

Failure Analysis on Pipeline Welded Joint of Venting Isolation High Pressure Superheater Tube

Sri Nugroho^{1,*}, Sulardjaka¹ dan Galih Al Hadid¹

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro - Semarang

*Korespondensi: srinugroho2004@yahoo.com

Abstract. This study explain about the failure on welded joints of venting isolation high pressure superheater tubes which has been operating for approximately 20 years at elevated temperature and pressure respectively 5250C and 111 bar on the Heat Recovery Steam Generator Combined Cycle Power Plant. This failure in the form of cracks on welded joints between venting and header tubes. However, failure resulted in the leakage of tubes in the HRSG that can cause catastrophics are not expected. The causes and the mechanisms of failure were investigated in the laboratory testing of visual, chemical composition, macrography, hardness, and micrography. The result of chemical composition, hardness, and micrography found that the material was suitable to use ASTM A213 T2 standard for seamless ferritic superheater tube. In addition, plastic deformation and notch were formed respectively in the base metal and weld toe after visual and macrography testing. This study concluded that the mechanism of failure is the plastic deformation caused by the phenomenon of creep where tube accepted load and constant high temperature in long periode and with the notch on the weld toe resulting stress concentration that can cause weld defect (toe crack).

Abstrak. Penelitian ini menjelaskan tentang kegagalan sambungan las pipa venting isolation high pressure superheater yang sudah beroperasi selama kurang lebih 20 tahun pada temperatur dan tekanan masing-masing 5250C dan 111 bar pada Heat Recovery Steam Generator (HRSG) di sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU). Kegagalan ini mengakibatkan adanya kebocoran pipa pada ruang HRSG yang dapat menimbulkan bencana yang tidak diharapkan. Kegagalan ini berupa keretakan pada sambungan T las (T-joint) antara pipa venting dan pipa header. Penyebab dan mekanisme kegagalan diinvestigasi dalam bentuk pengujian laboratorium yaitu pengujian visual, komposisi kimia, makrografi, kekerasan, dan mikrografi. Hasil pengujian komposisi kimia, kekerasan, dan mikrografi didapatkan bahwa material telah sesuai menggunakan standar ASTM A213 Grade T2 untuk seamless ferritic superheater tube. Hasil pengujian visual dan makrografi ditemukan adanya deformasi plastis yang terjadi pada base metal pipa dan takik atau notch di ujung kaki las. Penelitian ini menyimpulkan mekanisme kegagalannya adalah deformasi plastis yang terjadi akibat fenomena mulur atau creep dimana pipa menerima beban dan suhu tinggi yang konstan dalam periode waktu yang lama dan dengan adanya takik pada ujung kaki las mengakibatkan konsentrasi tegangan sehingga dapat menimbulkan cacat las yaitu toe crack.

Kata kunci: creep, deformasi plastis, konsentrasi tegangan, notch, sambungan T-joint, toe crack

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Sekitar 80% dari kebutuhan nasional listrik dipenuhi dari pembangkit listrik panas yang mempekerjakan uap yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil dalam boiler. Bahan bakar yang digunakan dalam boiler untuk menghasilkan uap seperti batubara, minyak, atau gas alam. Kegagalan pipa boiler adalah penyebab utama dari pemadaman paksa unit pembangkit listrik. Sebagian besar kegagalan umum terjadi pada pipa dinding air, pipa superheater/alat pemanas, dan pipa *economizer* [1].

