

KARAKTERISASI STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN SAMBUNGAN LAS BAJA T91 DAN BAJA 409L PADA SISTEM HRSG

Sri Nugroho^{1,*}, Budi Wahyono¹

¹ Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

* E-mail: srinugroho2004@yahoo.com

Abstrak

Baja T91 atau *grade 91* merupakan material yang sering digunakan dalam aplikasi *tubing* pada *heat recovery steam generator (HRSG) power plant*, terutama pada pembangkit tenaga nuklir. Baja ini mempunyai keunggulan seperti ketahanan mulur yang tinggi, ketahanan korosi dan ketahanan pada temperatur tinggi. Namun, kelemahan baja T91 adalah sifat mampu las (*weldability*) yang relatif rendah, yaitu meningkatnya kekerasan secara signifikan pada daerah *heat affected zone (HAZ)* dan *weld metal (WM)*. Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah melakukan peninjauan terhadap sambungan las baja T91 disambung dengan baja tahan karat feritik (baja 409L). Pada struktur mikro sambungan baja T91 ditemukan jumlah endapan karbida yang berbeda pada daerah *base metal* dan daerah HAZ yang ini mempengaruhi nilai kekerasan yang signifikan. Pada daerah *base metal* dan HAZ baja tahan karat feritik 409L ditemukan presipitasi penstabil baja yang distribusinya jumlahnya hampir sama yang ini tidak mempengaruhi peningkatan kekerasan di setiap daerahnya. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian kekerasan mikro mikrografi, mikrovickers dan SEM. Dari hasil pengujian tersebut, didapatkan bahwa struktur sambungan las ini terdapat daerah HAZ, *fusion line* dan *base metal (BM)*. Adapun daerah HAZ baja T91 mengalami peningkatan kekerasan yang signifikan. Sedangkan daerah HAZ baja 409L tidak mengalami peningkatan kekerasan yang signifikan. Pada daerah *base metal* dan HAZ baja T91 ditemukan adanya endapan karbida CrXCy dalam jumlah yang berbeda. Pada daerah HAZ dan T91 ditemukan adanya endapan TiX pada setiap daerahnya.

Kata kunci : *heat affected zone, base metal, microstructure, stainless steel, T91, 409L*

Pendahuluan

Proses pengelasan *high frequency resistance welding (HFRW)* merupakan salah satu proses pengelasan yang terkenal dalam proses manufaktur. Pengelasan ini umumnya digunakan untuk pembuatan *finned tube* atau pipa bersirip yang biasanya digunakan dalam HRSG atau boiler di pembangkitan listrik. Proses pengelasan ini memanfaatkan resistansi dari arus listrik berfrekuensi tinggi sehingga panas las dapat terfokuskan dan mencairkan logam induk [1,2].

Pipa yang dilas menggunakan metode ini harapannya dapat memberikan hasil yang maksimal terhadap sambungan las dalam proses penyambungan pipa dan siripnya. Di dalam penggunaan *finned tube* ini diharapkan pipa yang digunakan mampu tahan dalam kondisi

temperatur yang tinggi dan tahan terhadap korosi [1]. Serta pipa yang digunakan memiliki kekuatan yang bagus untuk menahan beban fluida yang sedang mengalir dalam proses pembangkitan listrik.

Adapun material yang akan diteliti dalam pembahasan kali ini adalah sambungan las *fine-tube* baja T91 dan baja 409L. Baja T91 merupakan jenis baja *creep and heat resistant alloy* yang termasuk dalam standar JIS. Baja T91 ini dikembangkan dalam rangka untuk memenuhi kebutuhan *power plant*. Saat ini baja jenis ini merupakan baja yang banyak dipilih untuk aplikasi *steam generator* karena baja ini memiliki sifat yang tahan mulur dan temperatur tinggi dan memiliki ketahanan korosi yang baik. Akan tetapi baja ini memiliki sifat kemampuan yang relatif rendah, dimana baja

mengalami peningkatan kekerasan yang signifikan setelah melewati siklus pengelasan [4].

Kemudian untuk baja 409L merupakan jenis baja tahan karat feritik yang digunakan pada aplikasi temperatur tinggi [7]. Baja ini digunakan untuk pengelasan *spiral finned tube* sebagai komponen sirip karena memiliki sifat mampu las yang sangat baik. Baja ini memiliki kandungan karbon yang sangat rendah, akan tetapi unsur paduan yang mendominasi dalam baja ini adalah unsur *ferrite stabilizer* [6]. Unsur paduan ini bertujuan untuk menambah jumlah butir ferit pada struktur baja yang nantinya meningkatkan sifat kemampulan baja ini. Berbeda dengan baja T91, baja ini setelah melewati proses pengelasan kekerasan daerah HAZ baja ini tidak ada perbedaan yang signifikan terhadap logam induknya [1,5].

