

PENERAPAN STANDAR UJI TANPA MERUSAK UNTUK MENENTUKAN SISA UMUR PIPA KETEL UAP PADA UNIT PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Supriadi

Abstract

Application of standard for remaining life assessment at boiler tube of steam powered electrical generator unit by non-destructive test (NDT), up to now has been very important. The condition of boiler tube used in electrical generator in Indonesia has reached its design limit and even some of them have replaced. This research used non-destructive test methods by SNI, JIS and API standard and was conducted at boiler unit II in Indonesia, that has already in 25 years operated. This method consists of several technique approaches that are: replica methods (microstructure), hardness test, outside diameter measurement (OD), and wall thickness measurement. After assessment and analysis, the results of non destructive test methods showed that the remaining life of boiler tube is 100.000 to 120.000 operation hours.

Keywords: API, creep meter, boiler, pipe, replica, SNI, life.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga uap merupakan suatu alat yang dapat menghasilkan tenaga listrik dengan mengubah energi panas dalam bentuk gas atau uap menjadi energi listrik. Komponen utama yang digunakan merupakan satu kesatuan yang terdiri dari unit ketel uap, turbin dan generator pembangkit listrik (rotor dan stator). Ketel uap digunakan untuk menghasilkan uap yang akan dipakai untuk memutar turbin, dan putaran ini diteruskan ke generator melalui rotor, sehingga menghasilkan tenaga listrik. Jadi nampak bahwa ketel uap merupakan salah satu alat yang sangat vital untuk menghasilkan tenaga listrik. Pada ketel uap terdapat beberapa komponen yang tersusun menjadi satu kesatuan, mulai dari drum penampung uap (*steam drum*), ruang bakar (*furnace/burner*), pemanas lanjut (*superheater*) dan *economizer* (Gambar 1).

Ketel uap yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap umumnya dirancang sedemikian rupa, sehingga umurnya diharapkan mencapai 300.000 jam operasi atau sekitar 34 tahun.

Semua komponen ketel uap dioperasikan pada suhu tinggi dan tentunya harus dalam kondisi yang aman. Untuk menciptakan suatu keamanan dalam pengoprasian pembangkit listrik, harus dilakukan inspeksi seoptimal mungkin dan berdasarkan pedoman atau batasan-batasan pengoprasian yang telah dibuat atau disain oleh produsen pembangkit listrik tersebut. Komponen ini bila terinspeksi dengan baik, maka kerusakan yang terjadi dapat diketahui secara dini, dan dengan mudah komponen tersebut dapat diganti sesuai dengan ukuran dan spesifikasi teknisnya. Komponen yang beroperasi pada suhu tinggi dan dalam jangka

waktu yang lama, serta adanya faktor lingkungan yang korosif dan tekanan atau tegangan statis maupun dinamis, dapat menyebabkan kerusakan. Jenis-jenis kerusakan tersebut adalah kerusakan akibat *creep*, *fatigue*, penipisan ketebalan akibat korosi, korosi retak tegang, korosi erosi, korosi kapitasi, oksidasi, dekarburisasi, karburisasi, *spherodisasi*, dan lain-lain. Untuk menghindari atau meminimais kerusakan pada ketel uap, maka sebaiknya dilakukan pengkajian sisa umur terhadap semua komponen ketel uap, mulai dari *furnace waterwall*, *economizer*, *primary superheater*, *secondary superheater* dan *steam drum* dengan uji tanpa merusak.

Pengkajian sisa umur dengan teknik uji tanpa merusak terhadap pipa ketel uap yang telah beroperasi dapat dilakukan berdasarkan standar SNI dan API, untuk struktur mikro dengan teknik replika, teknik pengukuran OD dengan *creep-meter*, dan pengukuran sisa ketebalan minimum dari pipa dengan *wall thickness meter ultrasonic system*.

Teknik replika, merupakan salah satu teknik yang dapat digunakan untuk memprediksi sisa umur, melalui pengambilan gambar dalam bentuk struktur mikro pada permukaan bagian luar dari pipa ketel uap atau komponen yang lainnya dengan menggunakan kertas khusus untuk replika. Sebelum pengambilan gambar dilakukan, terlebih dahulu sisi permukaan luar pipa ketel uap dihaluskan dengan menggunakan kertas amplas dari *grade* yang kasar hingga yang terhalus, dan hasilnya harus sehalus permukaan cermin, setelah itu dietsa untuk menampakkan batas dan bentuk butiran. Akhirnya kertas replika yang telah diberi cairan khusus (semacam aseton) dilekatkan pada permukaan tersebut dan ditekan dengan ibu jari.

Hasil replika ini selanjutnya diamati melalui mikroskop optik, dan difoto hingga perbesaran 200 kali. Gambar yang dihasilkan kemudian dibandingkan dengan gambar yang disajikan pada Tabel 1. Gambar tersebut merupakan kelas/stadium kerusakan *creep* berdasarkan standar yang ada.

