daerah yang mengalami kegagalan.

Tabel 5.2. Nilai kekerasan pada material U-Bent Tube

No	Sampel	BHN (Brinell Hardness Number)
1	<i>Failure Area</i>	121
2	<i>Non Failure Area</i>	135

V.2.3. Aspek Lingkungan

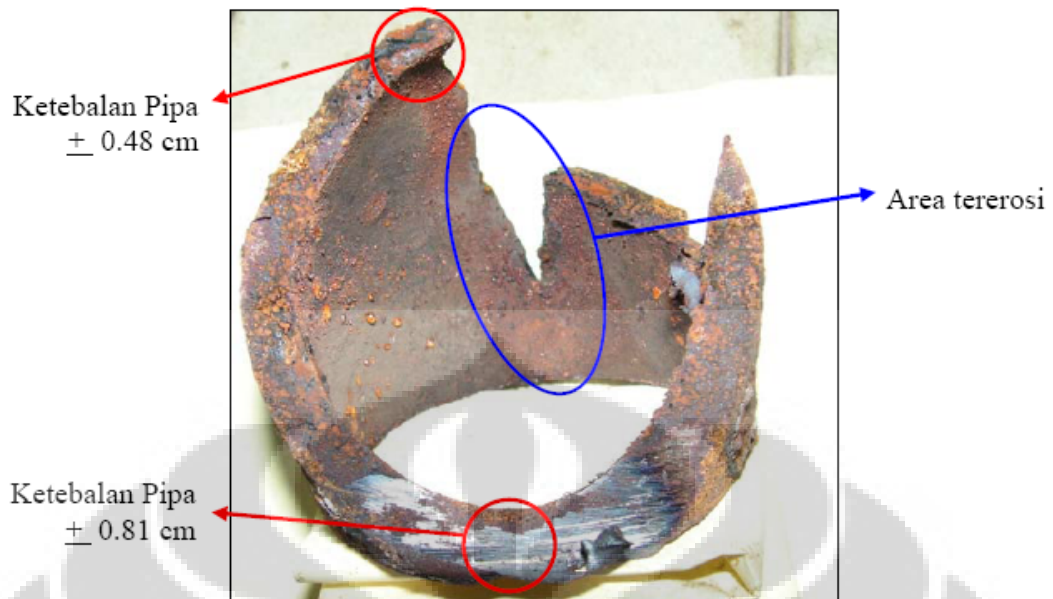
Kegagalan yang terjadi berkaitan erat dengan adanya serangan korosi pada material U Bent-Tube, dimana jejak – jejak kegagalan korosi yang terjadi dapat dilihat pada foto mikrostruktur seperti terlihat pada Gambar 5.7 berikut ini.



Gambar 5.8 Serangan korosi Batas Butir pada material U Bent-Tube (Perbesaran 100x)

Material U Bent-Tube mengalami serangan korosi batas butir yang menandakan adanya kontak antara permukaan yang mengalami kegagalan dengan air atau zat yang bersifat korosif sedemikian sehingga terjadi serangan korosi tersebut. Adanya air yang mengakibatkan korosi diperkirakan berasal dari kelembaban ataupun fasa uap yang terkondensasi pada saat terjadi perubahan temperatur operasi.

Umumnya semua dinding internal material U Bent-tube terutama pada dinding bagian atas dari elbow mengalami penipisan sehingga secara fisik terlihat pada dinding bagian atas lebih tipis hingga 0,33 cm dibandingkan dengan ketebalan dinding pada bagian bawah.



Gambar 5.9. Penipisan yang terjadi pada material U Bent-Tube, terjadi pola aliran erosi pada dinding atas pipa.

Penipisan yang terjadi diperkirakan sebagai kombinasi efek dari korosi dan juga erosi mengingat kekerasan material yang telah mengalami penurunan pada area tererosi Gambar 5.8 dan nilai kekerasan yang tersebut pada Tabel 5.2

V.2.4. Mekanisme Kegagalan

Pemicu terjadinya kegagalan adalah korosi dan penipisan pada dinding material yang telah mengalami degradasi akibat high temperature long time exposure. Korosi yang menyerang batas butir ditambah adanya tekanan operasi yang tinggi serta kondisi material yang telah terdegradasi menimbulkan microcrack pada struktur dari material. Pertumbuhan dari microcrack akibat kondisi operasi dan korosi lebih lanjut menyebabkan material mengalami kegagalan akibat cracking.

Bagian material yang mengalami kegagalan umumnya merupakan bagian yang mikrostrukturnya mengalami degradasi paling parah. Kondisi ini lebih disebabkan adanya efek internal stress akibat tegangan sisa dari proses

fabrikasi maupun terdapatnya ketidakhomogenan dalam mikrostruktur pada bagian tersebut dan juga kemungkinan disebabkan oleh faktor operasional akibat efek hot spot (pemanasan yang terkonsentrasi) pada saat proses pembakaran berlangsung pada boiler.



BAB VI

KESIMPULAN & SARAN

VI.1. Kesimpulan

1. Material steam pipe yang digunakan merupakan jenis material ASTM A335/P12 setelah dilakukan pemeriksaan pada data sekunder material yang digunakan dan hasil pengujian komposisi kimia yang dibandingkan dengan Standard ASTM.
2. Kegagalan yang terjadi pada material Bent-Tube dipicu oleh adanya serangan klorida pada bagian material yang terdegradasi dan menyebabkan terjadinya inisiasi crack pit yang kemudian akibat adanya kondisi operasional terjadi cracking.
3. Kegagalan yang terjadi pada material U Bent-Tube dipicu oleh adanya korosi yang terjadi pada bagian material yang terdegradasi dan menyebabkan microcrack yang kemudian akibat kondisi operasional lebih lanjut tumbuh menjadi crack.

