

Studi Analisis Kegagalan Dan Evaluasi Sisa Umur Water Wall Tube Pada Boiler Tipe Cfb Kapasitas 75 Ton Per Jam

HALOMOAN PARNINGOTAN T.S, VIKTOR MALAU ,PRIYO TRI ISWANTO

ABSTRACT

Material *water wall tube boiler* tipe CFB kapasitas 75 ton yang baru beroperasi 2.794 jam mengalami *outage* karena adanya kebocoran. *Water wall* pada boiler CFB mempunyai peranan penting, yaitu merupakan media panas yang merubah air baku menjadi uap jenuh, *water wall* ini berupa pipa-pipa air (*riser*) yang membentuk dinding mengelilingi ruang bakar (*furnace*) secara vertikal. Salah satu masalah yang timbul pada *water wall tube* tersebut adalah terjadinya deformasi. Sebagaimana diketahui bahwa deformasi *water wall* tersebut dapat mempengaruhi aliran fluidisasi *bed material* sehingga akan mempercepat terjadi kerusakan material tersebut yang dapat menyebabkan unit berhenti beroperasi sehingga suplai listrik kepada konsumen terganggu. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji model kegagalan, penyebab kegagalan dan mengetahui terkait sisa umur pakai dari *water wall tube boiler* guna meningkatkan kehandalan unit serta rekomendasi yang sesuai untuk menyelesaikan masalah tersebut.

Obyek penelitian ini adalah pipa *water wall* yang mengalami kegagalan dan pipa *water wall* yang belum pernah dipakai. Metode penelitian yang digunakan untuk mengetahui kondisi dari *water wall* adalah dengan pengujian visual, uji komposisi kimia, uji tarik, uji kekerasan, uji metalografi, uji *inner* dan *external scale* serta uji *creep*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa telah terjadi deformasi yang tinggi sehingga *tube* melengkung seperti bergelombang. Akar penyebabnya adalah akibat terjadi pemanasan sesaat yang tinggi (*short term overheating*) sehingga terjadi pemuatan antara material pipa dengan refractory. Sementara dari hasil pengujian tampak bahwa properties material masih cukup baik hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian kimia maupun mekaniknya. Hasil uji *Creep* menunjukkan *tube* mempunyai properties *creep* yang standar dengan material SA 210 A-1, dimana umur *wall tube* tersebut masih diatas 1900.

Kata kunci: *water wall*, CFB, deformasi, sisa umur, hoop stress

I. PENDAHULUAN

Kegagalan berupa deformasi *wall tube boiler* pada pembangkit Listrik Tenaga Uap tipe CFB (*Circulating Fluidized Bed*) dengan kapasitas 75 ton per jam pertama kali diketahui pada saat beroperasi selama 2.794 jam dan hingga beroperasi sebanyak 29.599 jam kerja sampai dengan bulan September 2021. Material *wall tube boiler* yang digunakan adalah SA 210 A-1 dengan diameter luar 60 milimeter dan diameter dalam 50 milimeter.



Gambar 1. *Water wall tube boiler* yang mengalami deformasi

Penelitian ini akan mengamati karakteristik material yang mengalami deformasi (*tube* lama) yang akan dibandingkan dengan material *spare* (*tube* baru). *Wall tube boiler* yang gagal dianalisis secara visual, ketebalan *tube* yang mengalami deformasi diukur menggunakan UT *thickness*. Komposisi kimia *tube* yang gagal dianalisis menggunakan metode *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Pengujian kekerasan dan *tensile test* dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik dari *tube* yang mengalami deformasi. Pengujian kekerasan dilakukan pada tiga titik, masing masing titik nya diambil pada bagian Luar (L), Tengah (T) dan Dalam (D) dengan metode Vickers, sementara *tensile test* dilakukan untuk mengetahui apakah hasil pengujian sifat mekaniknya masih memenuhi standar ASTM A106 Gr. A1. Metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang ada pada sampel. Struktur mikro yang didapatkan kemudian dapat digunakan untuk mendeskripsikan sifat – sifat yang ada pada sampel. Spesimen dipotong menggunakan *jigsaw* dengan kecepatan rendah dan pendinginan untuk mencegah perubahan struktur. Permukaan spesimen kemudian diratakan dan dihaluskan hingga grit 2000, sebelum kemudian dipoles. Spesimen kemudian di etsa menggunakan nital untuk menampakkan struktur mikro pada permukaannya. Struktur mikro diamati dengan menggunakan mikroskop. Pengujian *Creep* untuk

mengetahui sifat mekanik *creep* yang dapat digunakan memprediksi usia dari material atau ketahanan *creep* pada temperature operasi 540-670 °C dan pada tegangan test antara 30-121 MPa. *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy X-Ray Spectroscopy* (EDS) untuk menganalisis morfologi dan komposisi kimiawi dari deposit, yang akan membantu dalam memastikan sifat kegagalan.

II. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan pengujian sampel *tube* dari *water wall* dan *tube* material cadang (dianggap sebagai pipa baru) untuk nantinya dilakukan pengujian *destructive* dan *non destructive*. Hasil pengujian akan dilakukan perbandingan karakteristiknya dengan standar yang berlaku dan evaluasi untuk menentukan sisa umurnya. Pengujian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

A. Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan sebagai langkah awal analisa kerusakan dan sebagai dasar penentuan pengujian berikutnya yang harus diambil. Menggunakan kamera digital dengan kapabilitas makro.

B. Uji Komposisi Kimia

Pengujian dilakukan dengan menggunakan metode *Optical Emission Spectroscopy* (OES) tipe *Foundry Master Smart* untuk mengetahui komposisi kimia sampel. Sampel uji yang digunakan pada metode ini ialah material *wall tube boiler* yang baru serta yang mengalami deformasi. Material *wall tube boiler* yang digunakan adalah SA 210 A-1. Menurut ASTM A210 A-1, material ini merupakan *Seamless Medium-Carbon Steel Boiler and Superheater Tubes*.

Tabel 1. Unsur Kimia Material SA 210 (ASTM A210 /A210M)

C	Mn	P	S	Si
0,27 max	0,93 max	0,035 max	0,035 max	0,10 min

C. Uji Tarik

Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat uji tarik merk Servopulser. Beban yang digunakan sebesar 10 Ton atau 50% dari beban maksimum (20 ton) dari alat tersebut. Pengujian dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM E8 dan ASTM A370. Persamaan 1 dan 2 berikut ini digunakan untuk menghitung nilai kekuatan luluh dan kekuatan tarik material :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

dimana:

σ = tegangan tarik (N/m² atau Pa)

F = beban / gaya (N)

A₀ = luas penampang sebelum pembebanan (m²)
sedangkan nilai regang dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (2)$$

dimana:

ε = regangan

l_i = panjang spesimen setelah pembebanan (m)

l_0 = panjang spesimen sebelum pembebanan (m)

D. Uji Kekerasan

Metode dinyatakan dalam bentuk paragraf mengenai penyelesaian masalah, tantangan, dan menjawab tujuan Uji kekerasan untuk mengukur tingkat ketahanan material terhadap deformasi plastik. Nilai dari pengujian ini tentunya sangat membantu untuk menentukan dan menganalisa kualitas material *water wall tube boiler* yang mengalami deformasi. Pengujian kekerasan dengan metode Vickers dilakukan pada sampel yang sudah diratakan terlebih dahulu. Nilai kekerasan yang didapatkan digunakan untuk mendeskripsikan sifat mekanik dari sampel. Pengujian dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM E 384, ASTM E 140.

E. Uji Metalografi

Metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang ada pada sampel. Struktur mikro yang didapatkan kemudian dapat digunakan untuk mendeskripsikan sifat – sifat yang ada pada sampel. Spesimen dipotong menggunakan *jigsaw* dengan kecepatan rendah dan pendinginan untuk mencegah perubahan struktur. Permukaan spesimen kemudian diratakan dan dihaluskan hingga grit 2000, sebelum kemudian dipoles. Spesimen kemudian dietsa menggunakan nital untuk menampakkan struktur mikro pada permukaannya. Struktur mikro diamati dengan menggunakan mikroskop. Pengujian dilakukan dengan mengacu pada ASTM E-03, ASTM E 407.

F. Uji inner dan Eksternal Scale

Scanning Electron Microscope (SEM) digunakan untuk evaluasi struktur mikro karena mempunyai kelebihan, berupa pembesaran yang lebih tinggi dan *focus* yang lebih baik. Pemilihan mode dalam SEM juga memungkinkan pengamatan lapisan oksida akibat korosi atau proses oksidasi dapat diteliti dengan baik. Pengujian dilakukan pada sampel yang telah dipakai (*tube* lama), pada bagian *bore* (dalam *tube*) dan pada bagian luar (*outer surface*) pada sisi *fireside*.

G. Uji Creep/ Stress Rupture

Hasil *Remaining Life Assessment* (RLA) yang dilakukan pada *tube boiler* PLTU Bolok menunjukkan bahwa ketebalan *water wall tube* berada pada nilai dibawah *Minimum Wall Thickness* (MWT). Oleh karenanya dilakukan pengujian untuk mengetahui sisa umur pakai *water wall tube*. Uji *stress rupture* dilakukan pada sampel

waterwall tube eksisting dan *tube* baru PLTU Bolok dengan material SA210 Grade A-1. Pengujian ini dilakukan dengan metode perhitungan *Larson-Miller Parameter* (LMP) untuk mengetahui *stress rupture strength* kedua material tersebut. Pengujian ini merupakan pengujian merusak atau

Destructive Test (DT), dimana material tersebut mendapatkan perlakuan pengujian *creep* secara dipercepat.

