

## Analisa Kerusakan Pipa *Boiler Supercritical*

Mochamad Nanchy Chudhoifah<sup>1,a)</sup>, Dwita Suastiyanti<sup>2,b)</sup>, Pathya Rupajati<sup>3,c)</sup>

<sup>1</sup>PT. Bhimasena Power Indonesia PLTU 2x1000 MW,  
Jl. Raya Bakalan-Ujungnegoro Km. 5, Kecamatan Kandeman, Kabupaten Batang, Jawa Tengah, Indonesia, 51261

<sup>2,3</sup>Program Studi Teknik Mesin ITI,  
Jl. Raya Puspipetek Serpong, Tangerang Selatan-Banten, Indonesia, 15320

<sup>a)</sup>mnanhyc@gmail.com, <sup>b)</sup>dwita\_suastiyanti@iti.ac.id, <sup>c)</sup>pathya.rupajati@iti.ac.id.

### Abstrak

*Boiler* adalah alat yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap dengan cara dipanaskan menggunakan batubara sebagai bahan bakar utama. Pada pembangkit listrik tenaga uap dengan menggunakan *Boiler Supercritical* berkapasitas 660 MW, temperatur uap 566 °C dan tekanan 240 bar memiliki pipa di area *final superheater* dengan jenis material SA213 – T91. Pada saat unit start up, pipa di area *final superheater* mengalami kebocoran sehingga pipa menjadi pecah. Pecahnya pipa menyerupai mulut ikan, hasil analisa penyebabnya kemungkinan karena *Short Term Temperature*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penyebab kerusakan pipa Boiler dengan beberapa metode penelitian. Melalui uji metalografi ditemukan adanya rongga-rongga dan retak pada struktur mikro, kemungkinan karena pengelupasan lapisan magnetik didalam pipa. Untuk itu pengoperasian *Boiler* harus memperhatikan kenaikan metal temperatur tidak boleh melebihi 2°C/menit agar tidak terjadi pengelupasan lapisan magnetik pada pipa *Boiler*.

**Kata kunci:** SA213-T91, retak, superheater.

### Abstract

*Boilers* are tools used to convert water into steam by heating using coal as the main fuel. In steam power plants using supercritical *Boiler* with a capacity of 660 MW, steam temperatures of 566 °C and pressure of 240 bar have pipes in superheater final area with material type SA213 - T91. When start of the unit, the pipe in the Final superheater area has leaked so that the pipe was rupture. The rupture of a pipe like a fish's mouth, the results of the analysis cause may be due to *Short Term Temperature*. This research to determine cause of *Boiler* pipe damage with several research methods. Through metallographic tests it was found that there were cavities and creeps on the microstructure, possibly due to the peeling of the magnetic layer in the pipe. For this reason, the operation of the *Boiler* must pay attention to the increase in metal temperature should not exceed 2 °C / minute so there is no exfoliation of the magnetic layer in the *Boiler* pipe.

**Keywords:** SA213-T91, creep, superheater.

### I. PENDAHULUAN

PLTU batubara dengan teknologi *Boiler Supercritical* yaitu dalam proses pembentukan uap didalam *boiler* tidak memerlukan *steam drum*, hal ini dikarenakan air didalam pipa *Boiler* setelah menyerap panas maka langsung berubah menjadi uap kering dengan temperatur *superheat* di atas saturasi. Pada kondisi ini *boiler* dalam keadaan *once through* (lalu-lalang).

Setiap *Boiler Supercritical* akan di operasikan, maka memerlukan tahap-tahap pembersihan di seluruh bagian pipa yang ada di *condenser*, *condensate*, *low pressure heater*, *deaerator*, *feedwater*, *high pressure heater*, dan *boiler*. Proses ini dinamakan *clean up*, tujuannya adalah untuk membersihkan seluruh pipa yang dialiri air dan uap dari kandungan besi yang berlebih. Oleh karena itu pada *Boiler supercritical* memerlukan perlakuan yang lebih dari pada *Boiler Subcritical*.

Proses *start up boiler* memiliki batasan-batasan kenaikan metal temperatur pada saat pertama kali bahan bakar di masukkan. Hal ini bertujuan agar material tidak mengalami kerusakan. Beberapa jenis kerusakan yang

terjadi pada pipa *boiler*, mulai dari *economizer*, *wall tube*, *Superheater* dan *Reheater*. Kerusakan tersebut diantaranya *creep*, *fatigue*, *erosion*, *cracking* dan korosi di sisi pembakaran.

Permasalahan ini terjadi di salah satu PLTU swasta dengan *Boiler Supercritical* dengan kapasitas 660MW, dimana pada saat unit start up dan sudah mencapai 50% kapasitas *boiler* telah terjadi kebocoran pada pipa *boiler* di area *Final Superheater*.