Salah satu cara yang bisa digunakan dalam menentukan dan mengetahui kondisi dan sifat dari pipa tersebut adalah dengan melakukan uji pengamatan yang mendalam terhadap pipa yang digunakan tersebut. Terlebih pipa yang digunakan ini adalah *finned tube* yang merupakan proses penyambungan pipa utama dari Baja T91 dan Baja 409L sebagai sirip dengan proses HFRW. Untuk itu perlu dikaji lebih dalam lagi mengenai kondisi sambungan las tersebut melalui uji pengamatan dalam perbesaran yang tinggi yang nantinya akan dapat terlihat struktur mikro dari sambungan las tersebut.

Sambungan las yang akan diamati meliputi kondisi dari base metal dari setiap material baik pipa yang dari material Baja T91 dan sirip dari material 409L serta daerah HAZ dari setiap masing-masing material (Baja T91 maupun Baja 409L). Tujuan melakukan uji pengamatan nantinya dengan tingkat perbesaran yang lebih tinggi, nantinya akan dapat terlihat bagaimana kondisi dari struktur mikro, struktur kristal, endapan karbida yang mungkin terjadi dan fasa – fasa pada sambungan las kedua material.

Metodologi Penelitian

Spesimen yang digunakan berupa *spiral finned tube* material baja T91 (*tube*) dan baja 409L (*fin*). Spesimen tersebut diperoleh dari penelitian sebelumnya selama pengambilan data

di perusahaan fabrikasi PT. Cilegon Fabricators (Gambar 1). Spesimen A adalah spesimen *finned tube* yang dilakukan pengelasan dengan *heat input* 2,28 kJ/mm.

Spesimen B adalah spesimen *finned tube* yang dilakukan pengelasan dengan *heat input* 3,29 kJ/mm.



Gambar 1. a) Spesimen A; b) Spesimen B

Pengujian mikrografi dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dan SEM/EDS masing-masing di Laboratorium Material Teknik, Teknik Mesin dan UPT Laboratorium Terpadu, Universitas Diponegoro.

Untuk mengetahui distribusi kekerasan pada daerah BM dan HAZ, maka dilakukan pengujian kekerasan mikro Vickers. Pengujian kekerasan tersebut mengacu standar ASTM E-384, dimana untuk spesifikasi pembebanan mikro-indentasi adalah sebesar 200gf dengan lama waktu 10+2 detik. Alat uji kekerasan yang digunakan adalah mesin mikro-indentasi kekerasan Vickers HM-200 Mitutoyo, dimana pengujian tersebut dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro.

Hasil dan Pembahasan

Struktur Mikro HAZ Sambungan Las HFRW *Spiral Finned-Tube* T91 dengan 409L

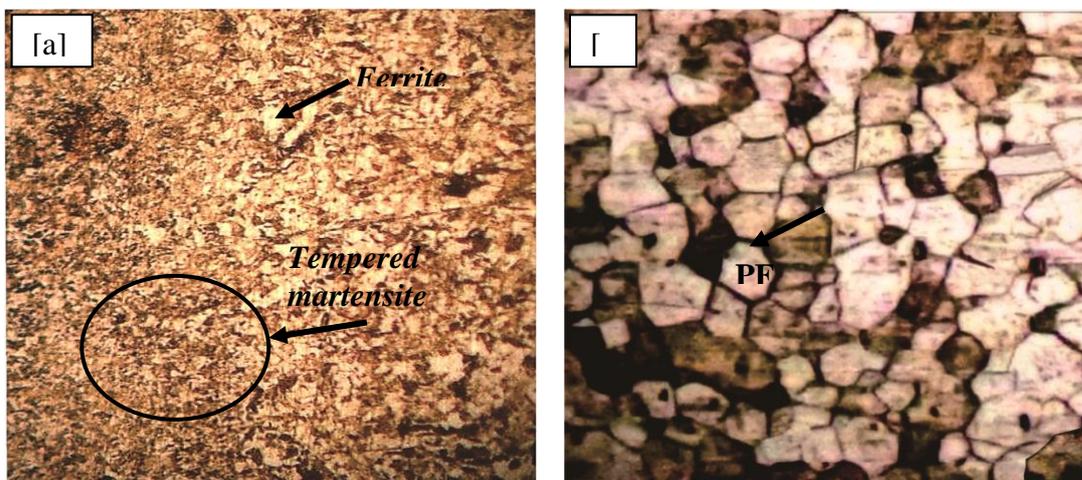
Analisis struktur mikro yang dilakukan terhadap spesimen A dan B dalam rangka untuk mengetahui bentuk butir dan fasanya. pada daerah BM maupun HAZnya. Gambar 2 (a) dan (b) menunjukkan gambar struktur mikro BM baja 409L dan baja T91. Baja 409L adalah baja yang digunakan untuk komponen *fin* dan baja