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) merupakan pembangkit jenis *combined cycle*. Pembangkit jenis ini memanfaatkan gas panas pembuangan dari turbin gas untuk memanasi fluida dalam pipa-pipa *Heat Recovery Steam*

Generator (HRSG) menjadi uap untuk menggerakkan turbin uap. Penggunaan teknologi *combined cycle* menjadikan operasi pembangkit lebih efisien sebab cara ini memanfaatkan gas panas pembuangan pembangkit listrik primer pada turbin gas menjadi tenaga listrik pada tahap sekunder. Pipa-pipa HRSG terbagi menjadi empat bagian yaitu *preheater*, *economizer*, *evaporator*, dan *superheater*. *Preheater* merupakan penukar kalor sebagai pemanas awal untuk air kondensat dari kondensasi di kondensor sebelum siap untuk menjadi air pengisi (*feed water*) di *deaerator*. *Preheater* berada pada bagian akhir atau paling atas dari *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) untuk menyerap energi terendah dari gas buang. *Economizer* ini merupakan pemanas awal untuk air pengisi *Heat Recovery Steam Gene-rator* (HRSG), dimana air

pengisi akan mengalir dari deaerator menuju steam drum. Pada *Economizer* ini proses yang terjadi yaitu pemanasan sensible, yaitu menaikkan temperatur air tanpa merubah fase. *Evaporator* atau *boiler bank* merupakan alat penukar kalor dimana akan menghasilkan uap jenuh (*saturated*) dari *feed water*. *Feed water* dalam fase *saturated* yang ada dalam pipa akan ke drum dan terpisah antara yang masih berupa fase cair dan fase *saturated steam*. *Superheater* merupakan alat penukar kalor pada *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) yang menghasilkan uap panas lanjut (*superheated steam*) untuk menggerakkan turbin uap.

Pada masing-masing pipa tersebut terdapat pipa *Venting Isolation High Pressure Superheater* yang berfungsi mengurangi tekanan berlebih sehingga tekanan dalam pipa terjaga sesuai prosedur operasional dan ketahanan material penyusun pipa. Dalam studi kasus ini saya menemukan kegagalan pada sambungan las pipa *Venting Isolation High Pressure Superheater* yang menempel pada pipa *Header* di sistem HRSG PLTGU. Fluida yang mengalir didalam pipa *venting* ini sudah berisi uap jenuh (*saturated vapor*) yang beroperasi pada temperatur dan tekanan masing-masing 525°C dan 111 bar sehingga material penyusun pipa yang digunakan haruslah sesuai dengan standar kondisi operasinya.

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui penyebab dan mekanisme kegagalan sambungan las pipa *Venting Isolation High Pressure Superheater* pada *Heat Recovery Steam Generator* di sistem Pem- bangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap.

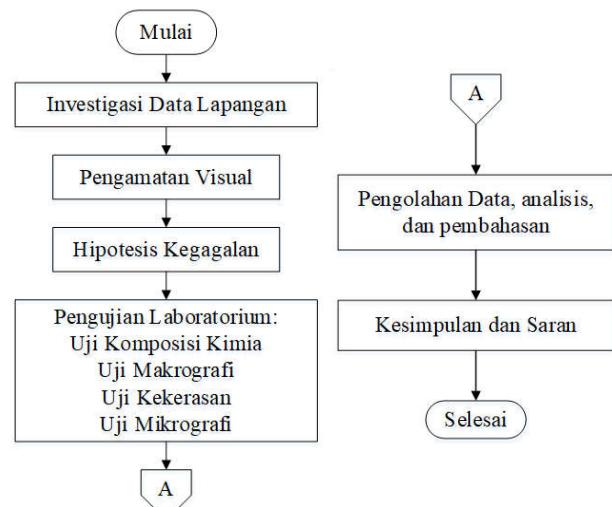


Gambar 1. Posisi kerja pipa venting isolation pada ruang HRSG

Metode Penelitian

Metode penelitian dilakukan untuk bisa menginvestigasi mekanisme dan penyebab kegagalan pipa *venting isolation*. Alur kerja penelitian ini ditunjukkan pada gambar 2. Untuk mencapai tujuan ini investigasi lapangan dan pendekatan eksperimen di

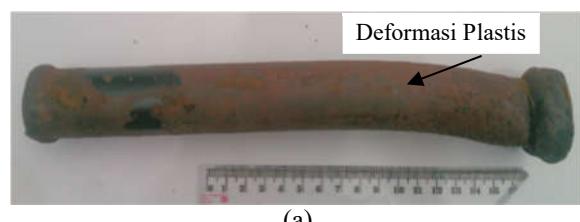
tingkat laboratorium dilakukan untuk mengungkap bukti-bukti yang terkait dengan kegagalan. Pengujian yang dilakukan antara lain komposisi kimia, makrografi dan mikrografi, serta kekerasan.