Teknik pengukuran OD (*creep meter*), merupakan suatu teknik yang dapat digunakan untuk memprediksi sisa umur pipa ketel uap, melalui pengukuran keliling pipa dengan menggunakan *creep-meter* atau *sigmat*. Hasil pengukuran ini digunakan untuk menghitung prosentase besarnya pertambahan keliling pipa yang telah beroperasi, dengan menggunakan rumus berikut ini:

$$E_C = \frac{P_L - P_D}{P_D} \times 100 \%$$

dengan:

E_C : *Expansion Creep*,

P_L : Panjang keliling pipa hasil pengukuran dan diambil yang terpanjang,

P_D : Panjang keliling pipa sebelum digunakan atau dioperasikan.

Nilai *expansion creep*, berdasarkan pengalaman dan kesepakatan POKJA Inspeksi & Korosi semua pabrik pupuk yang terhimpun dalam Asosiasi Produsen Pupuk Indonesia (APPI), serta referensi data *release issued* dari *Foster Wheeler* maksimum 2,5%, artinya bila hasil perhitungan nilai *expansion creep* melebihi 2,5%, maka pipa ketel uap tersebut harus segera di potong atau tidak dapat dioperasikan lagi.

Teknik pengukuran sisa ketebalan minimum dari pipa dengan alat *wall thickness meter ultrasonic system* merupakan salah satu teknik yang dapat digunakan untuk memprediksi sisa umur pipa ketel uap yang telah beroperasi. Berdasarkan rumus yang terdapat pada standar API 530 hal 6, yaitu:

$$t_{min} = (P \cdot OD) / (2\sigma + P)$$

dengan:

t_{min} : Tebal minimum pipa yang diperbolehkan

P : Tekanan operasi yang diijinkan

OD : *Outside diameter*, kondisi masih baru

σ : Tegangan luluh/*yield* minimum

2. TUJUAN PENELITIAN

- Memprediksi sisa umur dari masing-masing komponen ketel uap yang telah beroperasi.
- Memprediksi waktu kerusakan, sehingga berdasarkan informasi tersebut dapat dibuat jadwal inspeksi, perbaikan dan penggantian komponen yang lebih efektif.
- Menjaga sedini mungkin terjadinya kerusakan yang lebih fatal.
- □□□Mengantisipasi kerusakan berikutnya, apabila telah terjadi kerusakan yang lebih awal.

3. OBYEK DAN METODE PENELITIAN

Obyek penelitian ini adalah pipa ketel uap yang dioperasikan sejak tahun 1979-1980 oleh salah satu unit pembangkit listrik yang ada di Indonesia, jadi relatif berumur kurang lebih 25 tahun. Berdasarkan data yang telah dikumpulkan dari unit pembangkit listrik tenaga uap, maka disain operasinya adalah sebagai berikut:

Kapasitas beban : 100 MW

Suhu *main steam* : 510 °C

Tekanan *main steam* : 110 kg/Cm².

Flow main steam /mcr : 400 t/h

Suhu operasi pada *furnace tube* : 335 °C

Suhu operasi pada *economizer tube* : 300 °C

Suhu operasi pada *primary superheater* : 400 °C ÷ 540 °C

Suhu operasi pada *secondary superheater*: 468°C ÷ 560 °C

Adapun jenis bahan dan ukuran dari masing-masing komponen yang digunakan disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan standar JIS yang digunakan, maka komposisi kimia untuk bahan pipa ketel uap, seperti yang tercantum pada Tabel 3.

3.1 *In-situ* Metalografi dengan Teknik Replika

Teknik pengujian ini dilakukan dengan mengambil gambar struktur mikro pada masing-masing pipa ketel uap. Lokasi pengambilan gambar/sampel pemeriksaan harus mewakili keseluruhan pipa dan terletak pada daerah yang kritis (pada belokan pipa, atau daerah yang diperkirakan terjadinya aliran turbulensi). Untuk *in-situ* metalografi pada ketel uap yang ada pada pembangkit listrik tenaga uap, secara rinci dijelaskan berikut ini:

- **Kondisi Lokasi:** bebas dari gas beracun dan kebisingan

- **Lokasi Pemeriksaan:** *tube furnace/water-wall* 10 spot, *tube economizer* 15 spot, *tube primary superheater* 20 spot, *tube secondary superheater* 10 spot dan hasil potongan melintang dan memanjang *tube secondary superheater* 5 spot. Jadi totalnya berjumlah 60 spot.
- **Teknik Pemeriksaan:** diawali dengan pembersihan permukaan pipa dengan menggunakan gerinda tangan, hingga permukaan pipa sehalus permukaan cermin, kemudian dietsa. Akhirnya dengan menggunakan

cairan replika yang ditetaskan pada kertas replika, bentuk struktur mikro pipa yang telah dietsa dipindah ke kertas replika tersebut, yaitu dengan menempel sambil menekan kertas replika dengan jempol tangan diatas permukaan pipa yang telah dietsa. Gambar yang ada pada kertas replika, kemudian diamati dengan mikroskop optik hingga perbesaran 500 kali dan difoto.