T91 untuk komponen pipa. Struktur mikro BM baja 409L didominasi oleh butir fasa *ferrite* yang memiliki sisi banyak (*polygonal*). Oleh karena itu butir – butir ini dikenal dengan nama *polygonal ferrite* (PF). Sedangkan pada Gambar 2(b) menunjukkan struktur mikro baja T91 yang juga didominasi oleh butir – butir *ferrite*. Akan tetapi butir *ferrite* ini memiliki bentuk yang sangat kecil, kemudian bercabang, lebar dan tajam. Butir *ferrite* ini disebut dengan nama *acicular ferrite*. Pada struktur mikro baja T91 ini butir *ferrite* yang berwarna terang tak bercabang yang memiliki sisi banyak merupakan *polygonal ferrite*. Selain itu beberapa juga terdapat butir *tempered martensite*.

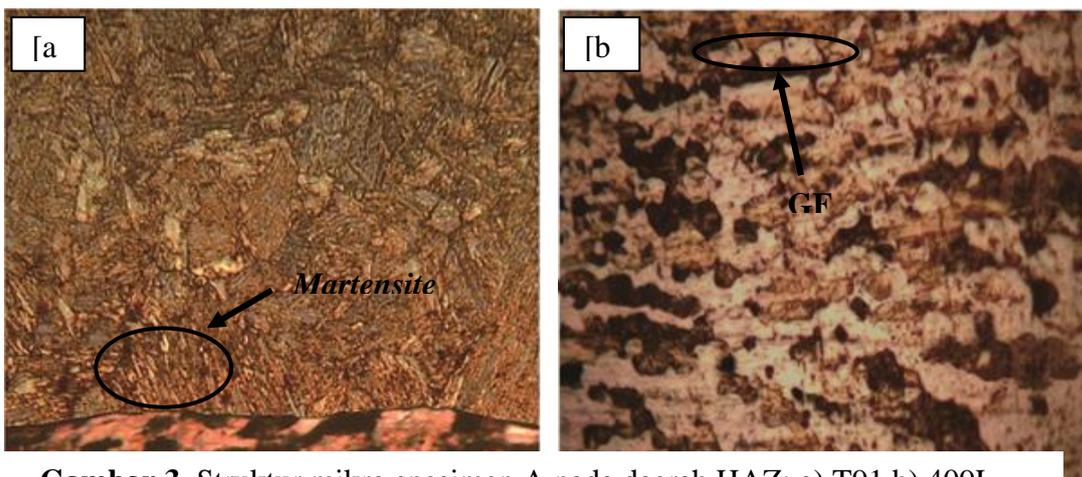
Pada Gambar 3(a), daerah HAZ T91 spesimen A terjadi penghalusan butir, dimana pada daerah penghalusan butir terdapat butir *acicular ferrite* (AF) yang lebih tajam dan kecil dan daerah pertumbuhan butir terdapat butir *acicular ferrite* (AF) yang besar [8]. Selain itu

pada daerah HAZ ini terdapat butir *martensite* yang mempengaruhi nilai kekerasan daerah ini. Tekstur warna yang cukup gelap pada daerah penghalusan butir kemungkinan besar dapat terjadi karena adanya penumpukan karbida selama proses pengelasan [1]. Adanya penghalusan butir di dekat daerah batas antara HAZ T91 dengan 409L dan adanya kemungkinan penumpukan karbida maka kemungkinan juga akan terjadi perbedaan kekerasan antara daerah HAZ T91 dan logam induknya. Pada Gambar 3(b) daerah HAZ 409L untuk spesimen A terjadi penghalusan butir. Pada daerah penghalusan butir terdapat butir-butir *ferrite* dengan jenis *grain boundary ferrite* (GF) [8].

Butir *ferrite* ini memiliki bentuk yang cenderung lebih lebar, hal ini dikarenakan *fine tube* ini dalam pembuatannya melalui proses HFRW yang di dalamnya ada mekanisme rolling saat pengelasan.



