

Analisis Cacat Las *Incomplete Fusion* Dan Retak Memanjang Pada *Waterwall Tube* Boiler PLTU Paiton Unit 1

(Weld defect analysis: Incomplete fusion and longitudinal crack of Waterwall Tube Boiler of PLTU Paiton Unit 1)

SAHLAN

ABSTRACT

Weld defects in the form of "incomplete fusion" and lengthwise (longitudinal) cracks was observed at the boiler tube welding of steam power plants of Paiton Unit 1, row 3, located 860 mm above the header. Incomplete fusion may be caused by incorrect use of the the magnitude of current, welding speed, or manipulation or selection of the electrode being used, that may lead to uneven fusion and affect generate the cracks along the incomplete fusion region. Incomplete fusion defects in the waterwall tubes welding being visible from the edge of the boundary between the base material and weld region with the presence of indentation or depression in the form of a very deep crater welding. Indentations or hollows, that will be observed more clearly by using an optical microscope with a magnification 1000X, which in the presence of imperfections observed molecular fusion between grain boundaries and inter-molecular crystal. At 1000X magnification of the HAZ (heat affected zone) region, transition structure forming brittle fractures was observed

Keywords: incomplete fusion, longitudinal crack, waterwall tube

PENDAHULUAN

Proses penggantian komponen utama pada tube atau pipa-pipa ketel uap di Pembangkitan Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton Unit 1, dilakukan saat *overhaul* atau sudah beroperasi 15-20 tahun. Kerusakan yang sering ditemukan saat *overhaul* adalah kerusakan karena faktor umur dan kerusakan yang diakibatkan operasi pembebanan melebihi batas yang diijinkan (*overload*). Pada kasus tertentu, cacat bawaan (*inherent defect*) pada boiler bisa terjadi karena pada saat proses pengelasan konstruksi boiler kurang dalam pengawasan kendali mutu. Dan cacat pengelasan yang mungkin terjadi adalah patah mekanik (*fracture mechanic*) yang disebabkan oleh *incomplete fusion* pada daerah pengelasan. Dari hasil *Comissioning Standar Kualitas Overhaul*, pada saat *overhaul* dilakukan penggantian *waterwall tube* dan siripnya pada baris ketiga dengan penyambungan las pada ketinggian 860 mm dari pipa pengumpul

(*header*) air, teramati adanya kegagalan pengelasan. Kegagalan pengelasan tersebut berupa celung/kawah lasan yang cukup dalam diperbatasan antara daerah lasan dan *base material*. Memperbaiki dengan menambah penumpukan barisan las di atasnya tidak dimungkinkan. Untuk itu diambil keputusan dipotong dan dianalisis di laboratorium untuk menentukan sebab-sebab kegagalan pengelasan. Apabila kegagalan pengelasan ini tidak ditindak lanjuti dan dibiarkan *boiler* tetap beroperasi, maka dalam kurun waktu tertentu, *waterwall tube* pada boiler yang mengalami *incomplete fusion*, yang bekerja pada tekanan air dan suhu tungku yang tinggi, dapat berdampak pada keselamatan dan keamanan operasional boiler yaitu terjadi kebocoran atau semburan air pada daerah tungku, dan boiler mengalami kegagalan operasional total (*trip*).

Dari dugaan awal secara visual, jenis kegagalan pengelasan termasuk dalam jenis kegagalan pengelasan *incomplete fusion* yaitu kegagalan las yang terjadi karena ketidak

sempurnaan fusibilitas antara bahan pengisi (*filler*) dengan *base material*. *Incomplete fusion* merupakan cacat yang disebabkan oleh kesalahan penggunaan besar arus, kecepatan pengelasan, kesalahan pemilihan atau manipulasi elektroda (*incorrect electrode manipulation*). Dari dokumen Commissioning Proyek PLTU 1 Paiton, *waterwall tube* dibuat dari material ASTM SA 178D.

Dari hasil analisis di laboratorium material, dengan pengamatan mikroskop optik perbesaran 100X, tidak hanya *incomplete fusion* saja yang terjadi, namun juga retak pada daerah isian las (*filler*)-nya pada arah memanjang (*longitudinal crack*). *Incomplete fusion* maupun retak longitudinal pengelasan diamati lebih jauh dengan mikroskop dengan perbesaran 1000X, maka teramati secara molekular kerusakan yang terjadi akibat fusi molekularnya tidak homogen serta tidak ada keseimbangan perpindahan energi/panas antar batas butiran (*molecular*), sehingga membentuk struktur fraktur yang getas (*brittle fractures*). Dengan demikian dari hasil komisioning ini, kasus kegagalan pengelasan *waterwall tube* PLTU Paiton Unit 1 dimasukkan di lembar berita kasus kegagalan.