Tabel 1. Klasifikasi Stadium Kerusakan Strukturmikro Untuk Bahan Ferit/Pearlite dan Ferit/Bainit Berdasarkan ERA Teknologi

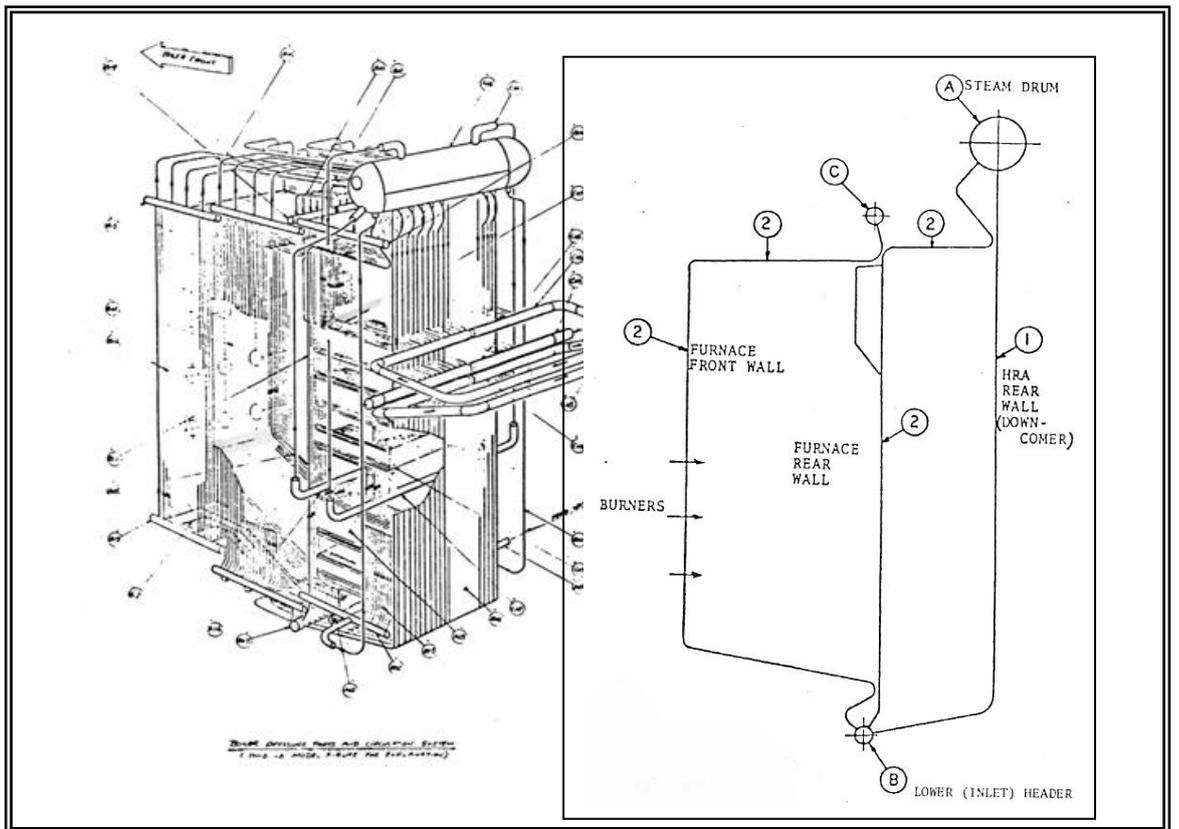
Ferrite/ Bainite						
Ferrite/ Pearlite						
Class/Stadium	A	B	C	D	E	F
Approx. Damage	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	End Of Life
Approx. Life Remaining	100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	None
Nature	No Creep Defect, Ferrite and distinct transformation product	Incipient Spheroidisation and isolated carbide precipitation, notably at grain boundaries	Evident Spheroidisation of transformation product Ferrite and transformation product easily distinguishable	Full Spheroidisation of transformation product. No significant carbide precipitation within ferrite grains	Full Spheroidisation. Carbides evenly dispersed throughout grains and at grain boundaries	Full Spheroidisation. Significant coalescence between carbides
Action	None	Reinspection after Approx. 100.000 service hours	Reinspection after Approx. 50.000 service hours	Reinspection after Approx. 35.000 service hours	Reinspection after Approx. 10.000 service hours	Management must be informed immediately grinding to determine crack depth

