



Studi Kasus: Analisis Kegagalan Sambungan Las Pipa CRA Clad Penyalur Gas 12 inch Akibat Terjadinya Perubahan Fasa dan Terbentuknya Cacat Las pada Saat Konstruksi

Bambang Widyanto

Kelompok Keahlian Ilmu dan Teknik Material, Fakultas Teknik Mesin dan
Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10. 40132, Indonesia.
Email: bambwid98@gmail.com

Abstrak. Suatu sistem perpipaan penyalur gas telah dibangun dengan mempergunakan material baja karbon API (*American Petroleum Institute*) 5LX60, PSL2 yang dilapis dengan baja tahan karat 316L atau disebut juga sebagai *Corrosion Resistance Alloy* (CRA) dibagian dalamnya (*CRA Clad Pipe*). Mengingat bahwa suatu sistem penyalur yang dibangun akan mencapai ukuran yang cukup panjang, maka sudah barang tentu perlu dilakukan penyambungan dengan mempergunakan proses las. Pelaksanaan penyambungan ini harus dilakukan dengan sangat hati-hati mengingat jenis pipa yang dipergunakan merupakan pipa baja yang dilapis oleh bahan yang berbeda yaitu mempergunakan bahan baja tahan karat 316L yang memiliki sifat dan kemampuan las yang berbeda dengan baja. Demikian pula material lasan yang dipergunakan adalah baja tahan karat 309L. Dalam kondisi normal, hasil pengelasan tidak akan menunjukkan terjadinya perubahan struktur yang ekstrim, dimana logam-logam tersebut akan tersambung dengan baik dan tidak ada perubahan sifat dasar dari logam-logam yang disambung baik itu bahan baja karbon sebagai bahan pipanya, bahan baja pelapis yang terbuat dari baja tahan karat 316L dan bahan lasan antara yang sering disebut sebagai *buttering* yang dalam hal ini mempergunakan bahan SS 309L. Tetapi pada kenyataannya suatu kegagalan berupa retakan, terjadi pada saat dilakukannya konstruksi sehingga perlu dilakukan suatu evaluasi terhadap kegagalan tersebut, sebagai bahan pembelajaran dan hasil evaluasi ini dapat dijadikan bahan untuk melakukan tindakan pencegahan agar kegagalan serupa tidak terulang lagi dikemudian hari. Metoda analisa yang dipakai dimulai dari pemeriksaan visual, pemeriksaan spesifikasi material dan komposisi kimia, pemeriksaan fraktografi, pemeriksaan metalografi mikro dan makro, pengukuran kekerasan, pemeriksaan dokumen seperti WPS (*Welding Procedure Specification*) dan WPQR (*Welding Procedure Qualification Record*). Dari pengamatan fraktografi dan metalografi ternyata terungkap adanya sambungan yang tidak sempurna yang disebut sebagai *Lack of Fusion*, dan adanya pembentukan fasa martensit yang berlebihan disertai adanya retakan mikro pada akar lasan. Dari hasil pengamatan maka dapat ditarik kesimpulan bahwa kegagalan terjadi karena adanya cacat lasan dan terjadinya retakan pada logam lasan akibat terbentuknya fasa martensit, yang saling berasosiasi untuk menghasilkan kegagalan final dari sambungan las.

Keyword: baja karbon, fraktografi, kegagalan, pipa, *welding*.

1 Pendahuluan

Sistem perpipaan penyalur gas telah dibangun dengan mempergunakan bahan baja karbon API 5LX60 PSL2 yang dilapisi dengan bahan baja tahan karat (SS) 316 L dan dilas dengan mempergunakan bahan lasan yang terbuat dari baja tahan karat 309L [1], dengan metoda *Submerged Arc Welding* (SMAW). Design lasan tersebut telah dicantumkan dalam WPS maupun WPQR sebagai acuan [1]. Pipa yang di-clad dengan bahan CRA, ditujukan untuk penggunaan penyaluran gas dengan komposisi: gas *hydrocarbon*, 11.000 ppm H₂S dan 24.3% CO₂ yang relatif korosif terutama dengan kehadiran H₂S dalam jumlah yang relatif besar.

Setelah dilakukan pengelasan, dilakukanlah inspeksi dan pemeriksaan dan pengujian lapangan dengan mempergunakan metoda radiografi dan *hydrotest*. Hasil pengujian dan pemeriksaan menunjukkan hasil yang baik pada saat itu sehingga kemudian pipa mulai dioperasikan untuk mengaliri gas. Posisi pipa sudah dalam keadaan tertanam didalam tanah.