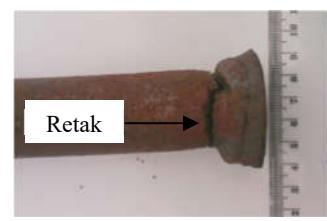
Gambar 2. Diagram alir penelitian

Hasil dan Pembahasan

Gambar 3a memperlihatkan pipa yang mengalami deformasi plastis dengan berubahnya geometri pipa dari lurus menjadi melengkung. Tingkat deformasi tergantung pada sifat mekanik logamnya serta besaran dan tipe-tipe gaya yang menyebabkan deformasi [2]. Deformasi ini diakibatkan oleh fenomena *creep* dimana material ini sudah digunakan dalam jangka waktu yang panjang dengan kondisi beban dan temperatur tinggi yang konstan yaitu sekitar 525°C dan 111 bar sehingga menyebabkan deformasi sedikit demi sedikit terhadap materialnya. Pada kasus ini material mungkin mengalami penurunan sifat mekanis akibat pemakaian jangka panjang pada temperatur tinggi [3].



(a)



(b)

Gambar 3. (a) Pipa Venting Isolation yang mengalami kegagalan berupa deformasi plastis, (b) retakan pada sambungan las pipa Venting Isolation

a. Hasil Uji Komposisi Kimia

Pada tabel 1. menunjukkan komposisi kimia pipa *Venting Isolation HP Superheater* yang dibandingkan dengan standar dari ASTM A213 T2. Hasil dari pengujian ini menunjukkan bahwa unsur utamanya adalah Fe sebesar 96,7 % dan unsur paduan yang paling dominan adalah Cr-Mo masing-masing sebesar 0,784 % dan 0,539 % sedangkan kandungan karbonnya sebesar 0,139 %. Dengan demikian material pipa *Venting Isolation* masuk ke dalam klasifikasi baja paduan rendah (*Low-Alloy Steel*) dan standar ASTM A213 grade T2 sesuai dengan karbon, kromium, dan molybdenum yang terkandung pada material tersebut. ASTM A213 T2 adalah spesifikasi standar untuk *Seamless Ferritic and Austenitic-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tube*.

Adanya unsur Cr bisa meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi seperti ketahanan oksida sedangkan Mo berfungsi sebagai penguat ketika larut di dalam *ferrite* untuk membentuk *solid solution* [3]. Dari data tersebut pipa *Venting Isolation HP Superheater* termasuk dalam golongan *Low Alloy Steel* dan memenuhi spesifikasi sesuai dengan standar ASTM A213 T2.

Tabel 1. Komposisi Kimia Pipa *Venting Isolation*

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Hasil Pengujian	96,7	0,139	0,347	0,454	>0,1	0,1	0,784	0,539
ASTM A213 T2	Ba l.	0,10 – 0,20	0,10 – 0,30	0,30 – 0,61	0,02 – 5	0,0 – 25	0,50 – 1,81	0,44 – 0,65

b. Hasil Uji Makrografi

Gambar 4a menunjukkan daerah *weld zone*, *base metal*, *crack*, dan *HAZ*. Gambar 4b memperlihatkan keretakan berawal dari permukaan luar pipa yang mengalami kegagalan kira-kira berjarak 0,1 mm dekat dengan sambungan las dan perbatasan *HAZ* kemudian menjalar ke permukaan dalam pipa. Lokasi awal retakan ini bergantung pada tegangan relatif dan gradien kekuatan materialnya. Arah dari retakan biasanya berhubungan dengan arah tegangan yang bisa menyebabkan kegagalan [5]. Pada gambar 4b terlihat sangat jelas sekali adanya *oxide layer* yang melapisi permukaan atas pipa yang mengalami kegagalan. *Oxide layer* ini berfungsi untuk melapisi *base metal* berkontak langsung dengan lingkungan sehingga bisa mencegah reaksi oksidasi dengan oksigen yang dapat menimbulkan karat pada logam atau bisa juga sebagai produk korosi yang dihasilkan oleh lingkungan.