VI.2. Saran

1. Sebaiknya dilakukan evaluasi terhadap umur pakai dari semua material yang diaplikasikan pada temperatur tinggi sehingga bisa dilakukan assessment sisa umur pakainya sebagai tindakan preventive maintenance.
2. Perlu dilakukan kontrol terhadap kandungan air pada boiler terutama pH dan tingkat korosifitasnya. Hal ini bisa dilakukan dengan memberikan chemical injection untuk mengontrol baik pH maupun korosifitasnya. Apabila kontrol terhadap fluida telah dilakukan maka sebaiknya dilakukan evaluasi terhadap efektivitasnya.
3. Perlu dilakukan upgrade jenis material yang selama ini digunakan (ASTM A335/P12) mengingat keterbatasan ketahanan creep untuk kondisi operasi eksisting. Upgrade material dilakukan dengan memilih material yang kadar Cr dan Mo-nya lebih tinggi seperti ASTM A335/P22 (2.25Cr-1Mo).

DAFTAR PUSTAKA

1. ASM Handbook Vol. 9, *Metallography and Microstructure*
2. Abe, Fujio, 2007, *Topical Review: Precipitate design for creep strengthening of 9% Cr tempered martensitic steel for ultra-supercritical power plants*, Heat Resistant Design Group, Structural Metals Center, National Institute for Materials Science (NIMS), 1-2-1 Sengen, Tsukuba 305-0047, Japan
3. *Chrome-Moly Chemical Composition*, Unified Alloys Company
4. *Design for High-Temperature Applications*, Key to Metals Task Force & INI International
5. Dowson, Philips, 2005, *Remaining Life Assessment of Steam Turbine and Hot Gas Expander Components*, Proceedings of the 34th Turbomachinery Symposium
6. Ennis, P J., and A Czyrska-Filemonowicz, 2003, *Recent Advances in Creep-Resistant Steels for Power Plant Applications*, *Sādhanā* Vol. 28, Parts 3 & 4
7. Hagen, I., and W. Benedict, *Creep Resistant Ferritic Steel for Power Plant*
8. Huijbregts, W., and R. Leferink, 2006, *Influence of Steel Composition on Strain Induced Corrosion Cracking and Other Types of Corrosion*, *Strain Induced Corrosion Cracking (SICC), Corrosion under Heat Flux Conditions, Erosion Corrosion and Nitrate Stress Corrosion Cracking, Anti-Corrosion Methods and Materials* Vol 53, No1
9. Levitin, Valim, *High Temperature Strain of Metals and Alloys*, Physical Fundamentals, 2006 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim
10. Malik, Anees U, Ismail Andijani, Mohammad Mobin, Fahd Al-Muaili and Mohammad Al-Hajri, *Corrosion of Boiler Tubes Some Case Studies*, Saline Water Conversion Corporation

11. Natalina, Malini Helma, 2007, *Analisis Kerusakan Tube LP Evaporator HRSG Blok II PLTGU Sektor Pembangkitan Belawan*, Korosi & Material - Vol. VII No. 5 Oktober & No. 6 Desember 2007, Indocor
12. Neves, Daniel Leite Cypriano, Jansen Renato de Carvalho Seixas, Ediberto Bastos Tinoco, Adriana da Cunha Rocha, Ibrahim de Cerqueira Abud, 2002, *Stress and Integrity Analysis of Steam Superheater*, Tubes of a High Pressure Boiler, PETROBRAS, REDUC, Industrial Maintenance, Equipment Inspection, Duque de Caxias - RJ, Brazil
13. Ohba T., and K. Kimura, 2005, *Degradation in Tensile and Creep Properties of 2,25Cr-1Mo Steel by Long Term Service in Plant*, Materials Science and Technology, 21, 4, ProQuest Science Journals
14. Rogers, Mike, 2006, *Boiler Tube Failure, Prevention and Control*, Alberta Technology & Science Inc
15. Shang-Hsiu Lee, 2006, *Combating Corrosion in WTE Facilities – Theory and Experience*, NAWTEC 14, Tampa, FL
16. Smith, Douglas J, 2004, *Boiler Maintenance and Upgrade: Attacking Tube Failures*, Power Engineering Pennwell Corporation
17. Somerday, B.P., 2005, *Low Alloy Ferritic Steels: Tempered Fe-Cr-Mo Alloys (code 1211)*, Technical Reference on Hydrogen Compatibility of Materials. Sandia National Laboratories
18. Turnquist, Dustin A., and George J, 2005, *Unique Cracking Observations in Superheater Tubes*, Theus Microsc Microanal 11(Suppl 2) Copyright 2005 Microscopy Society of America DOI: 10.1017/S1431927605507803
19. Viswanathan, R., 2006, *Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components*, ASM International
20. Wardle, T.J., 2000, *Creep-Rupture Assessment of Superheater Tubes Using Nondestructive Oxide Thickness Measurements*, Babcock & Wilcox, Barberton, Ohio, U.S.A. Presented to: ICOLM (International Conference on Life Management and Life Extension of Power Plant) Xi'an, P.R. China