Enam hari kemudian terdeteksi adanya kebocoran pada satu sambungan las pada posisi jam 3. Dari kronologis proses konstruksinya dijelaskan bahwa pada daerah tersebut pernah dilakukan proses pelurusan (*alignment*) disebabkan situasi geografi lapangan yang sulit, karena dalam kondisi tersebut tidak didapatkan ruang yang cukup untuk memasang pipa tersebut dalam posisi yang lurus, maka bagian pipa yang akan disambung diletakkan dalam posisi yang tidak lurus atau satu garis, dan proses penyambungan dilakukan dengan terlebih dahulu memaksakan deformasi pada bagian-bagian tersebut, sehingga dapat dilakukan penyambungan. Pada Gambar 1, ditunjukkan pipa yang mengalami retakan, dimana terlihat setelah mengalami retakan, posisi pipa yang disambung merekah karena mengalami relaksasi yang menunjukkan bahwa pipa tersebut posisi sebenarnya tidak segaris.



Gambar 1. Posisi sambungan lasan pipa yang mengalami kegagalan

Kronologis kejadiannya dapat diuraikan sebagai berikut:



Gambar 2. Kronologis terjadinya kegagalan

Selanjutnya dilakukan langkah-langkah analisis dengan mempergunakan metoda seperti yang diuraikan pada metodologi di sub bab 2.

2 Metodologi Penelitian dan Pengujian

Untuk melakukan analisa terhadap pipa yang mengalami kegagalan ini, dipergunakanlah metoda-metoda pemeriksaan dan pengujian sebagai berikut:

- Pemeriksaan visual terhadap pipa yang gagal,
- Pemeriksaan material yang meliputi pemeriksaan komposisi kimia dengan mempergunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES) untuk memverifikasi jenis material yang dipergunakan, pengujian kekerasan untuk mengidentifikasi sifat material secara general maupun untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang terbentuk sebagai hasil proses pengerjaan,
- Pemeriksaan fraktografi untuk mengamati permukaan yang rusak dan menarik informasi dari bentuk kerusakan maupun kondisi kerusakan,

- d. Pemeriksaan metalografi untuk mengidentifikasi struktur logam, perubahan fasa dan keberadaan cacat
- e. Pengujian kekerasan untuk mengidentifikasi sifat material yang dipergunakan, dan adanya perubahan sifat yang terjadi akibat proses pengerjaan.

Diharapkan dengan melakukan pemeriksaan diatas, maka dapat diambil suatu kesimpulan mengenai penyebab terjadinya kegagalan.

3 Hasil dan Analisis

3.1 Pengamatan Visual

Beberapa tahapan retakan yang ditemukan berdasarkan pengamatan lapangan, ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Retakan awal yang ditemukan (kiri), penutupan kebocoran dengan klem (tengah), retakan yang berkembang setelah purging (kanan)



Gambar 4. Kondisi permukaan patahan pada sambungan las

Gambar 4 menunjukkan kondisi permukaan patah dari lasan yang memiliki 3 kondisi yang berbeda-beda yaitu a. adanya retakan pada lasan, b. adanya fusi yang tidak sempurna dan c. adanya akar lasan yang terlalu menonjol.

3.2 Hasil dan Analisis Pemeriksaan Material

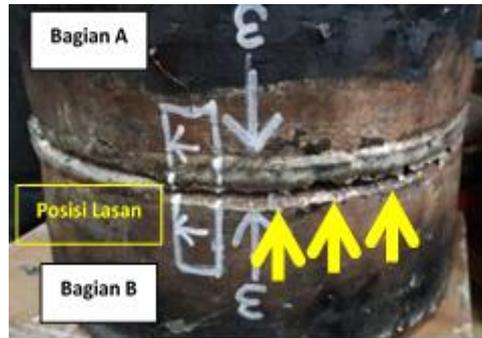
Identifikasi komposisi material mempergunakan OES dengan hasil yang tercantum pada Table 1. Sesuai dengan perencanaan konstruksi pipa yang dibuat, maka material-material tersebut sudah sesuai dengan standar API maupun AISI/SS (American Iron and Steel Institute/Stainless Steel) [3-4].