Gambar 4c di bawah memperlihatkan karakteristik permukaan pipa yang mengalami kegagalan. Dari bentuk konturnya bisa disebut bahwa patahnya yaitu patah ulet dengan ditandai bentuk patahan

seperti kawah atau *cup*. Bentuk patahan ini sedikit menunjukkan bahwa material ini bersifat ulet dengan kandungan karbonnya kurang dari 0,15 wt% sesuai standar ASTM A213 T2 dan juga ditunjukkan pada geometri pipa *venting* yang melengkung yang bisa dilihat di subab pengamatan visual karena mengalami deformasi plastis.

c. Hasil Uji Kekerasan

Daerah objek yang akan diinvestigasi nilai kekerasannya pada sambungan las pipa *Venting Isolation* adalah *weld zone*, *HAZ*, *near the crack*, dan *base metal*. Ketiga daerah ini memiliki karakteristik masing-masing dikarenakan adanya pengaruh panas dari las seperti di daerah *weld zone* dan *HAZ* dan yang tidak terpengaruh panas seperti di daerah *base metal*. Arah titik kekerasan yang dilakukan terbagi menjadi dua yaitu arah vertikal dari atas permukaan pipa hingga ke dalam pipa dan arah horizontal pipa dari *HAZ*, *near the crack*, hingga *base metal*. Ilustrasi titik uji kekerasan digambarkan 5a dan 5b.

Tiga daerah yaitu *weld zone*, *HAZ*, dan *base metal* adalah daerah dari spesimen sambungan las pipa *venting isolation* yang ingin diketahui nilai kekerasannya pada pengujian kekerasan pertama ini dengan masing-masing daerah berjumlah enam titik kekerasan. Gambar 5c memperlihatkan kekerasan daerah base metal nilainya diantara 160-180 HV lebih rendah dari daerah weld zone yaitu sekitar 180-200 HV. Nilai kekerasan yang paling tinggi berada pada daerah *HAZ* yaitu diantara 240-270 HV. Kenaikan kekerasan pada daerah *HAZ* dikarenakan pengaruh panas akibat proses pengelasan dan juga sekaligus mempengaruhi struktur mikronya [4].

Tujuan dilakukannya uji kekerasan arah horizontal untuk mengetahui apakah ada perubahan nilai kekerasan yang signifikan terhadap daerah yang dekat dengan keretakan dan jauh dari sambungan las. Hasil pengujian dapat dilihat di Gambar 4d yang berupa grafik tingkat kekerasan dari daerah *HAZ* hingga ke *base metal* dengan melewati daerah dekat dengan keretakannya. Gambar 4d di atas menjelaskan bahwa nilai kekerasan yang paling tinggi masih berada di daerah *HAZ* sekitar 240-270 HV kemudian mengalami penurunan seiring menjauhi daerah las-lasannya. Naiknya nilai kekerasan ini disebabkan oleh pengaruh panas dari proses pengelasan. Pada daerah dekat dengan retakan menunjukkan adanya penurunan yang signifikan setelah melewati daerah *HAZ*nya tetapi masih di atas nilai kekerasan *base metal*nya.