Gambar 2. Struktur mikro daerah BM: a) T91, b) 409L



Gambar 3. Struktur mikro spesimen A pada daerah HAZ: a) T91 b) 409L

Pada Gambar 4(a) di atas daerah HAZ 409L untuk spesimen B terjadi penghalusan butir di daerah HAZ 409L. Sama halnya dengan spesimen A, pada spesimen B daerah penghalusan butir terdapat butir – butir *ferrite* yang ukurannya kecil dengan butir *ferrite* jenis *grain boundary ferrite* (GF) [8]. Butir *ferrite* ini memiliki bentuk yang cenderung lebih lebar, hal ini dikarenakan *fine tube* ini dalam pembuatannya melalui proses HFRW yang di dalamnya ada mekanisme rolling saat pengelasan. Pada Gambar 4(b), sama halnya dengan spesimen A, daerah HAZ T91 spesimen B terjadi penghalusan butir, dimana pada daerah penghalusan butir terdapat butir *acicular ferrite* (AF) yang lebih tajam dan kecil dan daerah pertumbuhan butir terdapat butir *acicular ferrite* (AF) yang besar [31]. Tekstur warna yang cukup gelap pada daerah penghalusan butir kemungkinan besar dapat terjadi karena adanya penumpukan karbida selama proses pengelasan [1]. Adanya penghalusan butir di dekat daerah batas antara HAZ T91 dengan 409L dan adanya kemungkinan terjadinya pengendapan karbida maka kemungkinan juga akan terjadi adanya perbedaan nilai kekerasan antara daerah HAZ T91 dan logam induk baja T91. Berdasarkan hasil pengujian struktur mikro pada spesimen A dan spesimen B, terlihat bahwa struktur mikro HAZ 409L mengalami perubahan bentuk butir dan penghalusan butir dari *base metal* 409L.

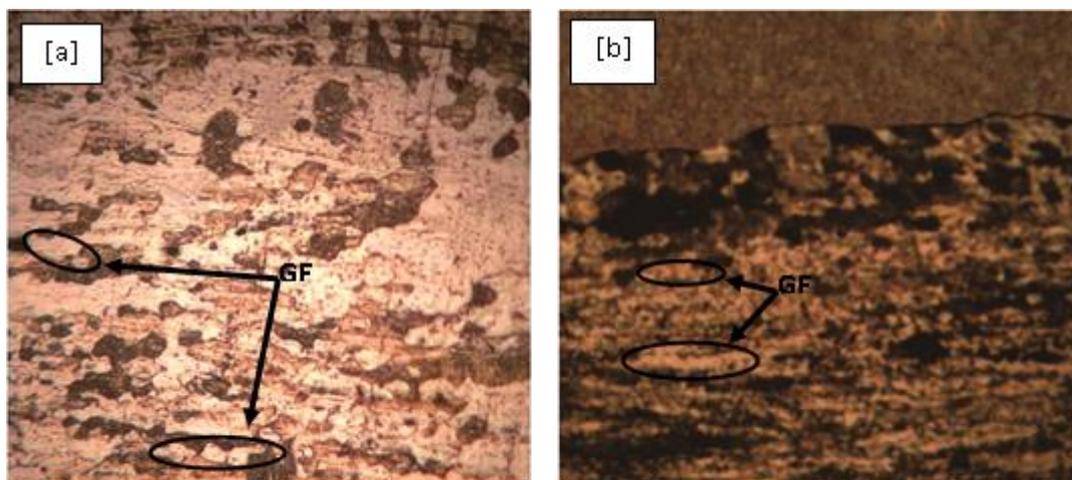
Pun juga sama halnya dengan baja T91 dimana terjadi juga penghalusan butir pada daerah *base metal* T91 dan daerah HAZ baja T91. Dari kedua material butir-butir yang ada pada masing-masing daerah relatif sama yaitu adanya butir – butir *ferrite*.

Analisis Hasil Uji SEM

Pengujian SEM dilakukan dalam rangka untuk mengetahui struktur dari material dengan perbesaran yang lebih tinggi. Untuk uji SEM ini dilakukan pada daerah BM maupun daerah HAZ pada masing – masing spesimen. Adapun Gambar 5 (a) dan (b) masing – masing merupakan hasil pengujian SEM pada logam induk baja 409L dan HAZ 409L.

Pada Gambar 5 (a) dan (b) terlihat bahwa struktur 409L terdapat butir *ferrite* yang memiliki sisi banyak (*polygonal*). Hal uji SEM ini identik dengan hasil uji *optical microscope*. Pada gambar diatas juga terlihat bahwa batas – batas butir terlihat jelas seperti pada uji *optical microscope*. Gambar di atas juga terlihat beberapa endapan yang terjadi pada daerah tersebut dengan jumlah endapan yang hampir sama jumlahnya. Untuk jenis endapan yang ada pada baja 409L ini perlu di ketahui nantinya pada uji EDX dalam mengetahui kandungan unsur yang ada pada endapan tersebut.