3.2 Uji Kekerasan Pada Pipa

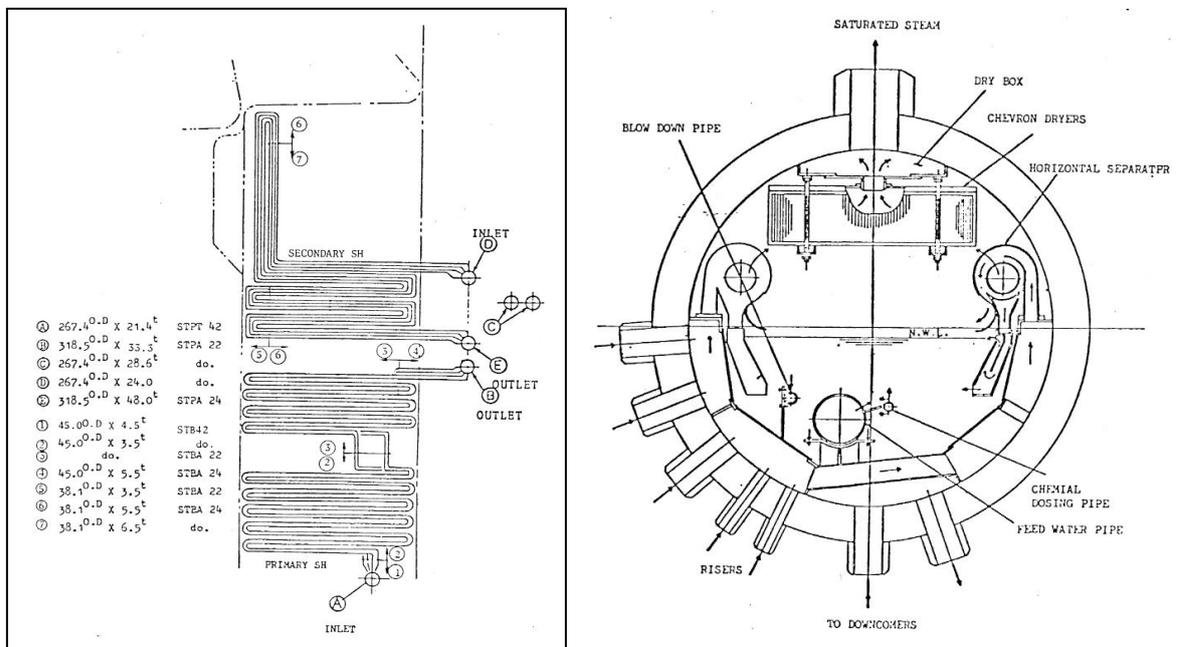
Pada setiap lokasi pipa yang telah di metalografi, juga dilakukan uji kekerasan sebanyak 3 titik. Hasil dari ketiga titik pengujian ini dirata-ratakan untuk menentukan kekerasan pipa pada lokasi pengujian tersebut. Untuk uji kekerasan pada unit pembangkit, secara rinci dijelaskan berikut ini :

- **Kondisi Lokasi:** bebas dari gas beracun dan kebisingan
- **Lokasi Pengujian:** *tube furnace* 30 titik, *tube economizer* 50 titik, *tube primary superheater* 60 titik, *tube secondary superheater* 30 titik dan *steam drums* 20 titik, jadi total uji kekerasan adalah 190 titik uji.

- **Teknik Pemeriksaan:** pada permukaan pipa yang telah di metalografi diletakkan alat uji kekerasan, alat ini kemudian ditekan tombolnya sehingga terjadi pengukuran kekerasan dan langsung terbaca pada layar alat tersebut. Sebelum digunakan alat ini dikalibrasi terlebih dahulu untuk menentukan keakuratannya. Setiap lokasi metalografi diuji 3 titik untuk uji kekerasan.
- **Alat yang digunakan:** *eqoutip hardness tester*, dengan *Indentor D* dan hasilnya dalam HB



Gambar 1 Bentuk Struktur Komponen Ketel Uap yang Ada di Unit Pembangkit Listrik, Nampak Furnace/burner, Economizer, Superheater dan Steam Drum.



Gambar 2 Bentuk Steam Drum dan Susunan Sistem Pemipaan yang pada Primary Superheater dan Secondary Superheater

Tabel 2 Data Ukuran dan Kekerasan Pipa yang Digunakan untuk Ketel Uap

No.	Nama Komponen	OD [mm]	Tebal [mm]	Hardness [HB]	Jenis / Standar Bahan
1.	<i>Furnace / Burner Tubes</i>	63,5	4,0	147	STB42, JIS G.3461
2.	<i>Economizer Tubes</i>	50,8	4,0	145	STB35, JIS G.3461
3.	<i>Primary Superheater Tubes</i>	45,0	4,5	162	STBA24, JIS G.3462
4.	<i>Secondary Superheater Tubes</i>	38,1	3,5	162	STBA22, JIS G.3462
5.	<i>Steam drum :</i>				
	- <i>Tube Plate</i>	1.490	125,0	165	SB49, JIS G.3103
	- <i>Shell Plate</i>	1.525	90,0	165	SB49, JIS G.3103
	- <i>End Plate</i>	1.525	100,0	165	SB49, JIS G.3103

Catatan: Data diambil dari standar JIS dan *Principil Data for Boiler Parts*, di unit pembangkit listrik tenaga uap.