STUDI PUSTAKA

Kondisi *waterwall tube* pada boiler yang tidak homogen dan terjadi kerusakan atau cacat pada permukaannya, saat beroperasi pada tekanan air didalamnya, dan suhu tungku yang tinggi didinding luarnya akan mengalami perbedaan tegangan ekstrim pada daerah yang cacat tersebut¹⁾. Pada kondisi idealnya, suhu rata-rata overall heat logaritmik pada setiap titik di *waterwall tube* adalah sama, namun pada daerah yang terjadi cacat permukaan pada *waterwall tube* tidak demikian, lebih tinggi dibandingkan dengan daerah yang homogen. Disinilah terjadi tegangan permukaan yang ekstrim pada daerah cacat permukaan, permukaan *waterwall tube* yang cacat dalam kurun waktu tertentu berubah menjadi getas. Kerusakan atau cacat permukaan *waterwall tube* pada umumnya terjadi pada daerah

sambungan lasnya. Teknologi pengelasan yang dipilih dan baik untuk *waterwall tube* adalah las busur listrik. Las busur listrik atau umumnya disebut dengan las listrik adalah suatu proses penyambungan logam dengan menggunakan tenaga listrik sebagai sumber panas. Jenis sambungan dengan las listrik ini adalah merupakan sambungan tetap. Pada dasarnya las listrik yang menggunakan elektroda karbon maupun logam menggunakan tenaga listrik sebagai sumber panas. Busur listrik yang terjadi antara ujung elektroda dan benda kerja dapat mencapai temperatur tinggi yang dapat melelehkan sebagian bahan merupakan perkalian antara tegangan listrik (E) dengan kuat arus (I) dan waktu (t) yang dinyatakan dalam satuan panas, joule atau kalori seperti rumus dibawah ini :

$$H = E \times I \times t \quad (1)$$

dengan:

H = panas yang dibangkitkan (J)

E = tegangan listrik (V)

I = kuat arus (A)

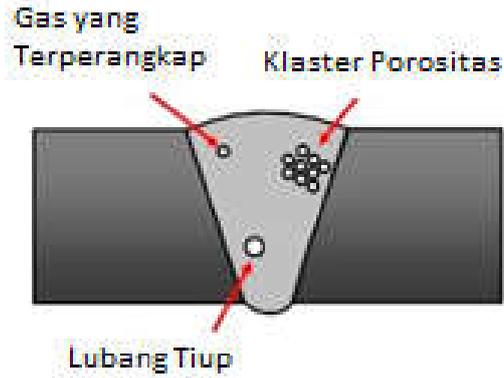
t = waktu (s)

Sambungan las biasanya merupakan komposit heterogen secara kimia dan mekanik yang terdiri dari enam wilayah metalurgi yang berbeda, yaitu: zona komposit, zona tidak bercampur, permukaan pengelasan, zona lelehan terpisah, zona terpengaruhi panas atau *the heat affected zone* (HAZ), dan metal dasar yang tidak terpengaruhi panas. Zona komposit merupakan wilayah yang benar-benar campuran lelehan logam dari logam pengisi dan logam dasar. Wilayah sempit yang mengelilingi zona komposit merupakan *unmixed zone*.

Macam-Macam Cacat Las

1. Porositas

Cacat ini merupakan cacat yang disebabkan adanya gas yang terperangkap di daerah lasan dalam jumlah yang melebihi syarat batas. Lihat gambar 1.



GAMBAR 1. Cacat Porositas



GAMBAR 2. Cacat Slag Inclusion



GAMBAR 3. Cacat Incomplete Fusion

2. Slag Inclusion

Dapat terjadi akibat pembersihan pada saat pengelasan yang berlapis kurang bersih. Hal ini juga dapat disebabkan penggunaan flux pada pengelasan yang berlapis. Lihat gambar 2.

3. Incomplete Fusion

Cacat ini dapat disebabkan oleh kesalahan penggunaan besar arus, kecepatan pengelasan, *incorrect electrode manipulation*, maupun kesalahan pengelas. Lihat gambar 3.