Pada Gambar 6 (a) dan (b) menunjukkan daerah HAZ baja 409L di masing – masing



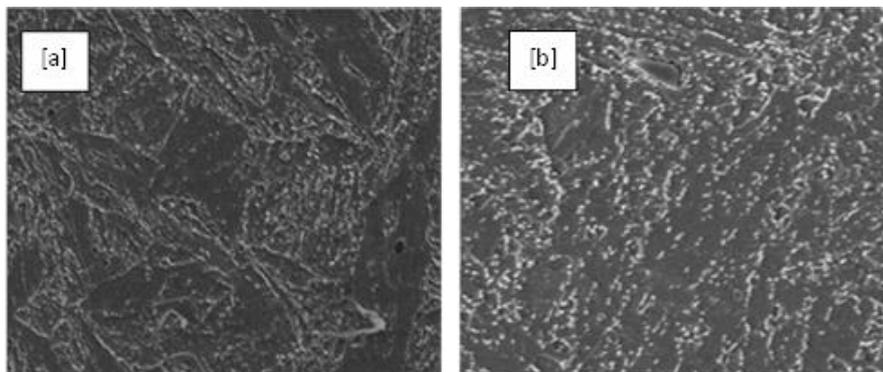
Gambar 4. Struktur mikro spesimen B pada daerah HAZ: a) T91 b) 409L

spesimen. Bentuk butir pada daerah HAZ masih hampir sama dengan daerah *base metal* dimana butirnya adalah jenis *ferrite* dan bersisi banyak (*polygonal*). Gambar di atas juga mengindikasikan adanya endapan yang terjadi pada daerah tersebut. Untuk daerah HAZ ini bentuk butir semakin rapat dan semakin halus dan ada endapan – endapan yang terjadi di daerah tersebut. Secara jumlah endapan yang terjadi memiliki jumlah yang relatif sama dengan yang terjadi di daerah *base metal*. Jenis endapan yang ada pada baja 409L ini perlu diketahui nantinya pada uji EDX dalam mengetahui kandungan unsur yang ada pada endapan tersebut. Kandungan unsur sangat mempengaruhi dari sifat yang dibentuk oleh suatu material.

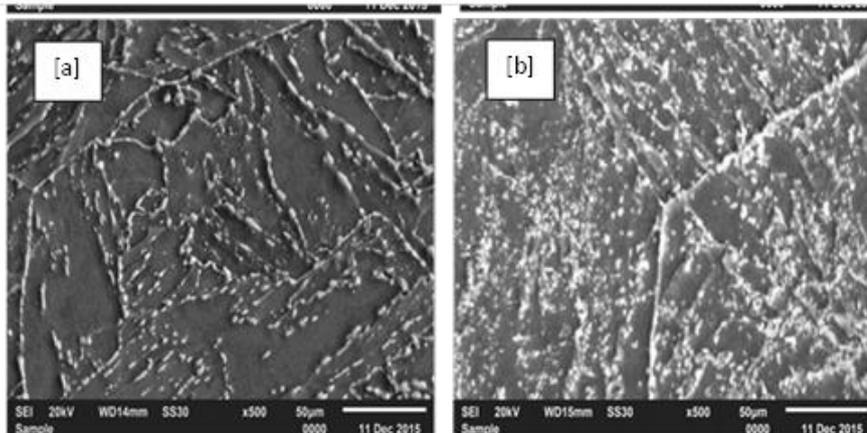
Gambar 7 (a) dan (b) menunjukkan daerah pada *base metal* baja T91 di mana terlihat dengan jelas banyaknya endapan yang terjadi pada daerah *base metal*. Presipitasi ini

tersebar hampir merata. Bedanya adalah untuk spesimen B presipitasi yang terjadi lebih banyak dan lebih merata daripada spesimen A. Endapan yang terjadi di daerah *base metal* ini kemungkinan adalah presipitasi yang mengandung unsur kromium, mengingat baja T91 ini paduan yang jumlahnya banyak dalam komposisi kimianya adalah unsur kromium (Cr).

Gambar 8 (a) dan (b) di bawah merupakan hasil uji SEM daerah HAZ T91 di masing – masing spesimen. Diatas terlihat bahwa endapan putih – putih tersebut masih ditemukan di baja T91 sama seperti apa yang terjadi di daerah *base metal* T91. Akan tetapi yang terlihat agak berbeda disini adalah endapan presipitasi yang terjadi di daerah HAZ ini posisi letaknya sedikit berbeda dari *base metal*. Dimana untuk di daerah HAZ ini presipitasi yang terjadi sudah memasuki daerah batas – batas butir, walaupun sebagian beberapa masih ada di dalam butir.