Tabel 3 Data Komposisi Kimia Bahan yang Digunakan untuk Pipa Ketel Uap

No.	Kode Bahan	Kandungan Unsur kimia [%]						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1.	STB42	0,32 maks.	0,35 maks.	0,30 ÷ 0,80	0,035 maks	0,035 maks	---	---
2.	STB35	0,18 maks.	0,35 maks.	0,30 ÷ 0,60	0,035 maks	0,035 maks	---	---
3.	STBA24	0,15 maks.	0,50 maks.	0,30 ÷ 0,60	0,030 maks	0,030 maks	1,4 ÷ 2,6	0,87 ÷ 1,13
4.	STBA22	0,15 maks.	0,50 maks.	0,30 ÷ 0,60	0,035 maks	0,035 maks	0,8 ÷ 1,25	0,45 ÷ 0,65
5.	SB49	0,32 maks.	0,35 maks.	0,30 ÷ 0,80	0,035 maks	0,035 maks	---	---

Catatan: data ini diambil dari standar JIS dan *Principil Data for Boiler Parts*, di unit pembangkit listrik tenaga uap.

3.3 Pengukuran *Outside Diameter* (OD)

Untuk menentukan terjadinya perubahan penampang atau diameter pada pipa yang digunakan pada ketel uap, dibutuhkan adanya pemeriksaan secara acak terhadap pipa yang telah dioperasikan selama ini. Lokasi pemeriksaan dilakukan pada, *tube economizer*, *tube primary superheater*, dan *tube secondary superheater*. Pada *tube furnace waterwall* pengukuran OD tidak dapat dilakukan, sebab masing-masing pipa mempunyai sirip yang saling menyambung dengan yang lainnya.

- **Kondisi Lokasi:** bebas dari gas beracun dan kebisingan

- **Lokasi Pengukuran:** *tube economizer* 60 titik, *tube primary superheater* 25 titik, dan *tube secondary superheater* 50 titik. Jadi total pengukuran OD adalah 135 titik.
- **Teknik Pemeriksaan:** lokasi tube yang akan diukur OD-nya terlebih dahulu dibersihkan dari unsur *scale*/karat dan korosi. Kemudian *sigmat* dan *creep-meter* yang akan digunakan dikalibrasi terlebih dahulu. Setelah itu barulah diadakan pengukuran pada titik yang telah ditentukan dan dibersihkan.

3.4. Pengukuran Ketebalan Dinding Pipa (*Wall Thickness*)

Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan alat *ultrasonic*, akan tetapi sebelum pengukuran, kondisi pipa yang akan diukur harus dalam kondisi bersih, tanpa kerak (*scale*) dan gejala korosi yang terjadi/melekat pada bagian luar dari pipa. Pemilihan lokasi pemeriksaan dilakukan pada daerah-daerah yang benar-benar dianggap kritis. Untuk pengukuran ketebalan dinding pipa pada ketel uap, secara rinci dijelaskan berikut ini:

- **Kondisi Lokasi:** harus bebas dari gas beracun dan kebisingan
- **Lokasi Pengukuran:** *tube furnace* 60 titik, *tube economizer* 130 titik, *tube primary superheater* 125 titik, *tube secondary superheater* 110 titik dan *steam drum* 30 titik, jadi jumlah keseluruhan 425 titik pengukuran.
- **Teknik Pemeriksaan:** permukaan pipa arah *circumferential* yang akan diukur ketebalannya terlebih dahulu dibersihkan dari *scale*/kerak yang melekat dengan menggerinda atau dengan sikat besi hingga permukaan pipa kelihatan mengkilap/bersih. Setelah itu diletakkan *probe alat Wall Thickness Meter* pada permukaan pipa tersebut, kemudian secara otomatis ketebalan pipa terbaca pada layar alat tersebut. Sebelum alat ini digunakan terlebih dahulu dikalibrasi untuk menentukan keakuratan data yang dihasilkan. Alat ini menggunakan sistem *ultrasonic*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk pengambilan sampel *insitu* metalografi nampak pada Gambar 3 kiri atas. Pada Gambar 3 tengah atas disajikan bentuk struktur mikro pipa pada lokasi *secondary superheater* yang masih baru, bentuk struktur mikro yang diperbesar hingga 500 kali, adalah struktur ferit dan perlit, karena belum nampak adanya bentuk *spherodisasi* pada batas butiran, maka hal ini menunjukkan bahwa bahan tersebut masih baru.