Tabel 1. Komposisi kimia material pipa, *cladding* dan lasan SMAW (Submerged Arc Welding) dan GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

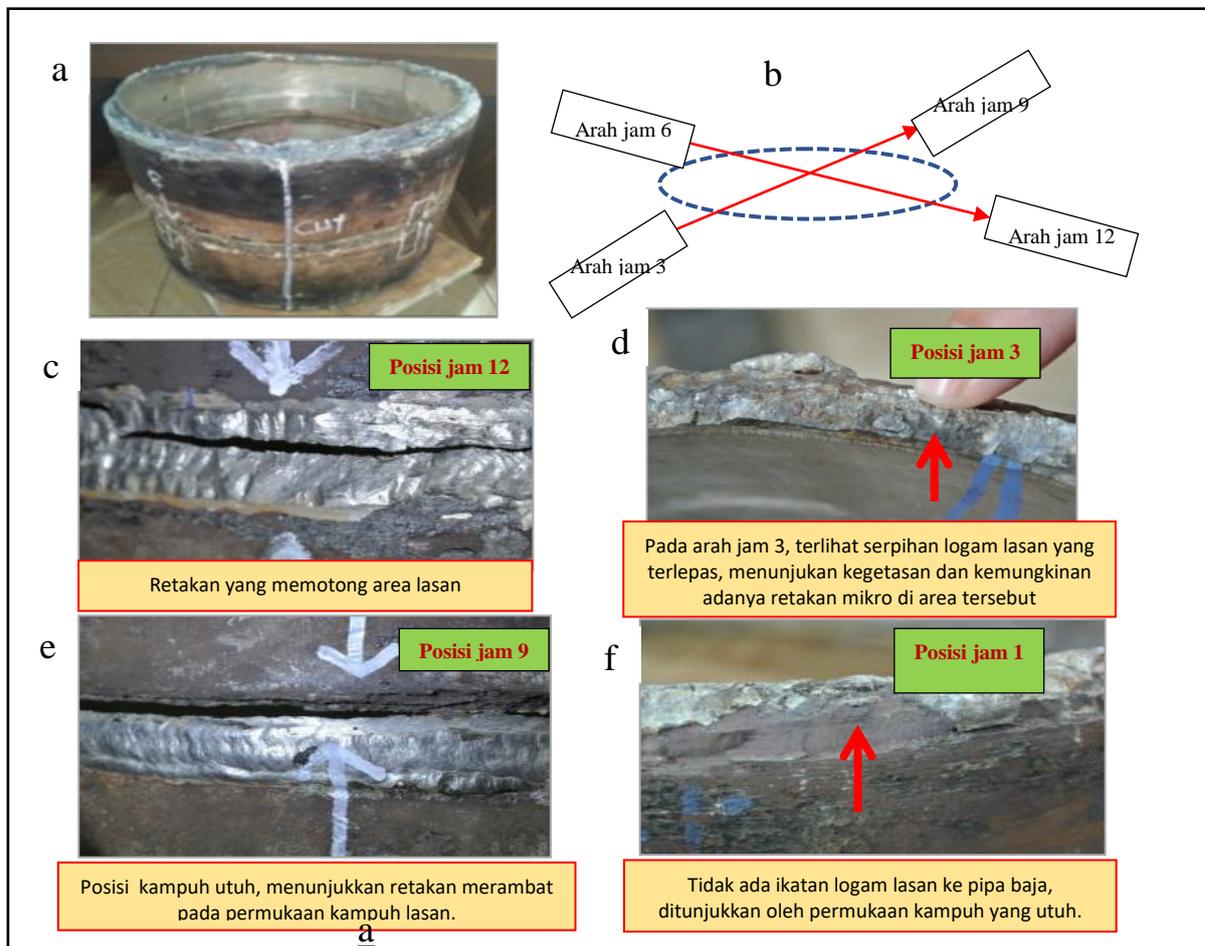
Chemical Composition							
Components.	Hasil Pengujian				Spesifikasi Standar		
	Mother Pipe (average wt %)	Clad (average wt %)	Welding SMAW (average wt %)	Welding GTAW (average wt %)	API 5L X-60 PSL2	SS	
						316L (%wt)	309 (%wt)
C	0.143	0.014	0.040	0.033	0.24 max	0.03 max	0.2 max
Mn	1.366	1.234	1.417	1.901	1.4 max	2 max	2 max
P	0.017	0.029	0.034	0.025	0.025 max	0.05 max	0.045 max
S	0.006	0.001	0.013	0.004	0.015 max	0.045 max	0.03 max
Si	0.322	0.426	0.628	0.453	-	0.75 max	1 max
Ni	0.005	9.572	12.337	11.319	-	10-14	12-15
Cr	0.010	16.785	22.729	19.943	-	16-18	22-24
Mo	0.006	2.096	2.294	1.923	-	2-3	
Cu	0.006	0.073	0.098	0.054	-	Impurities	Impurities
V	0.060	0.085	0.056	0.040			
Nb	0.000	0.000	0.000	0.006	0.15 max		
Ti	0.005	0.001	0.010	0.026			
W	0.002	0.023	0.022	0.036	-		
Sn	0.000	0.003	0.008	0.003	-		
Al	0.032	0.000	0.003	0.003	-		
Fe	Balance						