Gambar 7. (a) Base Metal T91 Spesimen A, (b) Base Metal 409L Spesimen B



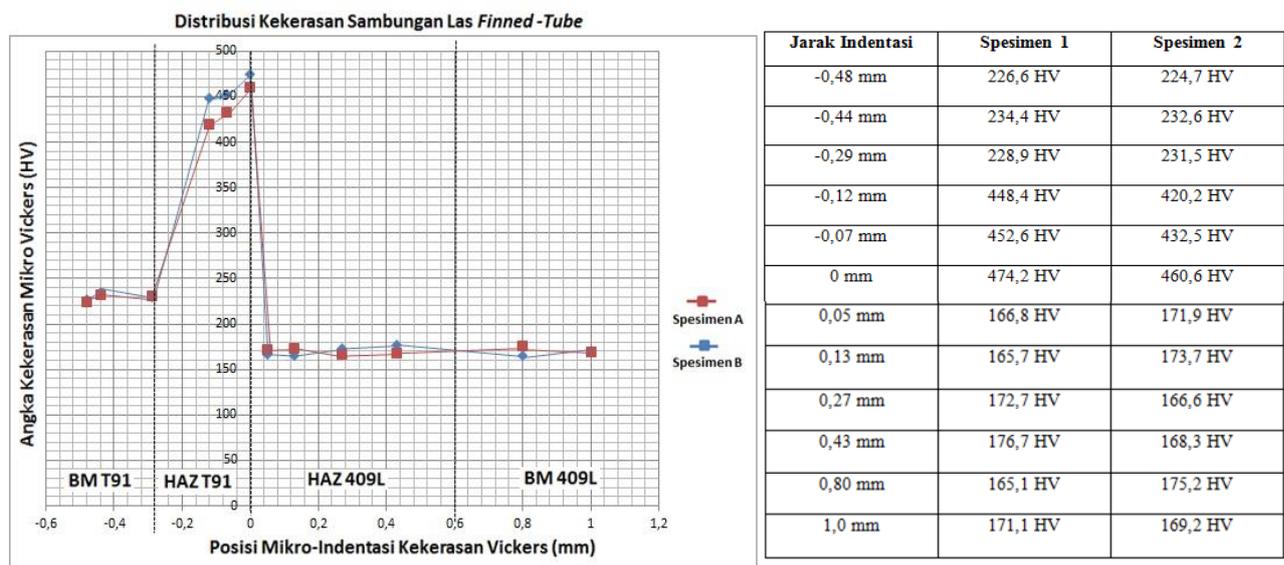
Gambar 8. (a) HAZ baja T91 Spesimen A, (b) HAZ baja T91 Spesimen B

Analisis Hasil Uji Kekerasan

Dari grafik pada Gambar 9 dapat diketahui bahwa terdapat perbedaan angka kekerasan yang signifikan antara daerah HAZ dan *base metal* T91 yaitu dengan selisih rata – rata kekerasan antara HAZ dan *base metal* T91 untuk spesimen A sebesar 208,1HV dan spesimen B sebesar 228,44HV. Lebih lanjut angka kekerasan tertinggi pada daerah HAZ T91 untuk spesimen A sebesar 460,6HV dan spesimen B sebesar 474,2HV.

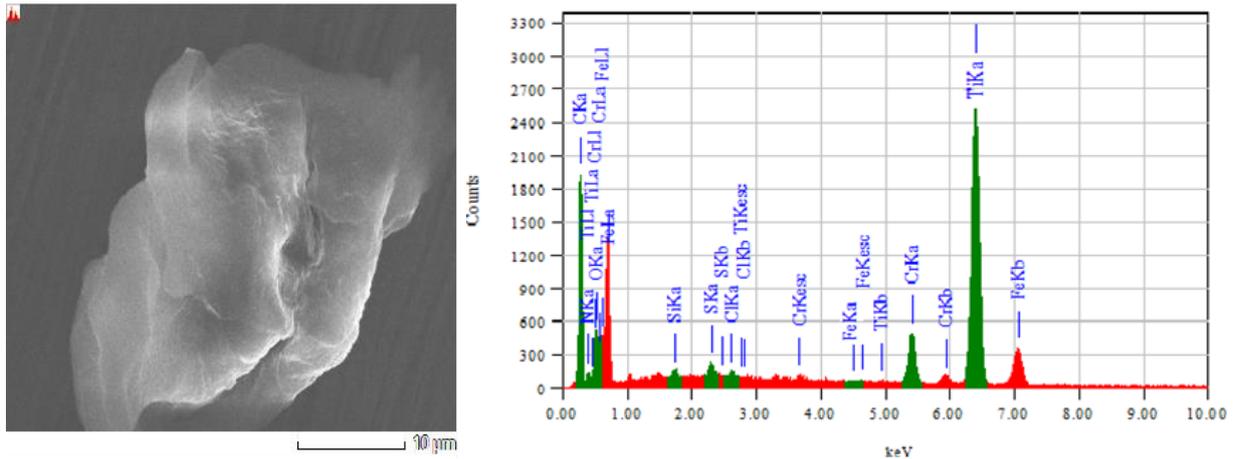
Dari sini menunjukkan bahwa penghalusan butir yang terjadi pada daerah HAZ mempengaruhi nilai kekerasan terutamanya pada baja T91. Selain itu ada kemungkinan bahwa adanya fasa getas atau endapan karbida yang terdapat pada daerah HAZ baja T91.