Sedangkan *incomplete fusion* dibagi menjadi dua macam, yaitu *incomplete fusion* pada daerah pengaruh panas yang terjadi pada suhu 500 – 700 °C dan *incomplete fusion* yang terjadi pada suhu diatas 900 °C, yaitu saat peristiwa pengendapan (*precipitation*) logam las. *Incomplete fusion* panas sering terjadi pada logam las karena pembekuan, biasanya berbentuk kawah dan retak memanjang antara *base material* dengan daerah lasan. Kawah (*situ*) panas ini terjadi karena pembebasan tegangan pada daerah kaki didalam daerah pengaruh panas. Kawah panas ini biasanya terjadi pada waktu logam mendingin setelah pembekuan dan terjadi karena adanya tegangan yang timbul, yang disebabkan oleh penyusutan dan berakibat ketangguhan baja menjadi turun pada suhu dibawah suhu pembekuan. Kawah panas las yang lainnya adalah retak sepanjang rigi-rigi, kawah panas memanjang diluar rigi-rigi lasan. Akan tetapi penyebab umum pada semua jenis *incomplete fusion* las ini adalah:

- a. Pilihan jenis elektroda yang salah atau tidak tepat.
- b. Benda kerja terbuat dari baja karbon tinggi.
- c. Pendinginan setelah pengelasan yang terlalu cepat.
- d. Benda kerja yang dilas terlalu kaku.
- e. Penyebaran panas pada bagian-bagian yang di las tidak seimbang

4. *Penembusan Kurang Baik*

Selain retak, cacat las yang sering terjadi adalah penembusan las yang kurang dan jelek. Jika penembusan pengelasan kurang maka akibatnya adalah kekuatan konstruksi yang kurang kokoh. Penyebab dari penembusan yang kurang ini antara lain:

- a. Kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi.
- b. Arus terlalu rendah.
- c. Diameter elektroda yang terlalu besar atau terlalu kecil.
- d. Benda kerja terlalu kotor.
- e. Persiapan kampuh atau sudut kampuh tidak baik.

- f. Busur las yang terlalu panjang.

5. *Pengerukan / Under cut*

Cacat las yang lain adalah pengerukan atau yang sering disebut dengan *undercut* pada benda kerja. Pengerukan ini terjadi pada benda kerja atau konstruksi yang termakan oleh las sehingga benda kerja tadi berkurang kekuatannya meskipun sebelumnya telah dilakukan pengelasan. Sebab-sebab pengerukan las antara lain:

- a. Arus yang terlalu tinggi.
- b. Kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi pula.
- c. Busur nyala yang terlalu panjang.
- d. Ukuran elektroda yang salah.
- e. Posisi elektroda selama pengelasan tidak tepat.
- f. Ayunan elektroda selama pengelasan tidak teratur.

6. *Undercut*

Cacat ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain:

- a. Pengaturan amper/tegangan listrik tidak tepat
- b. Pengaturan kecepatan gerakan las tidak tepat
- c. Sudut elektroda yang kurang tepat
- d. Pengaturan penyusunan tumpukan lasan tidak tepat
- e. Teknik pengelasan yang kurang tepat
- f. Ukuran elektroda terlalu besar

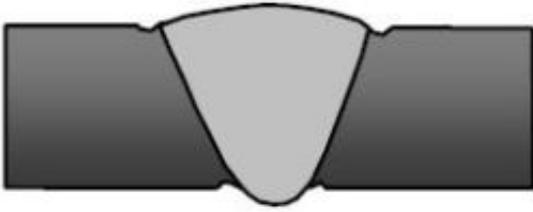
7. *Overlap*

Cacat ini dikarenakan:

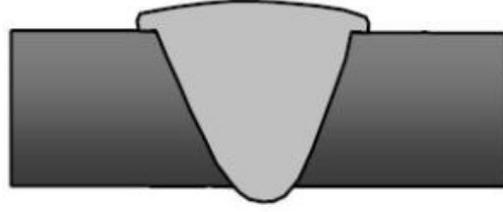
- a. Arus terlalu rendah
- b. Kecepatan pengelasan rendah
- c. Kesalahan teknik mengelas
- d. Kontaminasi sekitar lasan

8. *Retak (crack)*

Banyak hal yang dapat menyebabkan cacat ini. Contoh bentuk *crack* adalah seperti berikut:



GAMBAR 4. Cacat Undercut



GAMBAR 5. Cacat Overlap



GAMBAR 6. Cacat Retak (Crack)



GAMBAR 7. (a) Sampel kegagalan pengelasan, (b) Mounting sampel potongan melintang

METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan penelitian untuk sampel di laboratorium diambil dari hasil pengelasan *waterwall tube* baris ketiga pada elevasi 860 mm dari pipa penampung air (*water header pipe*) (Gambar 7a). Daerah yang terjadi kegagalan pengelasan di potong dalam bentuk *mounting* sampel (Gambar 7b). Ada dua macam bilah sampel,

yaitu sampel permukaan kulit luar dan bilah sampel potongan melintang.

Metode

Metode yang dipergunakan dalam tahapan pengamatan di laboratorium, yaitu:

- a. Analisis kimia: bermaksud untuk membandingkan uji komposisi kimia terhadap standar material *waterwall*

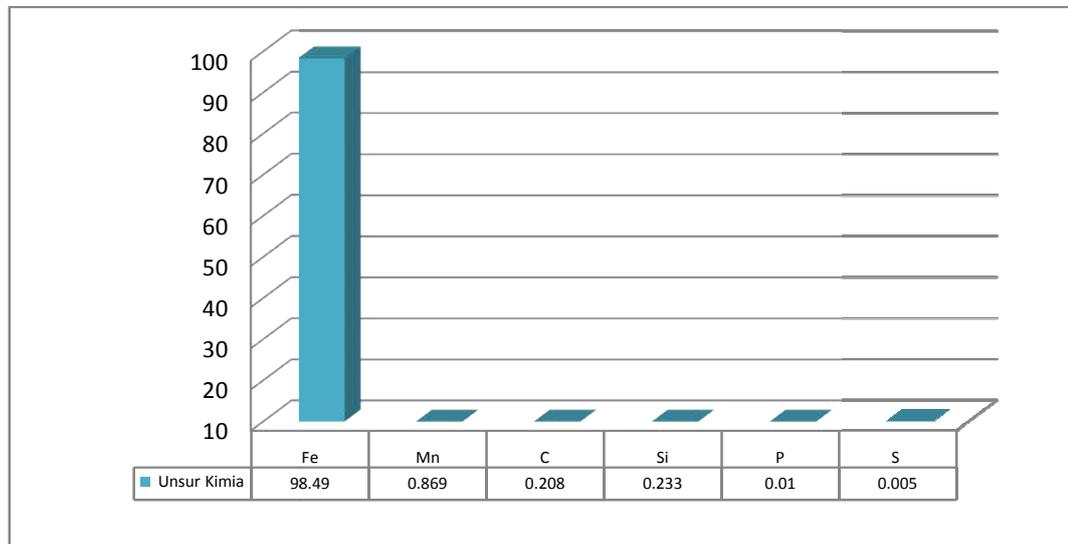
- tube*, yang dipergunakan yaitu Material ASTM SA 178D.
- b. Pengujian kekerasan mikro dengan metoda Vickers untuk mengamati sifat mekanis sampel.
 - c. Metoda makro: Dengan menggunakan mikroskop optik perbesaran 100X untuk mengamati ada-tidaknya *incomplete fusion* dan keretakan melintang las-lasan.

- d. Metoda mikro: Dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 1000X untuk mengamati struktur mikro *base material* pada daerah HAZ, yaitu terbentuknya transisi struktur fraksi getas (*brittle fractures*)