3.3 Hasil dan Analisis Pengamatan Fraktografi

Untuk melakukan pengamatan fraktografi, bagian sambungan pipa yang gagal direkonstruksi seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



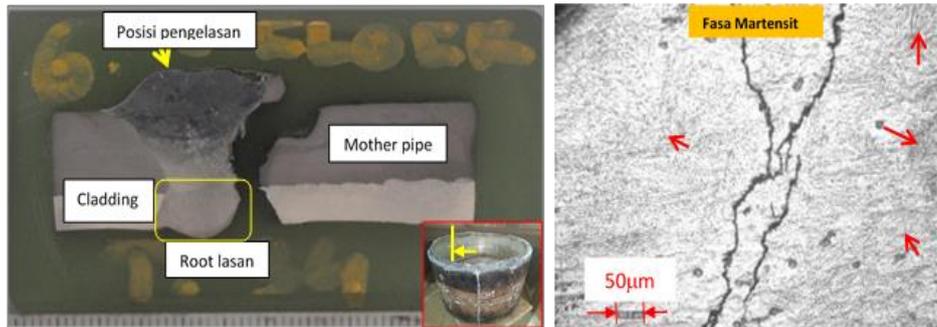
Gambar 5. Rekonstruksi daerah lasan pipa yang gagal



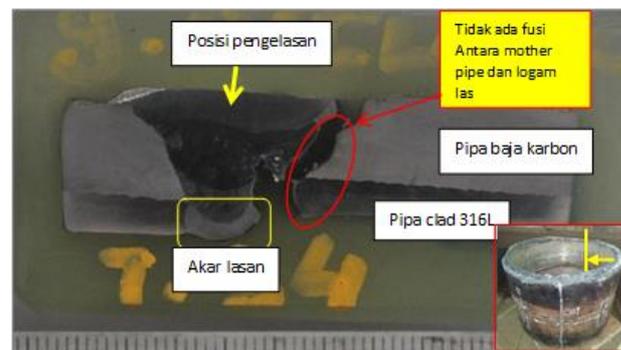
Gambar 6. Morfologi dan kondisi permukaan retakan. Penentuan lokasi jam 3 dan seterusnya menunjukkan posisi pengamatan

3.4 Hasil dan Analisis Pemeriksaan Metalografi

Hasil pemeriksaan metalografi akan dipergunakan untuk mengetahui baik perubahan struktur, keberadaan dari cacat maupun morfologi dari sambungan. Sehingga dengan demikian dapat diketahui adanya penyimpangan sifat yang akan memiliki kecenderungan kearah terjadinya kegagalan. Informasi yang didapatkan dari pemeriksaan ini dapat berupa gambar struktur makro maupun struktur mikro dari sampel yang diteliti.



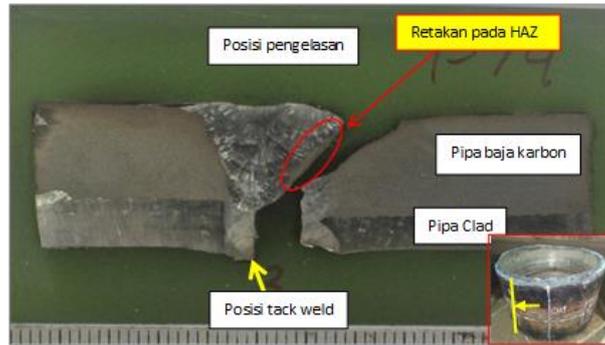
Gambar 7. Foto makro potongan daerah lasan posisi jam 6 (kiri). Menunjukkan akar lasan yang terlalu tebal dan retakan pada daerah HAZ. Pengamatan dengan pembesaran yang tinggi menunjukkan adanya pembentukan fasa martensit (panah merah) dan retakan pada akar lasan (kanan)



Gambar 8. Foto makro potongan daerah lasan posisi jam 9 yang menunjukkan adanya fusi yang tidak sempurna