Untuk daerah HAZ dan *base metal* 409L tidak ada perbedaan kekerasan yang signifikan. Dimana untuk spesimen A nilai kekerasan pada daerah HAZ rata – rata sebesar 170,125HV dan pada spesimen B nilai kekerasan pada daerah HAZ rata – rata sebesar 170,475HV. Untuk nilai kekerasan *base metal* di masing – masing spesimen, menunjukkan bahwa di spesimen A nilai angka kekerasannya rata – rata sebesar 172,2HV dan di spesimen B nilai angka kekerasannya rata – rata sebesar 168,1HV. Dari hasil pengujian diatas spesimen A dan spesimen B pada daerah *base metal* dan HAZ nilai kekerasannya hampir sama sekitar 160HV sampai 170HV, atau dalam artian baja 409L memiliki sifat yang stabil. Hal ini sesuai dengan beberapa hasil dari penelitian – penelitian sebelumnya.



Gambar 9. Grafik distribusi kekerasan sambungan las *finned tube* T91 dengan 409L

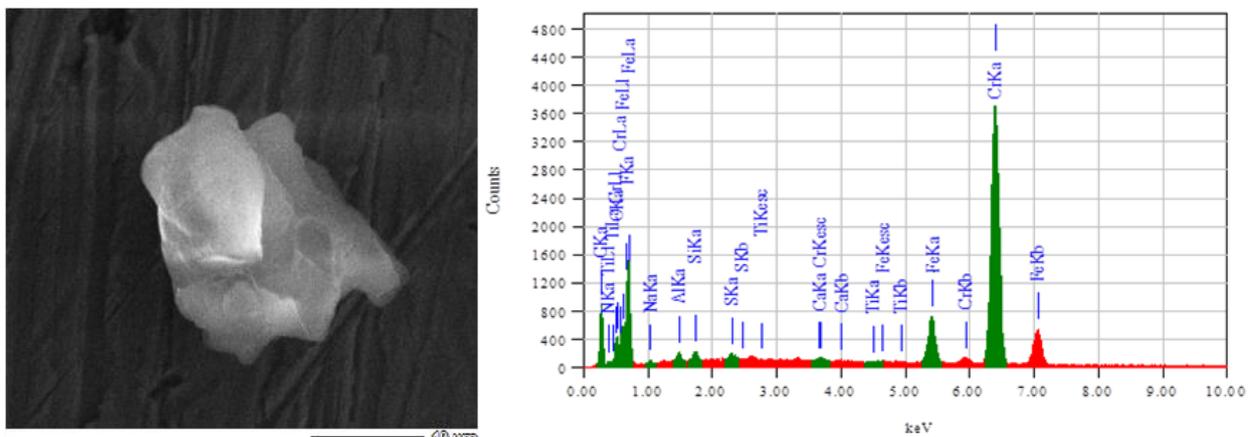
Analisis Hasil Uji EDX



Gambar 10. Presipitasi pada daerah HAZ 409L dan EDX Spectra Presipitasi

Analisa dan hasil uji EDX dilakukan dalam rangka untuk mengetahui kandungan presipitasi yang ada pada baja 409L dan baja T91. Presipitasi ini lebih ditekankan pada daerah HAZ yang menjadi fokus pengamatan dalam penelitian kali ini. Dengan mengetahui kandungan unsur yang ada di presipitasi kita lebih sedikit dapat mengetahui kemungkinan sifat dari baja yang ditimbulkan dari kandungan unsur tadi. Dari situ kita akan dapat mengetahui penyebab nilai kekerasan yang ada di baja 409L relatif sama antara *base metal* dan HAZ serta perubahan nilai kekerasan yang signifikan antara *base metal* T91 dan HAZ T91. Gambar 10 menjelaskan presipitasi yang terjadi pada HAZ 409L.