Umur pakai *boiler* tergolong masih baru karena baru beroperasi kurang dari 1 tahun, untuk itu penelitian ini dilakukan dengan cara pengamatan visual pada pipa *boiler* di area *Final Superheater*, pengukuran ketebalan pipa, pengukuran diameter pipa sisi luar dan dilakukan pemeriksaan di laboratorium diantaranya pemeriksaan secara visual, pemeriksaan dengan menggunakan metalografi untuk mengetahui struktur mikro dan *hardness test*.

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penyebab utama kerusakan pada pipa *boiler* di area *Final Superheater*, dimana seharusnya pada kondisi *boiler* yang

umurnya masih baru (kurang dari 1 tahun) masih dalam kondisi yang bagus, handal dan masih bisa digunakan untuk waktu yang lama.

Sulistiyono E. dan Mahdy N.N. pada tahun 2016 melakukan penelitian dengan judul “Analisis pecahnya material *secondary superheater tube* pada boiler unit 1 PLTU Tanjung Jati B kapasitas 660 MW”. Hasil pemeriksaan struktur mikro *Secondary Superheater tube* terlihat bahwa telah mengalami transformasi fasa material (*spheroidisasi*) akibat *overheating*. Hasil pengujian kekerasan, pucak tertinggi mencapai 225 HV pada daerah uji no. 2 yaitu bagian *tube* yang mengalami kegagalan walaupun kekerasannya masih di bawah standar kekerasan material SA 213-T91. Hasil pengujian SEM dan EDX menunjukkan bahwa kandungan unsur deposit yang berada pada *outer secondary superheater tube* berupa sulfur, sodium, potassium, dan magnesium. Unsur ini kemungkinan terbentuk akibat udara yang mengandung mineral masuk dalam sistem pembakaran Boiler yang melebihi suhu *ash fusion temperature* [1].

Rahman M.M. dan Kadir A.K. pada tahun 2011 melakukan penelitian dengan judul *Failure analysis of high temperature superheater tube (hts) of a pulverized coal-fired power station*. Analisis kegagalan pipa *superheater* temperatur tinggi dari pembangkit listrik tenaga uap dilakukan melalui inspeksi visual, pengukuran ketebalan, dan pemeriksaan metalurgi. Ditemukan bahwa kegagalan pipa *superheater* disebabkan oleh pengelasan logam yang berbeda di mana sifat termal dari logam induk dan logam las berbeda [2].

Adrian J., Laif N., Noerochim L. Dan Kurniawan B.A. pada tahun 2016 melakukan penelitian dengan judul “Analisa kerusakan *superheater tube boiler* tipe ASTM A213 grade T11 pada pembangkit listrik tenaga uap”. Hasil analisis metalografi pada daerah yang tidak mengalami kegagalan, fasa yang tampak merupakan *ferrit* dengan diameter rata-rata butir sebesar 0,0213 mm dan memiliki kekerasan sebesar 52 HRB, pada tepi pipa yang pecah fasa yang tampak pada metalografi juga merupakan *ferrit* dengan rata-rata diameter butir sebesar 0,02357 mm dan memiliki kekerasan sebesar 49 HRB. Pada daerah yang mengalami kerusakan didapatkan bahwa fasa yang tampak merupakan ferit dengan rata-rata diameter sebesar 0,0308 mm dengan kekerasan sebesar 25,5 HRB. Pada hasil SEM terlihat adanya *crack* dan berkas patahan berupa *granular* [3].

Fahrizal pada tahun 2013 melakukan penelitian dengan judul “Analisa penyebab kegagalan pipa *superheater boiler*”. Nilai kekerasan antara bagian permukaan pada posisi didekat bagian yang gagal dengan di posisi yang tebal, nilainya berbeda sangat signifikan. Perubahan nilai kekerasan di bagian dekat yang gagal karena dibagian permukaan terjadi *super heat location* diakibatkan adanya *internal scale* atau deposit, akibat reaksi antara uap air dengan pipa membentuk besi oksida. Model gagalnya pipa *Superheater* tersebut adalah *Creep* akibat beroperasi pada temperatur dan tekanan yang tinggi (*overheating*) dengan waktu operasi yang lama dan diikuti pelunakan (*annealing*) sehingga terjadi erosi oleh fluida dalam pipa yang menyebabkan penipisan pada pipa hingga pipa tidak bisa menahan beban kerja dan terjadi kegagalan (*Failure*). Kekerasan menurun secara signifikan di bagian pipa,

karena adanya pengaruh aging dan erosi akibat fluida mengalir dengan temperatur tinggi dibuktikan dengan pengurangan tebal pipa. Dari pengamatan struktur mikro tampak adanya perubahan bentuk butir *ferrit* dan *pearlite* menjadi pipih diposisi bagian dekat yang gagal, dibanding dengan diposisi yang tebal, bentuk butir ferit dan perlit bentuknya hampir bulat [4]