Dalam hal ini didasarkan pada asumsi bahwa bahan selama *creep* terjadi dalam proses aktivasi panas yang tetap, tanpa komplikasi perubahan metalurgi. Sesungguhnya asumsi yang digunakan ini tidak benar, akan tetapi jika ditinjau dari sudut teknik hal tersebut dapat dilakukan, namun perlu adanya nilai koreksi [9]. *Larson Miller*

Parameter atau biasa yang disingkat LMP merupakan persamaan yang menggunakan data ekstrapolasi antara waktu dan temperatur. Penggunaan LMP dalam pendekatan sisa umur telah banyak dilakukan oleh peneliti. Bentuk persamaan ini sama dengan hubungan persamaan Larson Miller.

$$LMP = \frac{T(C + \log t_r)}{1000} \quad (3)$$

dimana

LMP : Larson-Miller Parameter

T : temperatur (°K)

C : konstanta dari material melalui hasil pengujian

t_r : waktu (jam)

Prediksi sisa umur pakai diperhitungkan menggunakan kondisi operasi temperatur dan *pressure* pada *wall tube* sebagai berikut:

temperature wall tube : 350°C

Average Operating Pressure : 5,5 MPa

Berdasarkan data tekanan operasi 5,5 Mpa, *hoop stress* yang terjadi pada *tube* dapat ditentukan dengan Persamaan (4):

$$\sigma_{\theta} = \frac{OD \times P \times v}{2 \times t} \quad (4)$$

dimana :

σ_{θ} : Hoop Stress (mm)

P : Rata-rata tekanan operasi (Mpa)

OD : Outside diameter tube (mm)

t : tube thickness (mm)

v : safety factor (1,5)

pengujian-pengujian tersebut diatas dilakukan di beberapa lokasi yang berbeda-beda, yaitu :

- Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Nusa Tenggara Timur
- Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik mesin FTI-ITS
- Laboratorium PT PJB Unit Pelayanan Pemeliharaan Wilayah Timur
- Laboratorium PT PLN (Persero) Puslitbang Ketenagalistrikan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengujian dengan metode *destructive* dan *non destructive test* didapatkan data sebagai berikut :

A. Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan sebagai langkah awal analisa kerusakan dan sebagai dasar penentuan pengujian berikutnya yang harus diambil. Menggunakan kamera digital dengan kapabilitas makro.



Gambar 2. Hasil pengukuran ketebalan dari potongan melintang tube #1 (yang mengalami deformasi/ lama) dan tube #2 (baru)

B. Uji Komposisi Kimia

Dari Tabel 2. Terlihat komposisi yang hampir sama, namun terdapat perbedaan pada kadar karbon. Tube#1 memiliki kadar karbon yang lebih tinggi. Namun demikian dari keduanya masuk dalam ranges yang dipersyaratkan pada ASTM A210 gr.C sebagai tube seamless aplikasi boiler.

Table 2. Komposisi kimia penyusun tube #1 dan tube #2

Sampel	C	Mn	P	S	Si	Fe
Standar	0,27 max	0,93 max	0,035 max	0,035 max	0,10 min	
Tube #1 Lama	0,33	0,39	0,03	0,023	0,17	Balance
Tube #2 Baru	0,28	0,40	0,026	0,017	0,17	Balance

C. Uji Tarik

Pengujian *tensile* dilakukan kepada kedua sampel dengan perulangan masing – masing sebanyak tiga kali. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3. Sifat mekanik yang didapatkan dari pengujian ini masih memenuhi *standard* yang dicantumkan pada ASTM A106 Gr. A1 namun sedikit dibawah ASTM Gr. C. seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Data Average didapatkan dari rata-rata 3 kali pengujian.

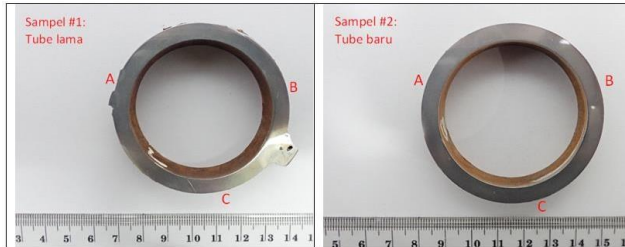
Table 3. Hasil Uji Tarik

Parameter	Average Tube 1 Lama	Average Tube 2 Baru
Gauge Length (l_0)	15.15	15.70667
F_{Yield} (kN)	19.20	23.16667
F_{max} (kN)	29.40	32.66667
Yield Strength (MPa)	307.97	334.03
Tensile Strength (MPa)	471.56	471.03
Elongation (%)	25.00	26.00

Reduction area (%)	49.00	53.00
Modulus young (MPa)	191084,75	208970,24

D. Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada tiga titik, dengan masing – masing titiknya diambil pada bagian luar (L), tengah (T), dan dalam (D), seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *tube* #1 memiliki nilai kekerasan yang dalam rentang yang sama dibanding referensi sampel #2 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.