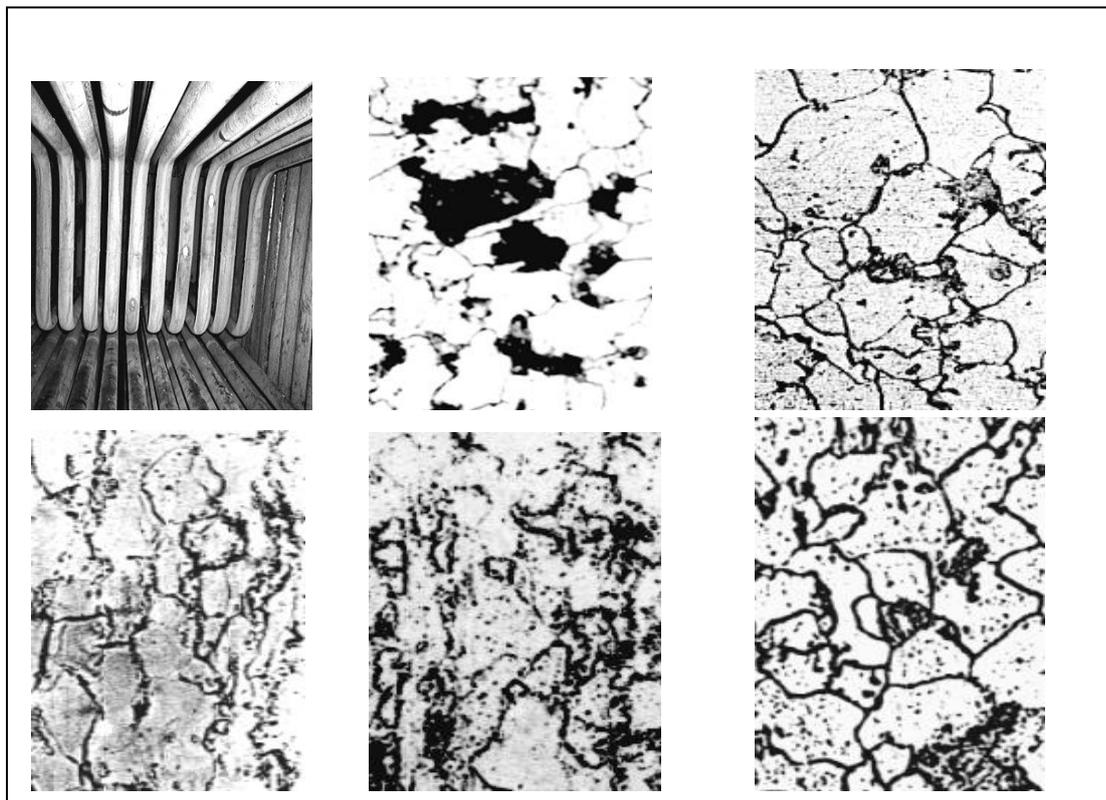
Pada Gambar 3 kanan atas dan kanan bawah disajikan bentuk struktur mikro pipa pada lokasi *furnace waterwall/burner* dan *secondary superheater*, bentuk struktur mikro yang diperbesar hingga 500 kali, nampak bentuk

spherodisasi pada batas butiran, hal ini menunjukkan bahwa *morphology* struktur pearlite yang semula berbentuk *lamellar* (memanjang) telah berubah menjadi bentuk *spherodisasi* yang *globular* (bulat) dan tersebar merata pada batas-batas butiran sehingga berdasarkan Tabel 1 dari ERA *Technology*, bentuk struktur ini merupakan bentuk yang diklasifikasikan telah berada pada *stadium/class C*, artinya prakiraan kerusakan struktur mikro telah berada pada batas 40% rusak.

Pada Gambar 3 kiri dan tengah bawah disajikan bentuk struktur mikro pipa pada lokasi *economizer* dan *primary superheater*, bentuk struktur mikro yang diperbesar hingga 500 kali. nampak bentuk *spherodisasi* pada batas butiran sudah menyebar keseluruh arah dan sudah tidak nampak adanya perlit, hal ini menunjukkan bahwa *morphology* struktur *pearlite* yang semula berbentuk *lamellar* (memanjang) telah berubah menjadi bentuk *spherodisasi* yang *globular* (bulat) dan tersebar merata pada batas-batas butiran, sehingga berdasarkan Tabel 1 dari ERA *Technology*, bentuk struktur ini merupakan bentuk yang diklasifikasikan telah berada pada *stadium/class D*, artinya prakiraan kerusakan struktur mikro telah berada pada batas 60% rusak.

Dari hasil analisis diatas menunjukkan bahwa kondisi yang kritis berada pada lokasi *economizer* dan *primary superheater* dengan faktor sisa umur berkisar 40% dari umur disainnya (300.000 jam), atau sekitar 120.000 jam, dengan catatan bahwa *boiler* tersebut harus di inspeksi ulang maksimal 4 tahun mendatang (35.000 jam), lihat Tabel 1 dalam *baris action*.

Hasil uji kekerasan untuk pipa *burner/furnace* yang diuji sebanyak 30 lokasi titik pengujian yang berbeda, nampak nilai terendah kekerasannya 113,5 HB dan yang tertinggi 132,5 HB, bila dirata-ratakan maka kekerasannya menjadi 123,0 HB, sedangkan berdasarkan standar JIS G.3461 (lihat Tabel 1), nilai kekerasan *tube furnace waterwall* adalah 147 HB. Jadi terjadi penurunan kekerasan sebesar 16,32%.