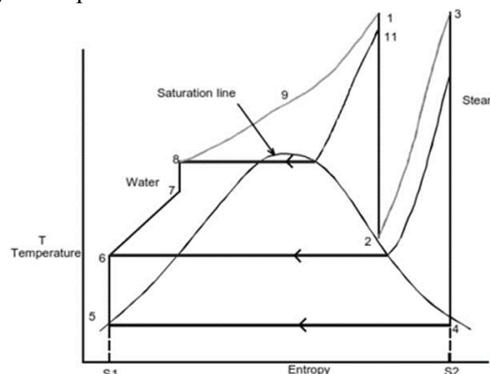
Sariyusda, Bustamisyam, dan Indra pada tahun 2012 melakukan penelitian dengan judul “Analisa kegagalan *tube superheater package boiler* akibat *overheating*”. Hasil analisis tegangan menunjukkan terjadi panas yang berlebih (*overheating*) pada *tube superheater*. Hasil analisis tegangan menunjukkan tegangan izin *tube* lebih kecil dari tegangan yang terjadi, sehingga *tube* dikatakan pecah/gagal. Hasil pengamatan visual *tube superheater* memperlihatkan terjadi mengembung (*bulging*) dan mulut ikan (*fish mouth*); Panjang 45 mm, lebar rata-rata 10,025 mm dan diameter 46,75 mm, pertambahan diameter 2,26 mm. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan material terjadi deformasi pada daerah yang pecah, ini menandakan bahwa kekuatan material menurun dengan kenaikan kekerasan. Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan kandungan unsur kimia yang diizinkan masih dalam batas standar material SA-213. Hasil pengujian SEM menunjukkan bahwa mikrostruktur terjadi dislokasi pada batas butir dimana pecah secara intragranular dengan perpatahan *brittle* [5].

Pada penelitian ini yaitu pada pipa *Boiler Superheater* yang mengalami kerusakan pada saat unit *start up*, dimana kerusakan-kerusakan diataranya karena perubahan temperatur yang berlebih (*overheating*).

## II. LANDASAN TEORI

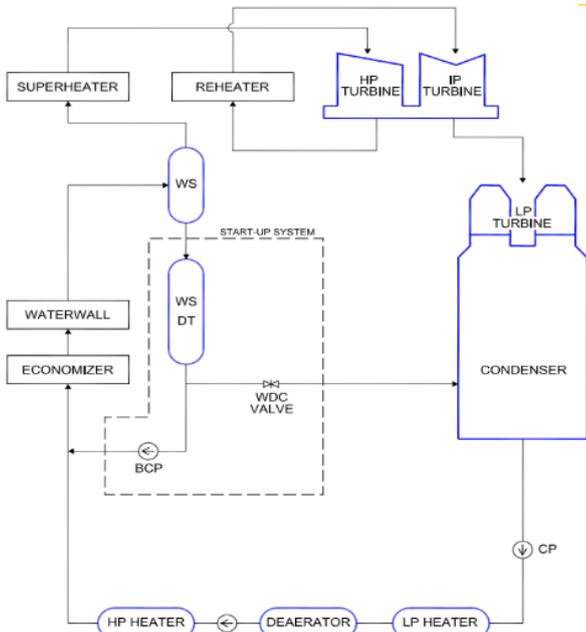
### A. Boiler Supercritical

*Boiler Supercritical* adalah boiler yang merubah air menjadi uap (*Once-through boiler*). Air dipanaskan pada tekanan konstan diatas tekanan kritis sehingga tidak ada perbedaan antara gas dan cair, karena densitas massanya sama. Pada *Boiler Supercritical* tidak ada tahapan air berada dalam dua fasa yang membutuhkan separasi. Sehingga boiler tidak dilengkapi dengan *steam drum*. *Boiler Supercritical* menggunakan boiler sekali lalu yaitu air umpan yang dipompa oleh *boiler feed pump* hingga air dapat melalui tahapan pemanasan di boiler dan uap yang dihasilkan langsung dikirim ke turbin uap tanpa adanya resirkulasi. Berikut ini adalah diagram Ts *supercritical* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Temperatur Entropi PLTU Supercritical.

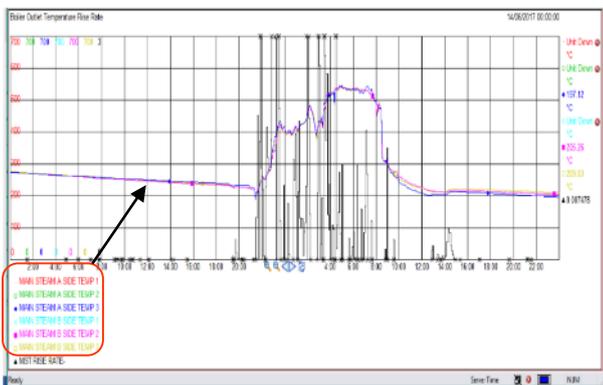
Uap yang dihasilkan melebihi tekanan dan temperatur kritis, dimana pada diagram *rankine* disebut *critical point* yaitu pada tekanan 221,2 bar dan temperatur 374,15 °C. Diagram temperatur-entropi (diagram Ts) menunjukkan kondisi temperatur terhadap perubahan keadaan energi yang melalui boiler dan turbin. Berikut ini adalah Siklus Uap Boiler Supercritical ditunjukkan pada Gambar 2.