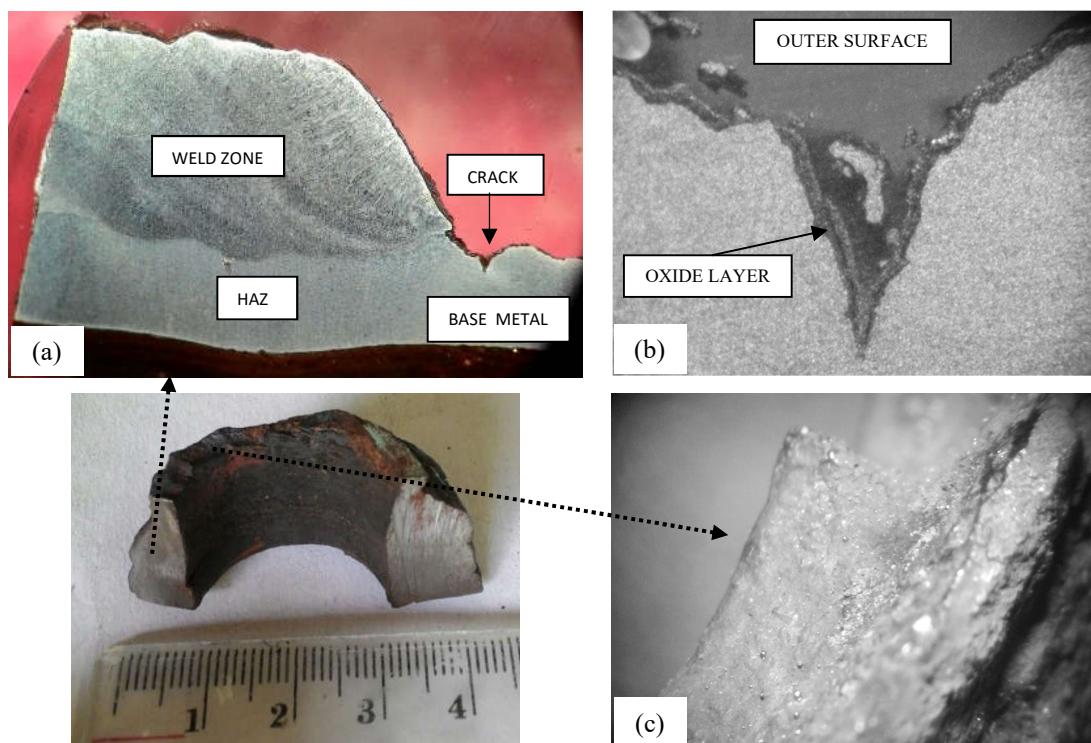
Pada tabel 2 hasil perbandingan pengujian kekerasan dan kekuatan tarik spesimen sambungan las pipa *venting isolation* menunjukkan bahwa sifat

mekaniknya masih dalam keadaan standar dimana nilai kekuatan tariknya berada di atas minimal nilai standar ASTM A213 dan juga untuk kekerasannya masih berada dalam *range* yang wajar yaitu sekitar 170-an. Nilai pengujian kekerasan ini sifatnya hanya relatif bukan nilai yang mutlak, karena mungkin ada beberapa faktor yang mempengaruhi hasil kekerasannya pada saat pengujian. Nilai kekerasan dan kekuatan tarik suatu material mempunyai hu-