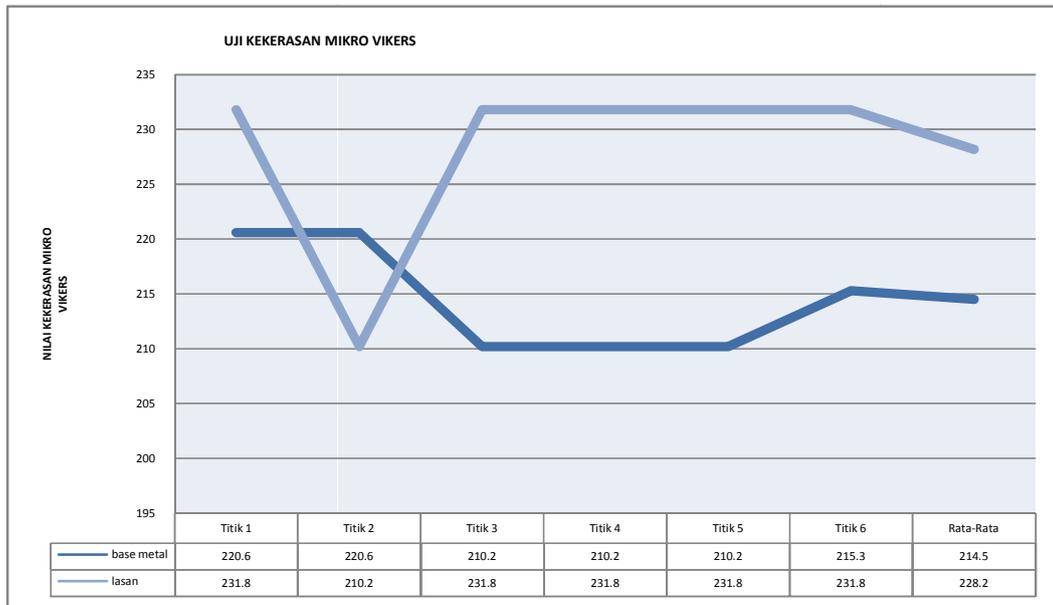
Dari rangkuman hasil analisis keempat metode kemudian dilakukan pendekatan ilmiah berdasarkan dari studi pustaka seperti diatas.

TABEL 1. Komposisi Kimia ASTM SA 178 D

	C	MN	S	P	Si
Spesifikasi		1,00			
ASTMSA	≤ 0,27%	-	0,015	0,030 (max)	≥ 0,10
178D		1,50%	(max)		



GAMBAR 8. Grafik Komposisi Kimia Material Uji



GAMBAR 9. Grafik uji kekerasan pada tiap titik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kimia

Unsur-unsur kimia utama yang terkandung dalam material yang dipakai untuk *waterwall tube boiler* adalah sebagai berikut : Carbon (C),Mangan(Mn) ,Fosfor (P),Sulfur (S), Silikon (Si), Ferrous (Fe).Gambar 8 adalah hasil analisis kimia dari laboratorium, dan Tabel 1 adalah merupakan komposisi kimia standar material Material ASTM SA 178D.

Berdasarkan dari hasil analisis kimia, Gambar 8,komposisi sampel material *waterwall tube boiler* secara komparatif mendekati atau setara dengan standar ASTM SA 178 D, Tabel 1. Hasil analisis kimia di laboratorium bila dibandingkan dengan bahan standar ASTM SA 178 Ddidapatkan hubungan sebagai berikut:

- Carbon (C) sebesar 0,208%, sedangkan yang dibolehkan menurut standarisasi ASTM adalah sebesar $\leq 0.27\%$. Ini sudah cukup mendekati dengan batas normalnya, dan dapat diketahui bahwa sampel material sudah memiliki keuletan yang baik dan kekuatan yang *sedang*.
- Mangan (Mn) sebesar 0,869% ,sedangkan yang dibolehkan menurut standarisasi ASTM adalah sebesar 1% - 1,5%, unsur ini

berfungsi untuk deoksidasi dari baja dan dapat mengikat kandungan sulfur(S) yang berakibat terhindarnya kegetasan pada suhu tinggi. Selain itu dapat menguatkan fasa ferit.

- Silikon (Si) adalah 0,233%, paduan dengan Si ini untuk memperbaiki ketahanan terhadap temperatur yang tinggi dan kemampuan oksidasi.
- Fosfor (P) adalah 0,01%,paduan dengan fosfor ini untuk memberikan peningkatan kekuatan dan kekerasan tetapi menurunkan keuletan dan ketangguhan impact, maka dibatasi 0,03% maksimalnya.
- Sulfur (S) adalah 0,005% sulfur ini dapat membuat baja menjadi getas pada suhu tinggi,sehingga merugikan baja pada saat terkena suhu tinggi. Tetapi kandungan sulfur disini masih dalam batas normal dengankandungan maksimalnya 0,015%
- Ferro (Fe)hasil analisis kimia adalah 98,49%,ini unsur utama dari material sampel, karena unsur pokok dari material *waterwall tube* adalah besi.

Dari hasil komparasi komposisi kimia tersebut diatas, terlihat tidak terjadi pengendapan (presipitasi) unsur-unsur yang dapat menyebabkan perubahan sifat mekanisnya.