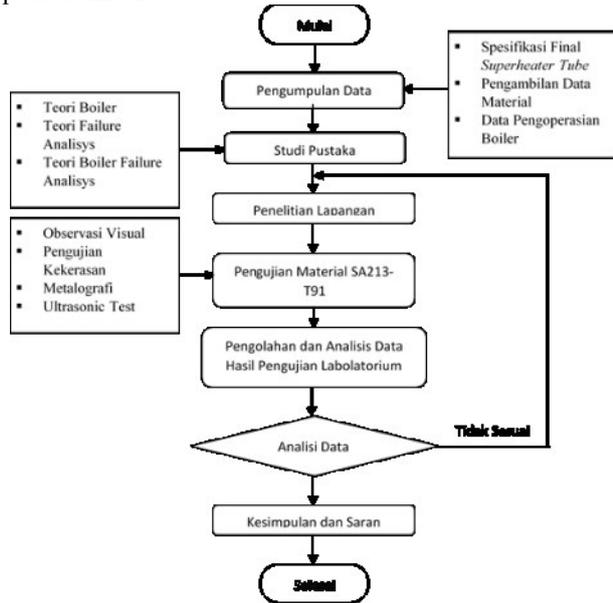
Gambar 2. Siklus Uap Boiler Supercritical

B. Pengoperasian Boiler

Pengoperasian boiler dilakukan setelah ada perbaikan di jaringan 500 kV. Peralatan yang dioperasikan pertama adalah Air & Gas System yaitu untuk membuang gas-gas yang mudah terbakar didalam boiler, yaitu dengan mengatur aliran udara dan kevacuman didalam boiler. Kenaikan temperatur di Superheater rata-rata +1,16 °C/min dan di Final Superheater metal rata-rata +1°C/min. Bahan bakar batu bara digunakan untuk menggantikan Solar. Pergantian bahan bakar ini menyebabkan kenaikan rata-rata temperatur di Final Superheater metal yaitu +3,36 °C/min (tertinggi 5 °C/min). Grafik boiler start up ditunjukkan pada Gambar 3.



sampai dengan akhir. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Diagram Alir Penelitian.

### B. Langkah Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini menerapkan tahapan-tahapan proses yang harus dilakukan sebagai penunjang. Tahapan dalam pelaksanaan penelitian ini meliputi persiapan alat kerja dan persiapan bahan, pengujian yang dilakukan di dalam boiler yaitu menentukan pipa-pipa yang telah rusak dan mengalami sumbatan.

### C. Spesifikasi Benda dan Alat Uji

Spesifikasi benda uji yang digunakan adalah Material pipa Boiler dengan tipe SA213-T91. Komposisi kimia pipa SA213-T91 dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Spesifikasi Material SA213-T91

No	Komposisi Kimia	Keterangan
1	Carbon	0.07-0.14
2	Manganese	0.30-0.60
3	Phosphorus	0.020
4	Sulfur	0.010
5	Silicon	0.20-0.50
6	Nickel	0.40
7	Chromium	8.0-9.5
8	Molybdenum	0.85-1.05
9	Vanadium	0.18-0.25
10	Niobium	0.06-0.10
11	Nitrogen	0.030-0.070
12	Aluminum	0.02
13	Titanium	0.01
14	Zirconium	0.01

### D. Pemeriksaan Visual

Pemeriksaan didalam boiler secara visual dilakukan untuk mengetahui kondisi pipa di dalam boiler yaitu superheater yang mengalami kerusakan karena bocor. Akibat kebocoran ini dapat mengakibatkan pipa-pipa yang terkena semburan uap mengalami kerusakan.

### E. Pengujian Kekerasan

Uji kekerasan *in-situ* dilakukan dengan menggunakan alat uji kekerasan portabel Krautkramer MIC20 dengan probe 10kgf pada pipa pecah dan pipa tertentu pada pipa superheater.

Pengujian kekerasan dilakukan pada bagian metalografi menggunakan Wolpert Wilson 452SVD Vickers hardness tester dengan beban 10kgf. Hasil kekerasan rata-rata, diambil dari 3 hingga 5 lekukan pada setiap bagian.

### F. Pengujian Ultrasonic

Pada alat uji ketebalan yang menggunakan metode pendeteksi suara atau ultrasonik. Gelombang ultrasonik yang dipancarkan rangkaian transmitter menembus permukaan benda dan dipantulkan kembali ke rangkaian receiver. Waktu tempuh menjalani gelombang ini diukur dengan menggunakan upcounter menggunakan metode *time of flight*.