Dari hasil diatas terlihat bahwa unsur yang paling dominan pada presipitasi baja 409L adalah unsur Ti kemudian berturut – turut unsur C, Fe, dan N. Dengan demikian presipitasi yang terjadi pada daerah ini adalah presipitasi jenis TiX dimana unsur yang paling dominan adalah unsur Ti yang memiliki sifat untuk menstabilkan material. Nilai kekerasan pada baja 409L tidak mengalami perubahan yang signifikan atau dalam artian disini nilai kekerasannya relatif sama karena pada daerah *base metal* dan HAZ jumlah presipitasi yang terjadi relatif sama banyak dan mengandung unsur Ti. Pada Gambar 11 akan dilihat presipitasi yang terjadi pada baja T91 serta kandungan unsur yang ada di dalamnya.



Gambar 11. Presipitasi pada daerah HAZ T91 dan EDX Spectra Presipitasi

Dari hasil penelitian diatas informasi yang bisa didapatkan adalah bahwa presipitasi yang ada di daerah baja T91 mengandung unsur terbanyaknya berturut – turut adalah Cr, C, Fe dan O. Sehingga secara umum baja T91 positif mengandung presipitasi kromium. Presipitasi ini adalah presipitasi karbida yang memiliki rumus senyawa CrXC_Y. Hal ini dikarenakan perbandingan atom antara unsur Cr dan C tidak begitu jelas. Karena pada daerah ini mengandung karbida kromium, maka kekerasan yang ada di daerah HAZ atau *fusion zone* lebih tinggi dari pada nilai kekerasan pada daerah *base metal* [3].

Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari hasil analisa terhadap sambungan las *spiral finned tube* material T91 dengan 409L pada sistem HRSG adalah Nilai kekerasan daerah *base metal* dan HAZ baja T91 mengalami perubahan kekerasan yang signifikan, sedangkan pada baja 409L relatif sama. Dimana rata – rata nilai kekerasan *base metal* baja T91 spesimen A sebesar 208,1HV dan spesimen B sebesar 228,44HV. Sedangkan rata – rata nilai kekerasan HAZ baja T91 spesimen A sebesar 460,6HV dan spesimen B sebesar 474,2HV. Perubahan nilai kekerasan ini dipengaruhi oleh struktur mikro pada masing – masing daerah dan presipitasi yang terjadi. Pada baja T91 presipitasi yang terjadi adalah karbida CrXC_Y yang sangat mempengaruhi kekerasan pada daerah tersebut. Sedangkan pada baja 409L terjadi presipitasi TiX yang sifatnya menstabilkan. Karbida CrXC_Y adalah karbida yang didominasi kandungan unsur Cr dan C, sedangkan TiX didominasi kandungan unsur Ti.

Referensi

1. Muhammad Richard Menarizki dan Sri Nugroho, Karakterisasi Sambungan Las *High Frequency Resistance Welding (HFRW) Spiral Finned Tube* Material Baja *Creep and Heat Resistant Alloy* dengan Baja Tahan Karat, Teknik Mesin Universitas Diponegoro. (2015).
2. Anish Kumar, B.K Choundary, dkk, *Characterization of Microstructure in 9%*

- Chromium Ferritic Steels Using Ultrasonics Measurements*”, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India (2003).
3. Yanjian LI, Bing Zhou, dkk, *Microstructure and Fracture Morphology in the Welding Zone of T91 Heat-resisting Steel Used in Power Station*”, National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin, China. (2001).
4. Mika Seitovitra, *Handbook of Stainless Steels*, Awesta Research Centre Group, Sweden (2013).
5. Kim Seul Ki, Jung Seung Boo dan Lee Dong Bok, *Characteristic of Microstructure, Microhardness, and Oxidation of FSW and MIG Welded Steels*, Chiang Mai J. Sci., South Korea (2013).
6. Van Niekerk, C.J. & Du Toit M, *Sensitization behavioe of 11-12% Cr AISI 409 Stainless Steel During Low Heat Input Welding*, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy (2011).
7. Hoon-Hwe Cho, dkk., *Microstructural analysis of friction stir welde ferritic stainless steel*, Material Science and Engineering, Seoul National University, Korea (2004).
8. Maalekian Mehran, *ASM Handbook, Volume 6A, Welding Fundamentals and Processes Chapter Solid-State Transformations in Weldments*, American Society for Materials (2011).