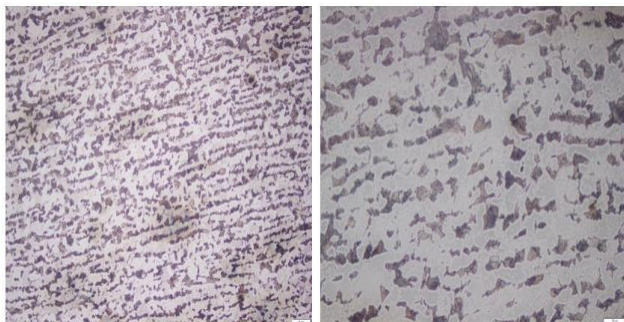
Gambar 3. Titik pengambilan data nilai kekerasan untuk (a) sampel #1 dan (b) sampel #2

Tabel 4. Hasil pengujian kekerasan dalam satuan *Hardness Vickers*

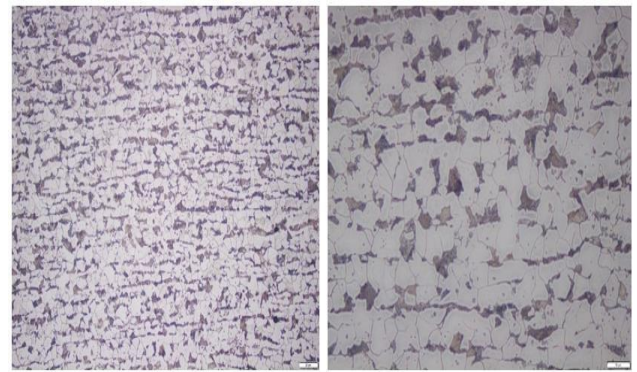
No.	Ket.	Hardness Vickers		
		A	B	C
#1 (<i>Tube lama</i>)	L	149	147	146
	T	141	143	144
	D	140	141	141
#2 (<i>Tube Baru</i>)	L	152	147	152
	T	147	145	147
	D	146	143	143

E. Uji Metalografi

Hasil pengamatan mikrostruktur di bawah mikroskop untuk *tube* #1 ditunjukkan pada Gambar 4 dan untuk *tube* #2 ditunjukkan pada Gambar 5. Struktur mikro baik pada *tube* #1 maupun *tube* #2 merupakan ferrite dan pearlite. Belum ditemukan degradasi struktur mikro sebagaimana tampak pada Gambar 4, dimana pearlite masih berupa *block pearlite* (lamellar). Tampak struktur mikro *tube* lama identik dengan *tube* yang baru, yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Struktur mikro *tube* #1 (lama) yang terdiri dari ferrite dan pearlite. Pembesaran 200x (atas) dan 500x (bawah).

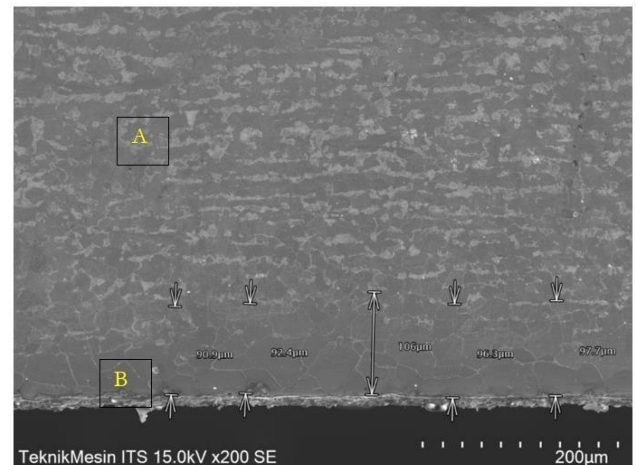


Gambar 5. Struktur mikro *tube* #2 (baru) yang terdiri dari ferrite dan pearlite. Pembesaran 200x (atas) dan 500x (bawah)

F. Uji inner dan Eksternal Scale

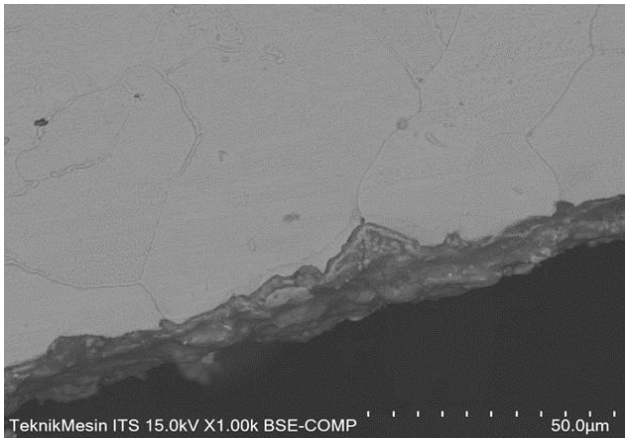
Hasil pengujian SEM pada inner (steam side) ditunjukkan pada Gambar 6 yang mengindikasikan bahwa struktur mikro masih dalam kondisi baik, dimana pearlite masih terlihat baik. Hal ini juga dapat dilihat dari Gambar 9 yang memperjelas pada bagian tengah menunjukkan ferrite

dan pearlite yang masih sangat bagus.