### G. Pengujian Metalografi

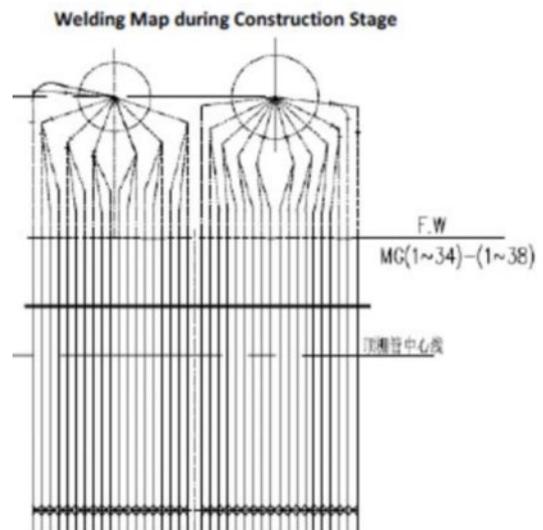
Berikut ini adalah penjelasan tahapan-tahapan yang dilakukan untuk pengujian metalografi:

1. Pemotongan
2. Identifikasi
3. Mounting
4. Penggerindaan
5. Pemolesan
6. Etching, Pengetsaan
7. Cleaning, Pembersihan
8. Drying, Pengeringan
9. Pemeriksaan

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Pemeriksaan Visual (Site Inspection)

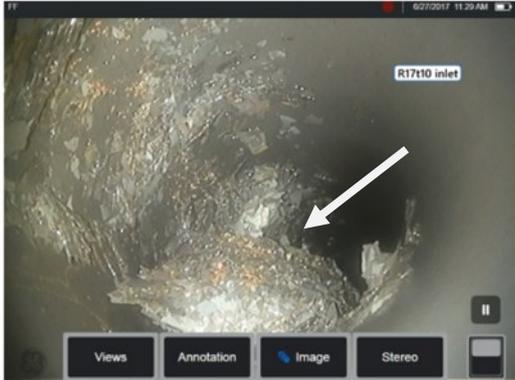
Lokasi pemeriksaan berada di Boiler area Final Superheater. Tujuan pemeriksaan ini adalah untuk mengidentifikasi pipa-pipa yang rusak dan untuk rencana pergantian yang akan dilakukan. Pemetaan pipa Final Superheater ditunjukkan pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Identifikasi Pipa Boiler di Area Final Superheater.

**B. Pemeriksaan Magnetik (Site Inspection)**

Pemeriksaan atraksi magnetis dilakukan di lekukan bagian bawah pipa *Final Superheater* dengan menggunakan *video probe*. Magnet genggam digunakan untuk mengidentifikasi tingkat magnetit di lubang pipa, ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Inspeksi dengan menggunakan *probe video*, terlihat puing yang cukup besar menutupi sebagian pipa MG17-T10.

**C. Pengujian Kekerasan**

Uji kekerasan in-situ dilakukan dengan menggunakan alat uji kekerasan *portabel* Krautkramer MIC20 dengan probe 10kgf pada pipa pecah dan pipa tertentu pada final superheater akhir. Permukaan dipersiapkan menggunakan beberapa tahap kertas abrasif hingga grit 400. Hasil pengesanan ditunjukkan dalam Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Uji Kekerasan pipa SA213-T91

Lokasi	Nomor Pipa	HV
MG2	T9	204
	T10	210
	T11	211
	T12	212
MG10	T7	210
	T8	225
	T9	230
	T10	219
	T12	206
MG15	T10	210
	T11	198
MG20	T7	206
	T11	208
PMG10	T9	192
	T10	185
	T11	197
	T12	194
PMG15	T9	205
	T10	211
	T11	200
	T12	200
PMG16	T9	202
	T10	191
	T11	205
	T12	198
PMG19	T9	194
	T10	201
	T11	180
	T12	199
PMG20	T9	200
	T10	209
	T11	182
	T12	206

Hasil kekerasan yang diperoleh dari pipa *final superheater* menunjukkan berada dalam kisaran normal untuk T91. *Outlet final superheater* pipa MG10T10, MG19T10 dan MG20T11 di *penthouse* (T91) menunjukkan sedikit berkurang kekerasan kurang dari kisaran. Pipa-pipa ini harus dipantau dalam pemadaman berikutnya.

Pengujian kekerasan di laboratorium dilakukan pada bagian metalografi menggunakan Wolpert Wilson 452SVD Vickers *hardness tester* dengan beban 10kgf. Hasil kekerasan rata-rata, yang diambil dari 3 hingga 5 lekukan pada setiap bagian ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Uji Kekerasan Sampel Laboratorium

Nomor Pipa	Lokasi	HV
MG16T10-2	Midwall	286
MG16T10-3	Midwall 3	192
MG16T10-3	Midwall 12	191
MG16T10-4	Midwall	150
MG10T10-2	Midwall	209
MG10T10-3	Midwall	175
Ref T91	Midwall	225
Ref TP347	Midwall	157

**D. Pemeriksaan Visual (Laboratorium)**

Pipa SA213-T91 (MG16-T10) telah retak dan pipa telah menekuk sekitar 60 derajat dari garis lurus. Pecahnya pipa seperti mulut ikan lebar ditunjukkan oleh panah merah. Pandangan umum dari potongan-potongan yang direkonstruksi ditunjukkan pada Gambar 8.