Nilai Kekerasan

Dengan metoda uji kekerasan Equotip *Hardness Tester*^{6), 7), 8),} dan hasilnya dikonversikan langsung ke dalam nilai kekerasan Vickers sesuai dengan standar JIS Z 2244⁹⁾, maka hasilnya seperti pada Gambar 9.

Pengujian ini dilakukan pada daerah HAZ sebanyak 2 tempat dengan 6 titik pada permukaan samping sampel *waterwall tube* (lihat lampiran 2), kemudian nilai kekerasan dirata-ratakan. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 9 terlihat jelas perbedaan angka (angka-angka bila dicetak tidak terbaca dengan jelas) yang sangat signifikan yaitu dari titik 1 – 6 yang akan mempengaruhi pemakaiannya.

Sebagaimana diketahui kekerasan ini mempunyai korelasi dengan kekuatannya, sedangkan kekuatan erat sekali hubungannya dengan tegangan-regangan dalam yang terjadi pada material tersebut, dan apabila terjadi tegangan dalam atau biasa disebut dengan tegangan sisa (*residual stress*) Tegangan dalam tidak SELALU sama dengan tegangan sisa pada suatu material, maka material tersebut menjadi getas (*brittle*), mudah mengalami retak, dan mempunyai ketahanan korosi yang rendah.

Dengan nilai kekerasan rata-rata 214 HV sampai dengan 228 HV pada daerah uji kekerasannya menunjukkan bahwa pada daerah tersebut telah terjadi perubahan sifat mekanis dari ulet (*ductile*) menjadi keras/getas (*brittle*), Kekerasan bahan induk adalah 110 HV (Standar ASTM Material SA178 D tahun 2008). Sambungan las pada *waterwall tube*

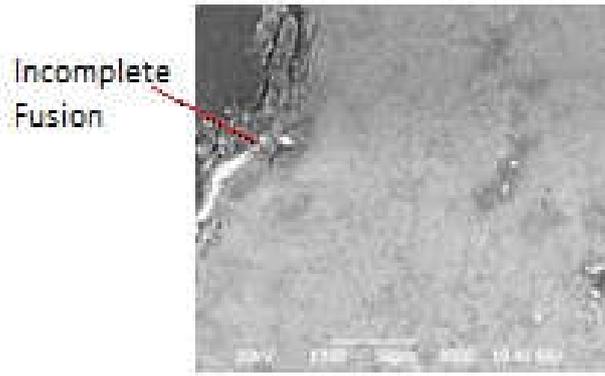
yang mengalami kegagalan las *incomplete fracture*, merupakan komposit heterogen secara kimia dan mekanik, yang terdiri dari enam wilayah metallurgi yang berbeda, yaitu : suatu daerah komposit, daerah yang tidak merata fusinya, interfase lasan, daerah leburan yang terpisah (*the partially melted zone*), HAZ (*the heat affected zone*) dan daerah metal base yang tidak terpengaruh (*the unaffected base metal*) oleh fusi energy.

Analisis Makro

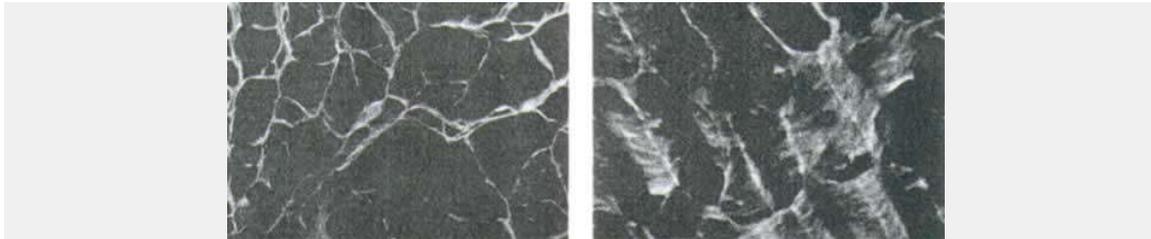
Dari hasil imagi radiografi, Gambar 10, tampak jelas teramati cacat-cacat pengelasan akibat *incomplete fusion* pada *waterwall tube* dalam bentuk cacat-cacat internal maupun dalam bentuk cacat akar (*root defects*), dengan titik hitam merupakan cacat akar dan yang warna kelabu ditengah merupakan cacat-cacat internal. Gambar 11 merupakan hasil foto metalurgrafimenggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 100X, pada daerah kegagalan pengelasan *incomplete fusion*. Terlihat disini, pada daerah perbatasan antara daerah lasan dan *base material*-nya atau daerah HAZ. Ada dua peristiwa kegagalan disini, pertama adanya kawah lasan (*incomplete fusion*) dan daerah retakan lasan yang sangat dalam yang cenderung membentuk pulau-pulau fusi (*the Fusion Islands*). Sehingga akibat kegagalan pengelasan ini maka dinyatakan cacat atau gagal (*the process invalidation*) atau dengan kata lain *waterwall tube* baris 3 elevasi 860 mm gagal tidak bisa terpakai dan harus diganti. Bila diperbaiki dengan menindih dengan pengelasan diatasnya jelas tidak bisa dilakukan.