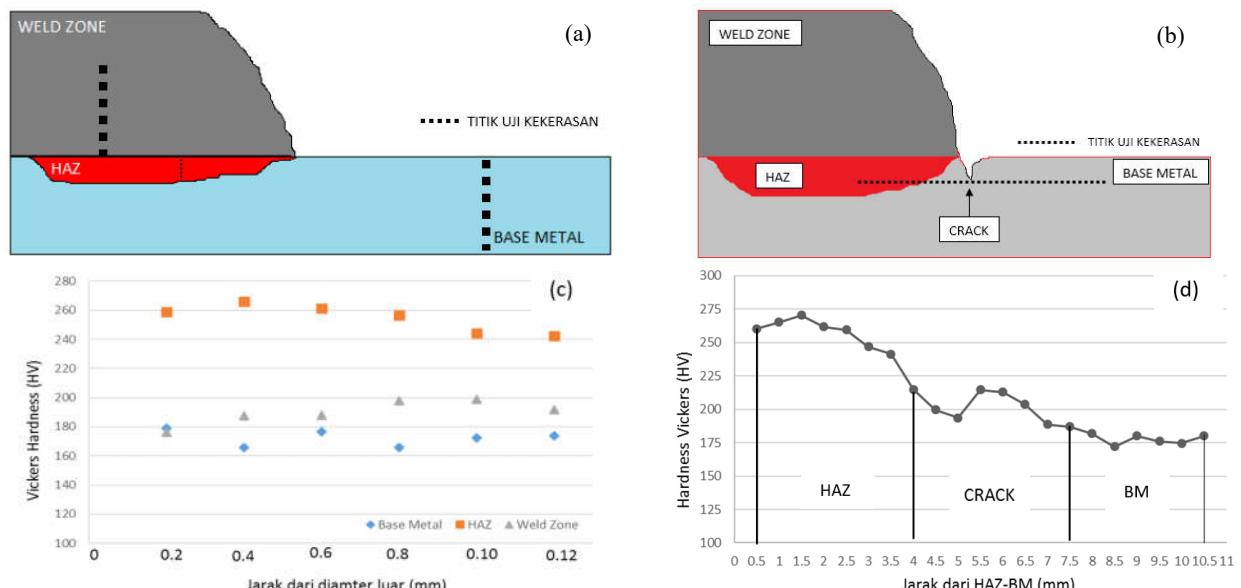
bungan yang spesifik, jika kekerasannya naik maka kekuatan tariknya juga akan menaik.

Tabel 2. Hasil Perbandingan Pengujian Kekerasan dengan Standar ASTM A213

DATA	HV	TS (MPa)
ASTM A213 T2	Max. 170	Min. 415
Pengujian I	172	593,4
Pengujian II	179	617,5



Gambar 4. Hasil uji makrografi, (a) Spesimen daerah sambungan las pipa *Venting Isolation* perbesaran 1x mikroskop optik, (b) daerah keretakan perbesaran 30x mikroskop optik, (c) permukaan pipa yang mengalami kegagalan perbesaran 10x mikroskop optik