**Gambar 8.** Pandangan potongan dari SA213-T91 MG16-T10.

Tampilan pipa SA213-T91 (MG10-T10) yang mengalami kerusakan seperti mulut ikan ditunjukkan pada Gambar 9.



**Gambar 9.** MG10-10 Pecah Seperti Mulut Ikan (Anak Panah).

### E. Pipa Referensi SA213-T91 dan SA213-TP347H

Pandangan umum SA213-T91 referensi dan SA213-TP347H sebagai pipa referensi ditunjukkan pada Gambar 10.



**Gambar 10.** Pandangan Pipa yang rusak dan Pipa Referensi

### F. Pemeriksaan Serbuk Oksidasi.

Dengan menggunakan magnet kedua sampel dipisahkan menjadi bagian-bagian magnetik dan non-magnetik. MG15T15 memiliki 0,19 gram bahan non-magnetik, sementara MG16T28 ditemukan semua magnet tanpa bahan non-magnetik. Puing-puing magnetik dan non-magnetik dari MG15T15 ditunjukkan pada Gambar 11, 12 dan 13.



**Gambar 11.** Puing-Puing Magnet Dari MG15-T15, Puing-Puing Terdiri Dari Serpih Terutama Gelap/Abu-Abu Dari Berbagai Ukuran Hingga 2mm



**Gambar 12.** Puing-Puing Non-Magnetik Dari MG15-15 Penampilan Granular Dan Berwarna Merah

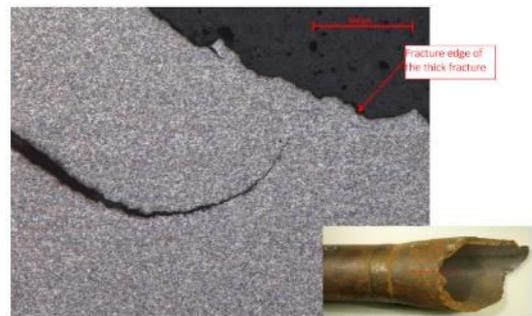


**Gambar 13.** Puing-Puing Magnet Dari MG16T28. Puing-Puing Terdiri Dari Serpih Terutama Gelap / Abu-Abu Dari Berbagai Ukuran Hingga 2mm.

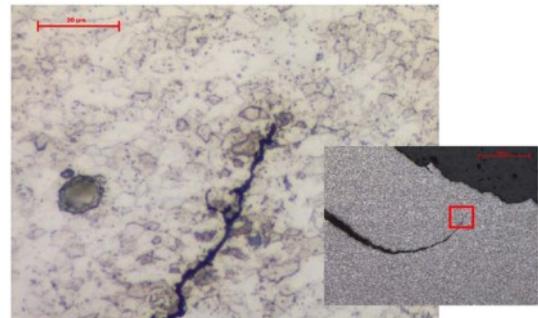
Analisis sampel puing-puing menunjukkan *hematite* ditemukan di dalam lapisan magnetit dan terlihat dari pemeriksaan metalografi dari sampel pipa. Sejumlah (~1%) dari puing-puing non-magnetik ditemukan dalam sampel MG15T15. Puing-puing non-magnetik pada dasarnya dari abu batubara. Sejumlah kecil nikel terdeteksi dalam serpihan sampel puing-puing dari MG16T28, yang menunjukkan bahwa beberapa puing-puing mungkin berasal dari pipa TP347H baik sebagai oksida atau partikel kecil dari logam. Berdasarkan evaluasi secara keseluruhan, mayoritas puing-puing kemungkinan berasal dari bahan T91.

### G. Pengujian Metalografi MG16-T10

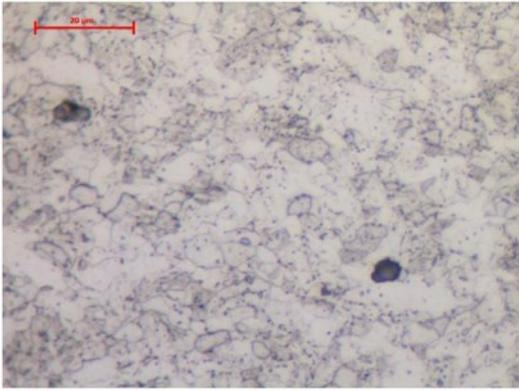
Sebuah mikrograf dari tepi fraktur pada posisi MG16T10-2 ditunjukkan pada Gambar 14, 15 dan 16.