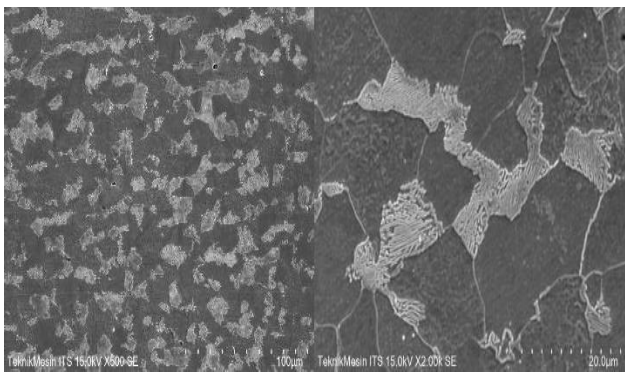


Gambar 7. Struktur mikro dengan pengamatan SEM pada area inner (bore) / steam side

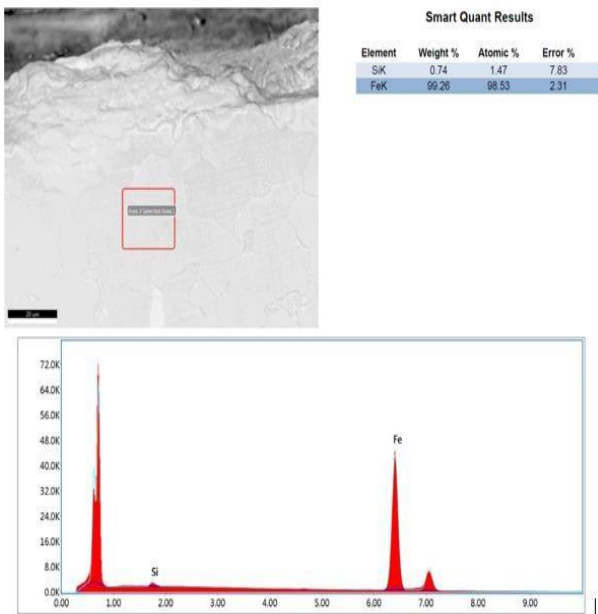
Namun demikian terlihat bahwa, ada area decarburasi sekitar 100 mm pada area area *steam side*. Hal ini juga diperkuat dengan penampakan pada Gambar 8. dibawah, dimana pembesaran dari lokasi B (pada steam side) terdapat oxide scale dengan ketebalan 25 µm.



Gambar 8 Pembesaran dari lokasi B (pada *steam side*) yang menunjukkan ketebalan oxide sekitar 25 μm



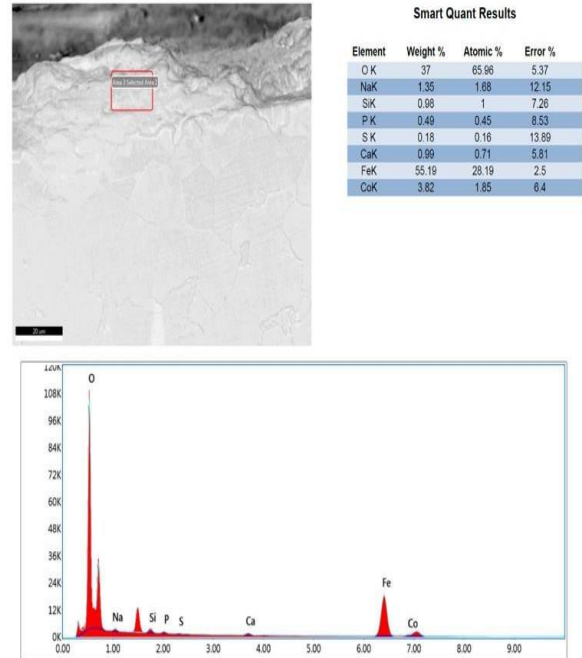
Gambar 9. Struktur mikro baja pada area middle



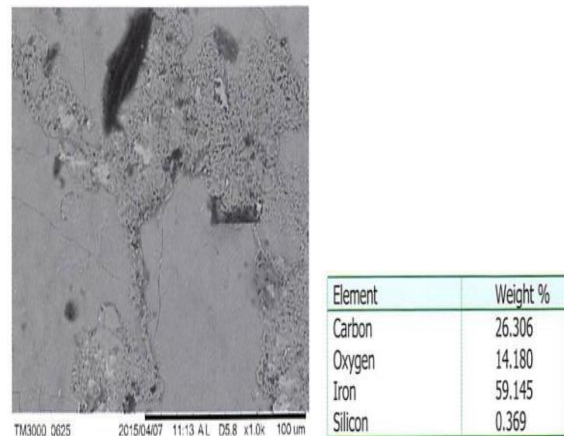
Gambar 10. Hasil pengujian EDS pada lokasi dekat dengan *fire side (outer)* yang menunjukkan komposisi baja

Pada Gambar 10, hasil EDS, baik spektrum dan juga hasil quantifikasi komposisi pada area *fire side*, dimana EDS dilakukan pada titik baja dan juga pada oksida. Terlihat pada daerah baja, komposisi adalah dominant Fe dan sedikit Si sesuai dengan standar baja.