Gambar 3 Bentuk Susunan Pemipaan pada Lokasi *Primary Superheater* di Ketel Uap, dan Bentuk Struktur Mikro Hasil *In-Situ* Metalografi untuk Masing-Masing Pipa yang Diperbesar 500 Kali dengan Etsa Nital 5%

Hasil pengukuran outside diameter pada *tube economizer* yang diukur ada sebanyak 60 titik (lantai/bagian bawah dan atas) OD yang terbesar adalah 51,6 mm, sedangkan OD tube economizer awalnya hanya 50,8 mm, jadi terjadi penambahan diameter sebesar 1,575%. Pada *tube primary superheater* yang diuji sebanyak 25 titik, OD yang terbesar adalah 45,035 mm, sedangkan OD *tube primary superheater* awalnya hanya 45,0 mm, jadi terjadi penambahan diameter sebesar 0,08%. Pada *tube secondary superheater* yang diuji sebanyak 50 titik (lantai/bagian bawah dan atas), OD yang terbesar adalah 38,45 mm, sedangkan OD *tube economizer* awalnya hanya 38,1 mm, jadi terjadi penambahan diameter sebesar 0,92%. Dari ketiga komponen yang diukur, nampak bahwa *tube economizer* telah mengalami perubahan penampang yang paling besar, akan tetapi masih dibawah dari standar yang dipersyaratkan oleh *Foster wheeler* yaitu maksimal 2,5%. Jadi sisa umur berdasarkan hasil pengukuran OD adalah 37,0% dikalikan dengan umur disain 300.000 jam adalah 111.000 jam atau sekitar 12,67 tahun.

Untuk menentukan tebal minimum masing-masing pipa yang digunakan pada komponen

ketel uap, maka hasilnya harus berdasarkan perhitungan dengan menggunakan rumus yang tercantum pada Rumus 2 dan membandingkan dengan data-data yang tercantum pada "*principil data for boiler parts*" yang ada pada unit pembangkit listrik (Tabel 2), sehingga tebal minimum dari pipa untuk masing-masing komponen, yaitu untuk *tube furnace/waterwall*, yang di disain dengan OD = 63,5 mm dan bahan tipe STB42 ($\sigma = 225$ Mpa), tebal minimum yang dipersyaratkan adalah $t_{min} = 1,5$ mm. Sedangkan berdasarkan hasil pengukuran pada pipa *furnace waterwall/burner* ketebalan rata-rata pada sisi bawah 4,55 mm, pada bagian atas dari burner 4,53 mm, sisi antara dua buah lubang burner 4,61 mm, bagian tengah 4,14 mm, bagian bawah 4,13 mm, samping kiri bagian dasar burner 4,14 mm dan pada bagian tengah 4,135 mm. Jadi kondisi *tube furnace* bila ditinjau dari segi ketebalan masih cukup aman. Untuk *tube economizer*, yang di disain dengan OD = 50,8 mm dan bahan tipe STB 35 ($\sigma = 175$ Mpa), tebal minimum yang dipersyaratkan adalah $t_{min} = 1,52$ mm. Sedangkan berdasarkan hasil pengukuran pada *tube economizer* ketebalan rata-rata pada sisi barat bagian atas (*elbow*) 4,40

mm, sisi barat bagian bawah (*elbow*) 4,275 mm, sisi barat bagian atas lurus 4,475 mm, sisi barat bagian bawah lurus 4,45 mm, sisi timur bagian atas (*elbow*) 4,512 mm, sisi timur bagian bawah (*elbow*) 4,385 mm dan sisi timur bagian bawah lurus 4,448 mm. Jadi kondisi *tube economizer* bila ditinjau dari segi ketebalan masih cukup aman. Untuk *tube primary superheater*, yang di disain dengan OD = 45,0 mm dan bahan tipe STBA 24 ($\sigma = 205$ Mpa), tebal minimum yang dipersyaratkan adalah $t_{min} = 1,115$ mm.

Sedangkan berdasarkan hasil pengukuran pada *tube primary* ketebalan rata-rata pada sisi barat bagian atas (*elbow*) 4,08 mm, sisi barat bagian bawah (*elbow*) 4,410 mm, sisi barat bagian timur tengah lurus 4,412 mm, sisi barat bagian timur tengah *elbow* 4,52 mm, dan bagian bawah datar lurus 4,44 mm. Jadi kondisi *tube furnace* bila ditinjau dari segi ketebalan masih cukup aman. Untuk *tube secondary superheater*, yang di disain dengan OD = 38,1 mm dan bahan tipe STBA 22 ($\sigma = 205$ Mpa), tebal minimum yang dipersyaratkan adalah $t_{min} = 0,98$ mm. Sedangkan berdasarkan hasil pengukuran pada *tube secondary superheater* ketebalan rata-rata pada sisi barat bagian atas (*elbow*) 3,39 mm, sisi barat bawah lurus (baru) 3,53 mm, sisi barat lurus 3,56 mm, sisi barat bagian bawah *elbow* 3,35 mm, bagian timur atas *elbow* 3,53 mm, dan bagian timur bawah *elbow* 3,41 mm. Jadi kondisi *secondary superheater* bila ditinjau dari segi ketebalan masih cukup aman.