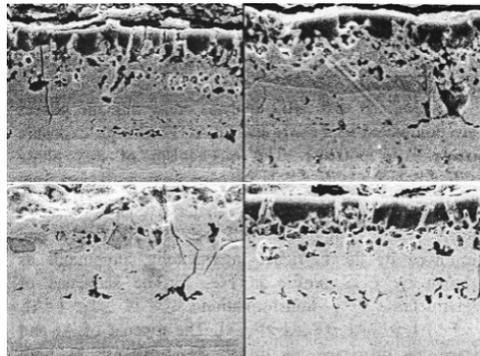
GAMBAR 10. Imagi radiografi cacat las incomplete fusion pada waterwall tube



GAMBAR 11. Cacat incomplete fusion dan Crack (100X)



GAMBAR 12. Fraktur Getas pada daerah HAZ



GAMBAR 13. Mikrografi potongan melintang daerah incomplete fusion dari beberapa posisi

Analisis Mikro

Analisis mikro dengan pembesaran 1000X pada daerah HAZ bertujuan untuk mengamati bentuk transisi struktur mikronya. Gambar 12 menunjukkan suatu bentuk transisi struktur mikro berubah menjadi fraktur getas (Brittle fractures). Pada transisi fasa fraktur getas, retak menyebar sangat cepat, dengan sedikit atau tanpa aliran plastis, dan bersifat sangat tidak stabil, dengan pengendapan retak terjadi tanpa adanya peningkatan di dalamnya dan melawan tegangan yang terjadi. Ini terjadi didalam daerah tegangan HAZ, didalam logam

dengan sedikit sekali keuletan dan ketangguhan. Peristiwa ini dapat diumpamakan seperti yang terjadi pada bahan keramik pada umumnya. Hal ini bisa dilihat atau dibandingkan hasilnya dengan analisis uji kekerasan pada Sub Bab 4.2. diatas yang menjelaskan bahwa bahan keras mempunyai nilai kekerasan yang tinggi, dan tahan goresan namun tidak tahan terhadap beban benturan (*the impact force*).

Fraktur getas yang terjadi pada daerah HAZ, permukaan fraktur membentuk serpihan-serpihan bidang rata dan tegak lurus terhadap

arah tegangan dalam. Maka kegagalan pengelasan pada *waterwall tube* terjadi lebih disebabkan oleh perpecahansaat terjadi transisi fasa dari cair ke padat, dan pada setiap butiran fraktur membentuk serpihan-serpihan datar rata dan orientasi masing-masingnya, satu terhadap yang lain akan berbeda, berwarna cerah, dan kristal-kristal membentuk permukaan serpihan.

Gambar 13 merupakan hasil mikrografi pada potongan melintang daerah kegagalan pengelasan *incomplete fusion waterwall tube*. Gambar diambil dari beberapa posisi potongan. Teramati bahwa pada daerah lapisan atas menunjukkan struktur yang tumpang tindih yang tidak beraturan, terutama pada lapisan yang paling atas/luar. Masuk lebih dalam menunjukkan banyak daerah kosong (berpori-pori) dan banyak impuritas endapan grafit dan ferit. Cacat ini dapat disebabkan oleh kesalahan penggunaan besar arus, kecepatan pengelasan, *incorrect electrode manipulation*, maupun kesalahan pengelasan.

Banyaknya impuritas endapan grafit dan ferit yang membentuk kawah atau situ. Kawah panas ini biasanya terjadi pada waktu logam mendingin setelah pembekuan dan terjadi karena adanya tegangan yang timbul.