Pada Gambar 11 dibawah, ada beberapa element lain yang muncul namun yang tipikal adalah dari produk korosi temperature tinggi. Jika dilihat dari scale yang muncul, scale tersebut berasal dari oksida besi, proses pembakaran dari beberapa kandungan pasir (SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO), senyawa senyawa ini diduga akibat dari hasil pembakaran batubara yang kurang baik

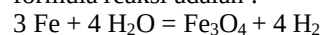


Gambar 11. Hasil EDS pada lapisan oksida yang mengindikasikan produk korosi dan juga deposisi



Gambar 11. Hasil EDS di lokasi baja inner side (*steam side*)

Pada Gambar 11, terlihat dari susunan kimia, deposit yang terbentuk adalah berupa magnetite atau metal oxide dengan formula reaksi adalah :



Reaksi akan dipercepat dengan adanya kenaikan temperatur. Jika kandungan fluida masih terdapat oksigen, maka oksigen tersebut akan berdifusi kedalam lapisan *magnetite* dan atom besi akan menyebar ke luar sehingga *scale* ini akan terus tumbuh bahkan setelah permukaan *tube scale* semuanya. *Magnetite scale* ini bekerja sebagai *Thermal Insulation*, karena konduktivitas *Thermal Scale* ini adalah 5% dari konduktivitas baja tersebut.

G. Uji Creep/ Stress Rupture

Proses pengujian stress rupture dilakukan dengan memberikan tegangan pada spesimen uji pada temperatur yang telah ditentukan. Dalam pengujian, waktu hingga spesimen patah (*time to rupture*) dicatat dan dipergunakan untuk menghitung *Larson Miller Parameter* (LMP). Nilai LMP selanjutnya dapat digunakan dalam perhitungan sisa umur pakai. Pengujian *stress rupture* dilakukan pada spesimen tube eksisting

Tabel 5. Data spesifikasi material uji

No	Tube	Outside diameter (mm)	Thickness (mm)	Ket
1	Lama	60	4,2	Minimal Wall Thickness
			2,18	Pengukuran minimal saat RLA
2	Baru	60	5,0	Tube baru

Nilai diameter (d) merupakan diameter terkecil pada

spesimen yang diukur secara aktual sebelum dilakukan pengujian. Stress (σ) merupakan tegangan yang diberikan pada spesimen, nilai ini didapatkan dari besarnya gaya per satuan luas spesimen yang terkomputasi secara otomatis pada mesin uji *creep*. Temperatur (T) pengujian merupakan temperatur yang diberikan pada spesimen untuk melakukan pengujian dipercepat pada suhu diatas temperatur kerja, variabel ini diinputkan secara langsung dalam mesin. *Time to rupture* (t_r) merupakan waktu yang diperlukan spesimen saat diberikan tegangan dan temperatur hingga putus (*rupture*). *Larson Miller Parameter* (LMP) diperoleh melalui perhitungan dengan Persamaan (i). Dalam perhitungan *Larson Miller Parameter* (LMP) nilai konstanta C pada material SA210 Gr A-1 berdasarkan API 530 / ISO 13704:2001.

$$LMP = \frac{T(C + \log t_r)}{1000} \dots\dots\dots(i)$$

Tabel 6. Data uji stress rupture pada tube eksisting.

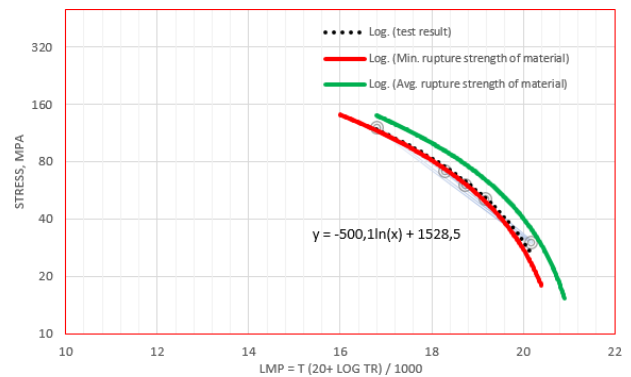
Sample	d (mm)	σ Stress (N/mm ²)	T Temp (°C)	t_r Time to Rupture (h)	LMP Larson Miller Parameter
1	2,57	60,3	630	5,23	18,71
2	2,56	71,6	600	8,60	18,28
3	2,50	30,4	670	23,78	20,16
4	2,53	51,2	630	17,04	19,17
5	2,55	120	550	-	Failed
6	2,51	101	580	-	Failed
7	2,73	-	540	-	Failed
8	2,60	121	540	4,65	16,80

Tabel 7. Data uji *stress rupture* pada tube baru.