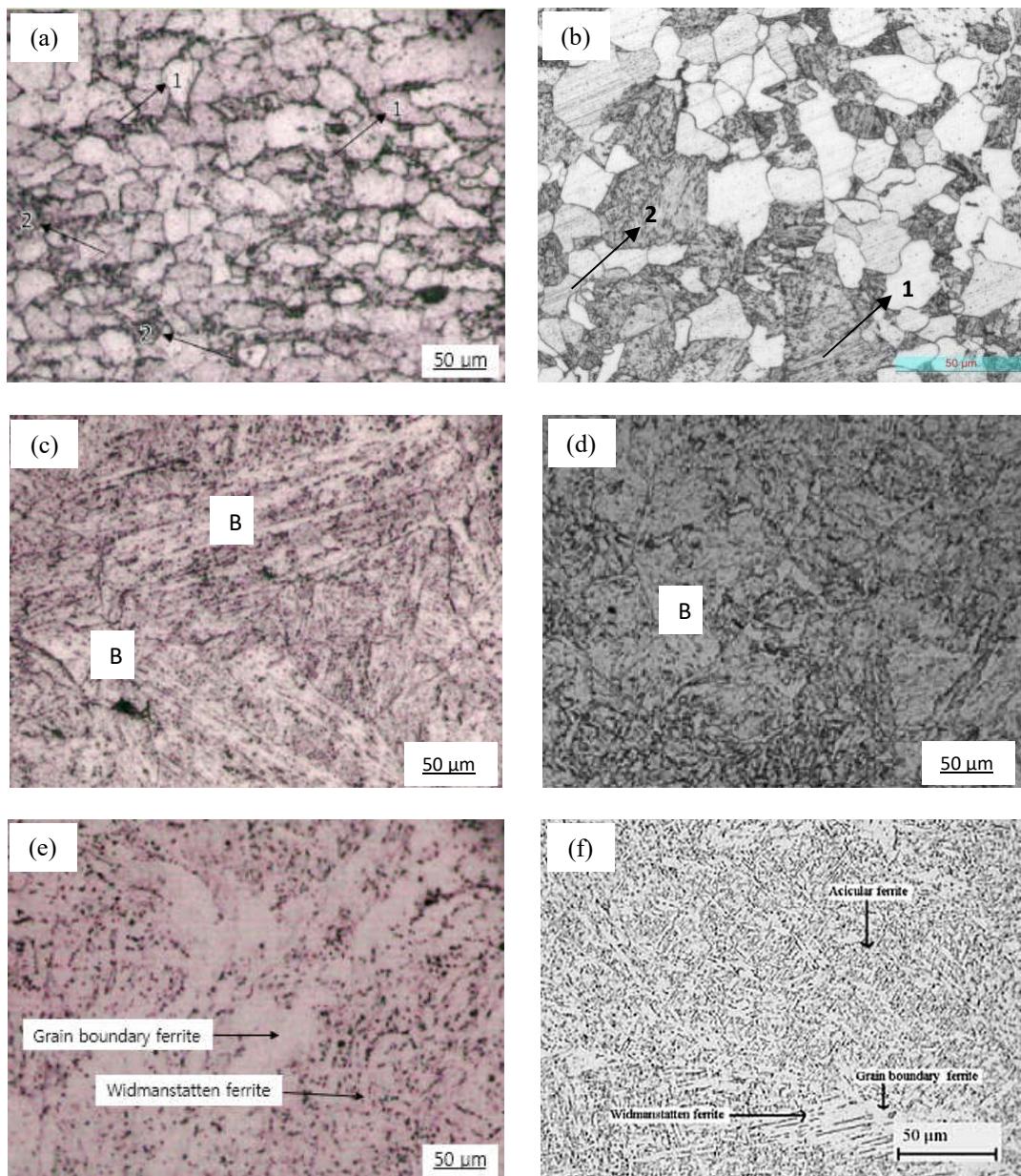
Gambar 5. (a) Ilustrasi titik uji kekerasan I, (b) ilustrasi titik uji kekerasan II, (c) hasil uji kekerasan I, dan (d) hasil uji kekerasan II

d. Hasil Uji Mikrografi

Pengujian mikrografi ini tentunya untuk melihat struktur mikro dari spesimen sambungan las pipa *venting isolation* sekaligus memperkuat data uji kekerasan. Daerah objek yang diuji sama dengan pengujian kekerasan yaitu *weld zone*, *HAZ*, *near the crack*, dan *base metal*. Pengujian mikrografi ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik Teknik Mesin Undip. Larutan etsa yang digunakan adalah 5 ml HNO_3 dan 100 ml ethanol. Gambar hasil mikrografi pada tiap daerah dapat dilihat di bawah ini.

Gambar 6a struktur mikro daerah *base metal* terdiri dari butir *ferrite* (terang) dan *pearlite* (gelap).

Hasil investigasi struktur mikro daerah *base metal* ini menampakan bahwa butir *pearlite* terdistribusi di dalam matrix *ferrite* namun masih dalam jumlah yang sedikit dibanding butir *ferrite*. Daerah *HAZ* ditunjukkan Gambar 6c mikrostrukturnya adalah *bainite* yang berbentuk seperti jarum-jarum memanjang yang tersebar pada matrix *ferrite*. Butir *bainite* ini terbentuk akibat pengaruh panas selama proses pengelasan. Keberadaan paduan Cr dan Mo ini meningkatkan kekerasan dan menyumbangkan pembentukan *bainite* meskipun laju pendinginannya yang lambat [9].