KESIMPULAN

Kegagalan pengelasan yang terjadi pada *waterwall tube* baris 3, elevasi 860 mm Boiler PLTU Paiton 1, adalah disebabkan oleh *incomplete fusion* dan retak longitudinal, maka kegagalan itu merupakan kegagalan yang disebabkan:

1. Cacat *incomplete fusion* atau terbentuknya cekungan atau kawah las didaerah batas antara daerah lasan dengan base material pada daerah HAZ karena tidak terjadi fusi molekular yang tidak sempurna.
2. Retak Longitudinal terjadi karena disebabkan tidak seragamnya pendinginan antara daerah *incomplete fusion* dengan daerah didalam area lasan atau terjadi fusi energy yang tidak merata, sehingga terjadi tarik menarik saat transisi pendinginan antar molekulnya.
3. Akibat ketidak seragaman proses peleburan dan pendinginan dapat berakibat membuat daerah HAZ terjadi transisi fasa yang fraktur fusi pada daerah HAZ, sehingga menjadi getas dan membentuk

kristal yang datar dan perpecahan batas butiran yang tegak lurus.

4. *Incomplete Fusion* merupakan cacat yang diakibatkan oleh kesalahan penggunaan besar arus, kecepatan pengelasan, kesalahan pemilihan atau manipulasi elektroda (*incorrect electrode manipulation*) dan, atau kesalahan pengelasan.
5. Hasil mikrografi pada potongan melintang daerah kegagalan pengelasan *incomplete fusion waterwall tube*, teramati bahwa pada daerah lapisan atas menunjukkan struktur yang tumpang tindih yang tidak beraturan, terutama pada lapisan yang paling atas/luar. Masuk lebih dalam menunjukkan banyak daerah kosong (berpori-pori) dan banyak impuritas endapan grafit dan ferit.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Ir.S.amsul, *EbookTurbin Uap & Alat Bantunya*, Jakarta, 2004
- Bernanda, C, P.ramana, Sardono Sarwito *Analisa Penggunaan Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) padas is tempendin inutamaunit 1&2 PLTU Paiton*.Jurnal Teknik Mesin, FTI ITS.
- Cary, Howard B., *Modern Welding Technology*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2008
- Cary, Howard B., *Training in Shield Metal Arc Weelding*, George M.Hill & Associates, Inc., Troy Ohio 2011.Cullity, B.D., *Element of X-Ray Diffraction*, 5th edition, Addison-Wessley Publishing Co., Inc., Massachussets 2008
- Daniel, A Brandt, *Annual Book of ASTM*, (Online), (<http://www.astm.org>, di akses tanggal 22 juli 2013).
- Daryanto, *Teknik Mengelas dan Kerja Pelat*, Penerbit Tarsito, Bandung 2011
- Dawes, C.T., and Thomas, W.M. *Friction Process Weld Steel Alloy, A New Friction Welding Technique Allows Easy Welding of Normally Difficult to Joint Materials*, *Welding Jurnal* 75,41.2007

- Ginting, Dines Dasar-dasar Pengelasan, Penerbit Erlangga, Jakarta, 2011
- Goerge E Ditter, *Metalurgi Mekanik*, PT Erlangga, Jakarta 1992.
- Ishikawa, Kaoro, Teknik Penuntun Pengendalian Mutu Pengelasan, Penerbit Erlangga, 2008
- Lawrence H. Van Vlack, *Ilmu dan Teknologi Bahan (Logam & Bukan Logam)*, PT Erlangga, Jakarta 1992
- Lawrence H. Van Vlack, terjemahan: Djaprie Sriati, *Ilmu dan Teknologi Bahan*, PT Erlangga, Jakarta 1981
- Rochani, Ir. Habib, *Ebook Teknik Tenaga Uap dan Gas*
- TataSurdia, *Sifat – Sifat Mekanis Bahan*, (Online), (<http://www.scribd.com>, di akses tanggal 22 juli 2013)
- Welding Study Centre *Ebook Welding Inspection Training Lv.2*, Jakarta.2012
- Widharto, Sri, Menuju Juru Las Tingkat Dunia, PT Pradnya Paramita, Jakarta, 2010
- Widharto, Sri, Petunjuk Kerja Las, PT Pradnya Paramita, Jakarta, 2012
- Wirjo, Harsono, Teknik Pengelasan Logam, PT Pradnya Paramita, Jakarta, 2010

PENULIS:

Sahlan

Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik PLN, Jalan Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat.

Email: sahlan1956@yahoo.com