Sample	d (mm)	σ Stress (N/mm ²)	T Temp (°C)	t_r Time to Rupture (h)	LMP Larson Miller Parameter
1	2,61	61,9	625	2,37	18,30
2	2,57	30	670	19,93	20,09
3	2,68	71,5	585	18,16	18,24
4	2,68	123	525	41,82	17,25
5	2,69	103	549	45,41	17,80
6	2,60	-	-	-	Failed
7	2,78	81,9	571	33,63	18,17
8	2,64	50,9	617	30,86	19,13

Berdasarkan persamaan (i) estimasi umur sisa tube

diberikan pada R_L . R_L merupakan t_r pada persamaan (i). Untuk mendapatkan R_L , diperlukan nilai LMP pada tekanan operasi aktual. Dengan demikian diperlukan hubungan antara tegangan (*hoop stress*) tube terhadap nilai LMP. Nilai tersebut dihasilkan dari plot nilai tegangan (σ) vs LMP dari Tabel 6 dan Tabel 7. Plot tegangan pada masing-masing tube ditampilkan pada Gambar 12 dan Gambar 13.

Gambar 12. Grafik perbandingan LMP dengan *hoop stress* tube eksisting

Keterangan gambar:

— : Grafik rata-rata rupture strenght material

SA210 Grade A-1

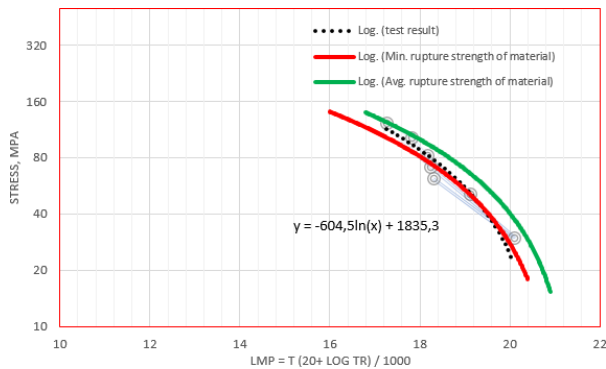
: Grafik Minimum rupture strenght material

SA210 Grade A-1

: Grafik hasil pengujian

Pada grafik perbandingan LMP dengan *hoop stress* pengujian pada tube SA210 Grade A-1 eksisting didapatkan Persamaan (ii) yang dapat digunakan sebagai perhitungan sisa umur dari tube eksisting.

$$y = -500,1\ln(x) + 1528,5 \dots\dots\dots(ii)$$



Gambar 13. Grafik perbandingan LMP dengan *hoop stress* pada *tube* baru.

- : Grafik rata-rata rupture strenght material SA210 Grade A-1
 — : Grafik Minimum rupture strenght material SA210 Grade A-1
 • : Grafik hasil pengujian

Pada grafik perbandingan LMP dengan *hoop stress* pengujian pada *tube* SA210 Grade A-1 baru didapatkan Persamaan (iii) yang dapat digunakan sebagai perhitungan sisa umur dari *tube* baru.

$$y = -604,5\ln(x) + 1835 \quad \dots\dots\dots(iii)$$

H. Prediksi Sisa Umur

Prediksi sisa umur pakai diperhitungkan menggunakan kondisi operasi temperatur dan pressure pada wall tube sebagai berikut:

temperature wall tube : 350°C

Average Operating Pressure : 5,5 MPa

Berdasarkan data tekanan operasi 5,5 Mpa, *hoop stress* yang terjadi pada *tube* dapat ditentukan dengan Persamaan (iv):

$$\sigma_{\theta} = \frac{OD \times P \times v}{2 \times t} \quad (iv)$$

dimana :

- σ_{θ} : *Hoop Stress* (mm)
 P : Rata-rata tekanan operasi (Mpa)
 OD : *Outside diameter tube* (mm)
 t : *tube thickness* (mm)
 v : safety factor (1,5)

Hoop stress berdasarkan data pada Tabel 1 dan Persamaan (iv) tersebut diperoleh sebesar 58,93 MPa untuk *tube* lama dengan *thickness* 4,2 mm, 113,53 Mpa untuk *tube* lama dengan *thickness* 2,18 mm, dan 49,5 Mpa untuk *tube* baru dengan *thickness* 5,0 mm. Setelah diketahui nilai *hoop stress* pada *tube*, nilai LMP dapat ditentukan berdasarkan grafik LMP vs *Hoop Stress* pada Gambar 3 dan Gambar 4 atau dengan memasukan nilai y sebagai *Hoop Stress* pada Persamaan (ii) dan Persamaan (iii), kemudian memasukkan

nilai LMP ke Persamaan (i) untuk mendapatkan nilai *tr* (time to rupture).