Gambar 6. Hasil uji mikrografi, *base metal* (1-fasa ferrite, 2-fasa pearlite), (a) pipa *venting isolation* perbesaran 200x, (b) pipa 2.25Cr-1Mo pembanding perbesaran 500x [6]; *HAZ* (*bainite*), (c) pipa *venting isolation* perbesaran 200x, (d) pipa *low-alloy steel* pembanding jurnal [7]; dan *weld metal* (*widmanstatten ferrite*), (e) pipa *venting isolation* perbesaran 200x, (f) pipa *low-alloy steel* pembanding jurnal [8]

Mikrostruktur di daerah *weld zone* yang ditunjukkan pada Gambar 6e di atas ini terlihat adanya endapan karbon dari cementite (Fe_3C) berbentuk seperti bulat (*spheroidized*) yang tersebar pada matrix ferrite (unsur putih). Mikro-struktur weld zone menunjukkan kombinasi dari jenis Widmanstatten ferit, perlit dan bainit. *Spheroidite* ini terbentuk akibat perlakuan panas jangka panjang di bawah temperatur *eutectoid* $727^{\circ}C$. Transformasi ini telah terjadi dengan difusi karbon tanpa merubah komposisi atau jumlah relatif fasa ferrite dan cementite [5].

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, hasil uji komposisi kimia menunjukkan bahwa material pipa *Venting Isolation* masuk kedalam golongan *Low-Alloy Steel* berdasarkan standar ASTM A213 T2 *Seamless Ferritic and Austenitic-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tube*.

Dari hasil makrografi dapat menentukan penyebab kegagalan sambungan las pipa *venting isolation high pressure superheater* yaitu *toe crack* yang diakibatkan oleh keberadaan konsentrasi tegangan, cacat las, dan juga tegangan sisa las. Karakteristik patahannya adalah patah ulet.

Mekanisme kegagalan sambungan las pipa *venting isolation high pressure superheater* adalah dengan terjadinya deformasi plastis pada *base metal* yang ditunjukkan pada pengamatan visual karena fenomena *creep* membuat struktur sambungan las menjadi rentan. Adanya konsentrasi tegangan pada sambungan las menjadi pemicu awal terbentuknya retakan dengan dibantu tegangan sisa las yang tinggal akibat tidak adanya pemberian perlakuan panas pada struktur las.

Daftar Pustaka

- [1] Makhlof AS, Aliofkhazraei M, editors. *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries*. Butterworth-Heinemann; 2015 Sep 7.
- [2] Wulpi DJ. *Understanding how components fail*. ASM international; 2013 Oct 1.
- [3] Xu H, Huang XK, Yang Z, Pan JT. Property changes of 12Cr1MoV with 10CrMo910 main steam piping after long-term high-temperature service. *Engineering Failure Analysis*. 2003 Apr 30;10(2):245-50.
- [4] Lee HS, Jung JS, Kim DS, Yoo KB. Failure analysis on welded joints of 347H austenitic boiler tubes. *Engineering Failure Analysis*. 2015 Nov 30;57:413-22.
- [5] Callister WD, Rethwisch DG. *Materials science and engineering: an introduction*. New York: Wiley; 2007.
- [6] Mallik M. *Effect of microstructure on the indentation creep behaviour of 2.25 Cr-1Mo and its comparison with modified 9Cr-1Mo ferritic steel* (Doctoral dissertation).
- [7] Al Hajri M, Malik AU, Meroufel A, Al-Muaili F. Premature failure of dissimilar metal weld joint at intermediate temperature superheater tube. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2015 Apr 30;3:96-103.
- [8] Moore PL, Howse DS, Wallach ER. Microstructure and properties of autogenous high-power Nd: YAG laser welds in C-Mn steels. *6th International Conference: Trends in Welding Research 2002* Apr (pp. 748-753).
- [9] Natarajan S, Babu SK. Corrosion and its inhibition in SA213-T22 TIG weldments used in power plants under neutral and alkaline environments. *Materials Science and Engineering: A*. 2006 Sep 25;432(1):47-51.