**Gambar 14.** Mikrograf dari Celah di MG16T10-2 Retak Lain Diamati Berdekatan Dengan Ujung Patahan Tebal.



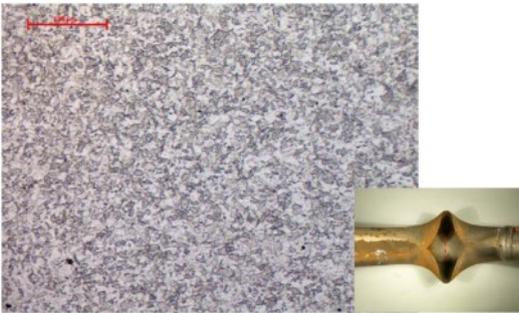
**Gambar 15.** Pembesaran Celah Gambar 14 Retak *Transgranular*, Indikasi Kegagalan Daktilitas Rendah Mengandung Banyak *Void* Merayap dan Deformasi Butir.



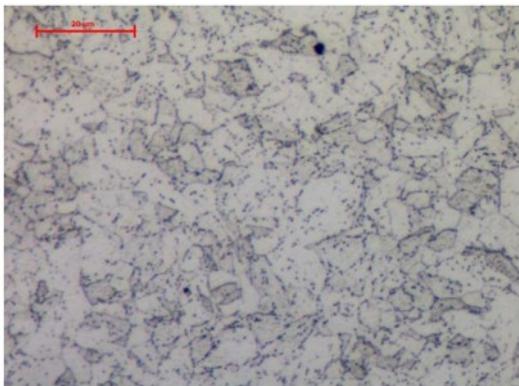
**Gambar 16** Perbesaran Gambar 15 Mikrostruktur Dari Tepi Retak Menunjukkan Bukti Struktur Berubah Dan Terdapat *Void* Merayap.

#### H. Pengujian Metalografi MG10-T10

Logam dasar memiliki struktur austenitik dan bukti presipitasi karbida di sepanjang batas butir. Contoh kondisi permukaan lubang ditunjukkan pada Gambar 17 dan 18.



**Gambar 17.** Mikro Struktur Di Bagian MG10T10-2. Logam Dasar Mengungkapkan Martensit *Tempered* Halus Terdegradasi Termal.

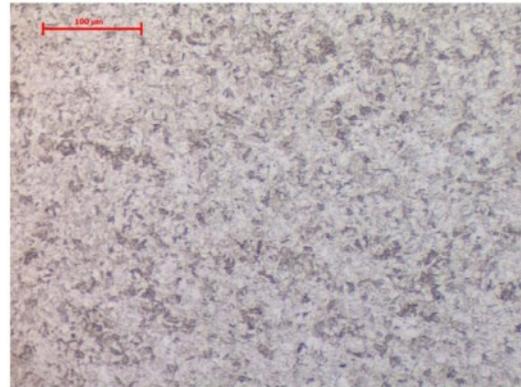


**Gambar 18.** Mikrograf Perbesaran Yang Lebih Tinggi Pada Gambar 17, Struktur Mikro Menunjukkan Martensit *Temper* Yang Terdegradasi Secara Termal. Struktur Berisi Rongga *Creep* Yang Terisolasi.

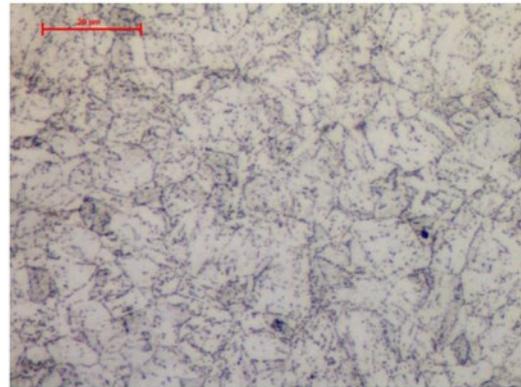
#### I. Referensi SA213-T91 dan SA213-TP347H

Bahan umum yang jauh dari fraktur menunjukkan bukti struktur *tempered martensite* halus terdegradasi

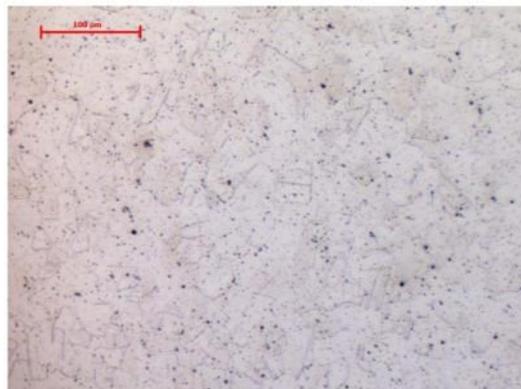
dengan *void creep* terisolasi. Contohnya ditunjukkan pada Gambar 19.



**Gambar 19.** Logam Dasar Referensi T91. Logam Dasar Memiliki Struktur Martensit *Tempered* Halus.



**Gambar 20.** Perbesaran Yang Lebih Tinggi Dari Gambar 19, Logam Dasar Memiliki Struktur Martensit *Tempered* Halus.



**Gambar 21.** Logam Dasar Dari Referensi TP347H. Logam Dasar Memiliki Struktur Austenitik Dengan Kembar Anil Dan Sedikit Presipitasi Karbida.