Tabel 5. Perkiraan sisa umur pakai tube eksisting

Parameter	Thickness 2,18 mm	Thickness 4,2 mm
y: <i>Hoop stress</i> pada tube (MPa)	113,53	58,93
x: nilai LMP	16,94	18,89
tr :life time (hours)	$1,5 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{10}$
Life time (years)	1905,76	2607246,09

IV. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan dari hasil pengujian adalah sebagai berikut,

1. Terjadi deformasi yang tinggi sehingga *tube* melengkung seperti bergelombang.
2. Akar penyebabnya adalah terjadinya pemanasan yang tinggi sesaat (*short term overheating*) sehingga terjadi pemuatan antara material pipa dengan refractory.
3. *Tube* tersebut masih bisa digunakan / dioperasikan karena Secara properties material masih cukup baik hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian kimia maupun mekaniknya. Hasil uji creep menunjukkan *tube* mempunyai *property creep* yang standar material SA 210, dimana umur wall tube tersebut masih diatas 1900 tahun.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada PT PLN (Persero) Unit Induk Wilayah Nusa Tenggara Timur, Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Laboratorium PT PJB Unit Pelayanan Pemeliharaan Wilayah Timur dan Laboratorium PT PLN (Persero) Puslitbang Ketenagalistrikan atas bantuan pembiayaan, pengujian dan diskusi untuk penelitian kali ini.

REFERENCES

- Arjunwadkar, A., Basu, P., and Acharya, B., 2016, A *Review of Some Operation and Maintenance Issues of CFBC Boilers*, Applied Thermal Engineering, vol.102, pp 672-694.
- Assefinejad, A.H., Kerrmanpur, A., Eslami, A.M., 2021, A *semi- analytical approach on critical thermal states in water tubes of a subcritical drum boiler of a thermal power plant*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol.194, pp 104507
- ASTM E8/E8M-16a : Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials : ASTM International
- ASTM E384-17 : Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials : ASTM International.
- ASTM A210/A210M – 02: Standard Specification for Seamless Medium-Carbon Steel Boiler and Superheater Tubes: ASTM International.
- ASTM E139 – 11: Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials: ASTM International.

- Basu, P., 2015, *Circulating Fluidized Bed Boilers Design, Operation and Maintenance*, Springer, New York.
- Brooks, C. R. & Choudhury, A. 2002, *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York: McGraw Hills
- Chaudhari, P, B., Patil, V.H., and Patil, C.R., 2016, *Case Study on Erosion Failure of CFBC Boiler, International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*, vol. 3, issue 6
- Callister, W. D., and David, G. R., 2008., *Fundamental of Materials Science and Engineering an Integrated Approach.*, John Wiley & Sons. Inc
- Duarte, A, C., Espejo, E., and Martinez, C, J., 2017, Failure analysis of the wall tube of a water-tube boiler, *Engineering Failure Analysis*, vol.72, pp 704-713.
- Jiang, Y., W. Liu., W. Li., Z. Sun., Y. Xin., P. Chen and D. Yun., 2020, *Phase-field Simulation of The Interaction Between Intergranular Voids and Grain Boundaries During Radiation in UO₂*, *Computational Materials Science*.
- Maleque, M. A., and M. S. Salit., 2013, *Materials Selection and Design*, Springer, London
- Meyers, M., and K. Chawla., 2008, *Mechanical Behaviour of Material*, Cambridge university press.
- Otegui, J, L., 2014, *Failure Analysis, Fundamental and Applications in Mechanical Components*, Springer, New York.
- Rao, M, V., Varughese, K, T., and Janardhana, M., 2019, *In-situ Metallography a NDE Tool for Remaining Life Assessment of High Temperature Thick Section Boiler Component*, *NDE*, vol.69, v1.
- Sari, L, N., dan Sutarjo., 2016, Pengaruh Perubahan Mikrostruktur Terhadap Perubahan Kekerasan Radiant Tube yang Telah Beroperasi Sejak 2003, *M.I. Mat.Konst*, Vol.16, hal 37-42
- Tinga, T., 2013, *Principles of Loads and Failure Mechanisms, Applications in Maintenance, Reliability and Design*, Springer, London.
- Wardle, T.J., Babcock., and Wilcox, B., 2000, *Creep-Rupture Assessment of Superheater Tubes Using Nondestructive Oxide Thickness Measurements*, *ICOLM*, Ohio, U.S.A.
- Xu, Q., Cao, T., Yei, F., Li, H., Fang, X., and Zhao, J., 2018, *Creep-Induced Microstructural Evolution in a Nickel-Based Superalloy Designed for Advanced Ultra-Supercritical Boilers*, *Materials Characterization* 139, 311-318

PENULIS:

Halomoan Parningotan T.S
Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah
Mada, Yogyakarta, Indonesia
Email: halomoan@mail.ugm.ac.id

Viktor Malau
Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah
Mada, Yogyakarta, Indonesia
Email: malau@ugm.ac.id

Priyo Tri Iswanto
Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah
Mada, Yogyakarta, Indonesia
Email: priyotri@ugm.ac.id