Hasil analisis diatas menunjukkan bahwa struktur mikro pada pipa ketel uap yang paling kritis ada pada daerah *economizer* dan *primary superheater*, karena strukturnya menunjukkan bahwa *morphology ferrite-pearlite* awal telah berubah menjadi bentuk *ferrite-spherodized pearlite*. Kondisi struktur mikro tersebut diikuti dengan terjadinya penurunan kekerasan dan perubahan diameter luar (OD) sebesar 1,575% dari batasan 2,5% yang dipersyaratkan oleh *Foster wheeler*.

Berdasarkan pengalaman secara empiris dapat diperkirakan bahwa kekuatan bahan pipa telah menurun sebanding dengan penurunan kekerasan dan bertambahnya ukuran diameter luar. Dengan mengacu pada tabel standar struktur mikro, maka kondisi bahan pipa yang paling kritis telah berada pada kerusakan "*creep*" stadium/class D (Tabel 1). Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa ketebalan pipa ketel uap tidak mengalami penipisan yang berarti dan ketebalan pipa tersebut masih dalam batas toleransi yang diijinkan oleh disainnya. Prakiraan sisa umur pipa ketel uap dilakukan dengan mengambil referensi hasil penelitian yang

khusus digunakan untuk pembangkit listrik (Tabel 1) dengan tipe bahan adalah baja karbon rendah dan baja chrom molybden. Berdasarkan referensi tersebut dan hasil pengujian/-pemeriksaan berupa perubahan bentuk struktur mikro, penurunan nilai kekerasan, perubahan ukuran diameter luar dari pipa ketel uap, dan ketebalan, maka "*Life expectancy*"nya berkisar antara 100.000 jam hingga 120.000 jam, sehingga dengan kondisi operasi seperti dalam disain, sistem peralatan tersebut mempunyai probabilitas yang cukup besar untuk *safe* (aman) sampai overhaul berikutnya dan pada saat itu perlu lagi dilakukan "*life assessment*" berikutnya, sebab kondisi operasi yang terjadi belum tentu "*smooth/lanca*r" seperti tahun-tahun sebelumnya atau yang dipersyaratkan dalam disainnya.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil pengujian/penelitian yang telah dibahas pada pembahasan terdahulu, maka dapat disimpulkan bahwa:

- Sisa umur pipa ketel uap yang ada pada pembangkit listrik tenaga uap ini diperkirakan antara 100.000 jam hingga 120.000 jam, dengan catatan bahwa kondisi operasi berikutnya tidak jauh berbeda dengan kondisi sebelumnya dan harus berdasarkan *Standard Operational Procedures* (SOP)
- Jadwal inspeksi atau *overhaul* berikutnya maksimal 4 tahun mendatang dan sebaiknya dilakukan kembali pengkajian sisa umur, mengingat faktor lingkungan dan kondisi operasi belum tentu sama persis dengan 4 tahun sebelumnya.
- Pipa ketel uap yang terdapat pada *furnace water wall/burner, economizer, primary superheater* dan *secondary superheater*, prakiraan sisa umurnya berbeda-beda dan yang paling kritis dari yang lainnya adalah *tube economizer* dan *primary superheater*.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak DR. Ir. Tri Wibowo, MSc, Bapak Dr. Ir. Amin Suhadi, MSc, dan Bapak Ir. Ilham Hatta, MT. APU, yang telah memberikan kesempatan kepada kami untuk menulis makalah ini. Disamping itu juga kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak PT. PLN dan PT. Surveyor Indonesia yang telah

membantu kami menyiapkan lokasi pengujian dan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. French, D.N. November, 1992. *"Metalurgical Failures in Fossil Fired Boilers"*, John Wiley & Sons, Inc, Second Edition, Northborough, Massachusetts
2. API Recommended Practice 530, 1978. *"Recomemended practice for calculation of heater tube thickness in petroleum refineries. Washington, D.C."*
3. C.Castrani, D. D'angelo, C. Michelizzi, *"Methods For Remaining Life Prediction of Steam Pipes and Boiler Tubes"*, Italy.
4. B.J. Cane and John W., September 1992. *"Remanent Life Assesment*

Seminar", ERA Techonology Leatherhead-UK 22/23, .

5. Viswanathan, R. 1989. *"Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components"*, ASM International, Metals Park, Ohio 44073, USA
6. YIN, PT. Agustus 1999. "Laporan Hasil Turn Around (TA) 1999 di Pertamina UP-VI Balongan", Cirebon, Jawa Barat
7. JIS Handbook. 1998. G.3456, G.3461, G.3103 and G.3462, *"Ferrous Materials & Metallurgy II, Carbon Steel and Molybdenum Alloy Steel Plates & Pipes for Boiler and Other Pressure Vessel"* Japanese Standards Association, Tokyo Japan.

BIODATA

Supriadi, menyelesaikan pendidikan S1 Teknik Fisika Jurusan Instrumentasi. Sejak tahun 2005 sampai sekarang, penulis adalah peneliti bidang Material dan Metalurgi pada Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS), BPPT.