#### J. Pembahasan

Koefisien ekspansi termal (CTE) dari paduan T91 secara signifikan lebih rendah dari Fe-Cr spinel dan magnetit. Perbedaan dalam CTE mungkin telah menyumbang akumulasi strain, retak dan pengelupasan magnetit selama siklus termal *boiler*. Bukti dari berbagai retakan memanjang pada lapisan *magnetite* dalam sampel

pipa juga konsisten dengan efek dari siklus termal. Hal ini dianggap jika pengelupasan magnetit hanya terjadi pasca kegagalan, karena pendinginan cepat dari kegagalan. Sementara beberapa magnetit pengelupasan kulit bisa terjadi selama *shutdown* pasca kegagalan, sebagian besar pengelupasan magnetit akan terjadi sebelum kegagalan yang dibuktikan dengan membersihkan pipa internal.

Sebanyak 133 pipa yang dibersihkan mewakili > 10% dari total pipa dari sirkuit *final superheater*. Selain itu, bukti dari berbagai retakan memanjang pada lapisan skala luar diamati. Dengan asumsi bahwa pengelupasan kulit yang telah terjadi sepanjang 5 m dari pipa T91 dengan diameter internal 31mm, maka berat dari *magnetite* dikelupas akan menjadi sekitar 60 gram dalam satu rangkaian, dengan asumsi 5gr/kepadatan/cm<sup>3</sup> *magnetite*. Ini akan cukup untuk menutupi lubang pipa lebih dari jarak 160mm. Luasnya cakupan akan lebih dalam kenyataannya karena kepadatan serpih magnetit yang dapat menyebabkan penyumbatan akan jauh lebih rendah dari yang diasumsikan 5gr/cm<sup>3</sup>.

## V. KESIMPULAN

Setelah dilakukan analisa maka kerusakan pada pipa boiler *Final Superheater* dapat disimpulkan sebagai berikut ini:

1. Kerusakan pada pipa *Final superheater* karena *short term overheating*, dimana kemungkinan besar disebabkan pipa mengalami penyumbatan parsial oleh Pengelupasan lapisan magnetit (*exfoliated magnetite*). Penyumbatan parsial membatasi aliran uap pendingin di dalam pipa yang menyerap panas dari temperature pipa yang tinggi.
2. Data metalurgi menunjukkan bahwa pipa SA213-T91 telah beroperasi pada suhu tertinggi, oleh karena itu kemungkinan yang pertama mengalami kerusakan.

3. Distribusi skala *magnetite* dalam pipa menunjukkan bahwa sumber bahan yang terkelupas di dalam pipa SA213-T91 vertikal kemungkinan disebabkan oleh siklus *boiler* dan kecepatan kenaikan temperatur yang tinggi selama siklus *shutdown/start-up* adalah faktor yang berkontribusi dalam pengelupasan oksida.
4. Dari hal di atas, keputusan untuk mengganti pipa SA213-T91 yang rusak dengan SA213-TP347H dianggap tepat, meskipun ada beberapa pipa di *superheater* yang telah terlalu panas dan telah menghabiskan sebagian besar *life time creep*.

## REFERENSI

- [1] Adrian, J., Laif, N., Noerochim, L., & Kurniawan, B.A., Analisa kerusakan *superheater tube boiler* tipe ASTM A213 grade T11 pada pembangkit listrik tenaga uap. *Jurnal Teknik ITS*, 5,2016, 148-152.
- [2] Fahrizal, Analisa penyebab kegagalan pipa *superheater boiler*. *Jurnal Aptek*, 5, 2013, 71-77.
- [3] Sariyusda, Bustamisyam, & Indra. Analisa kegagalan *superheater package boiler tube* akibat overheating. *Jurnal MEKINTEK*, 3, 2012, 173-181.
- [4] Rahman, M.M., & Kadir, A.K., Failure analysis of high temperature superheater tube (HTS) of a pulverized coal-fired power station. *Journal of ISC*, 2011, 517-522.
- [5] Sulistiyo, E., &Mahdy, N., Analisis Pecahnya Material *secondary superheater tube* pada Boiler Unit 1 PLTU Tanjungjati Berkapasitas 660 MW. *Jurnal Power Plant*, 4, 2016, 122-210.
- [6] ASME, Ferrous Material Specification Section II. New York: ASME Press, 2015.
- [7] EPRI, Boiler Tube Failure Theory and Practice. Pleasant Hill: EPRI distribution center, 1996.
- [8] Harbin Electric International, *Operation Regulation of Boiler*, 2017.
- [9] Mars, G. and Fontana, *Corrosion Engineering*. New York: McGraw Hill, 1987.
- [10] Cahyadi, *Pltu batubara supercritical yang efisien*. Tangerang Selatan: Badan Pengkajian dan PenerapanTeknologi (BPPT) 2015.