Gambar 9. Foto makro potongan daerah lasan posisi jam 12 yang menunjukkan retakan pada akar lasan



Gambar 10. Foto makro lasan pada posisi jam 3 menunjukkan retakan pada HAZ dan adanya *tack weld* pada akar lasan

Gambar 7,8,9 dan 10 menunjukkan kondisi sambungan lasan pipa yang gagal ditinjau dari 3 keadaan yaitu, a. adanya lasan yang memiliki akar lasan yang terlalu tebal disertai retakan pada akarnya, b. adanya daerah yang tidak mengalami fusi, c. adanya retakan pada akar atau *root* dari lasan, d. adanya proses pengelasan awal atau yang disebut sebagai *tack weld* untuk menahan posisi pipa yang akan disambung pada tempatnya yang tidak direkomendasikan dalam WPS. Beberapa faktor tersebut dapat menggiring lasan menjadi mudah mengalami kegagalan lebih lanjut. Kehadiran retakan yang ditunjukkan pada Gambar 5, berasosiasi dengan adanya perubahan struktur dari fasa austenite ke fasa martensit khususnya pada akar lasan yang mengakibatkan daerah tersebut memiliki kekerasan yang tinggi.

3.5 Hasil dan Analisis Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan khususnya pada *root* dan *weld*, dimana kekerasan yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan acuan yang dipakai yang tercantum dalam WPQR. Apalagi bagian *root* yang menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan.

Tabel 2. Kekerasan didaerah lasan

Kekerasan (VHN)		
Posisi pengujian	Lasan	WPQR
Mother pipe	188.2	212 (max)
Clad	182-220	224 (max)
Root	280-340	222 (max)
Weld	231-240	

Kekerasan yang tinggi ini dapat terjadi karena perubahan fasa yang tidak terkontrol dan menyebabkan terbentuknya martensit yang memiliki kekerasan yang tinggi. Hal ini tidak menguntungkan karena kekerasan yang tinggi selalu berkaitan dengan adanya retakan yang mudah merambat.

3.6 Analisis Menyeluruh

Penggunaan pipa baja karbon yang di-clad dengan baja tahan karat 316L, dipilih oleh karena pipa tersebut akan digunakan untuk menyalurkan gas yang mengandung bahan yang korosif dan berbahaya seperti gas H₂S. Untuk melakukan penyambungan pipa-pipa tersebut, dipergunakan elektroda las yang terbuat dari bahan baja tahan karat 309L yang kompatibel dengan baja karbon dan baja tahan karat 316L yang merupakan bahan pipa yang akan disambung. Tetapi prosesnya memerlukan kehati-hatian yang tinggi, karena bahan baja tahan karat 316L dan 309L yang memiliki fasa austenitik [5] akan dapat berubah menjadi martensitik manakala terjadi pembebanan dan deformasi yang cukup tinggi [7]. Hal ini akan membahayakan sambungan karena sifat baja yang terlalu getas akan mudah mengalami keretakan apabila terbebani oleh gaya yang berlebihan. Tabel 1 menjelaskan kesesuaian antara material baja karbon untuk pipa yang di-clad dengan SS316L dengan standard yang berlaku.

Pada proses instalasi pipa dilapangan, terdapat kesulitan karena daerah dimana pipa tersebut dipasang, memiliki kontur tanah yang bervariasi, sehingga sukar dilakukan peletakkan pipa dalam kondisi yang lurus dan datar. Hal ini menyebabkan kesulitan proses pengelasan sehingga bagian pipa yang akan dilas harus diluruskan dengan pemaksaan melalui sedikit proses bending yang akan mengakibatkan terbentuknya *residual stress* pada lasan. Kondisi ketidaklurusan dari pipa yang disambung, terlihat dengan jelas ketika terjadi kegagalan seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 dan Gambar 2, dimana permukaan pipa tidak berada dalam satu bidang dan cenderung meregang, yang ditunjukkan dengan adanya *gap* yang besar pada satu sisi akibat terjadinya relaksasi.

Kegagalan pertama teramati pada permukaan patahan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4 yang menunjukkan bagian pipa yang telah terpisah, dimana jelas terlihat ada bagian yang menunjukkan kegagalan pada lasan yaitu: kegagalan yang terjadi pada *interface* logam lasan dan pipa baja karbon yang tidak tersambung, retaknya lasan dan ketidaksempurnaan lasan berupa akar lasan yang terlalu menonjol. Secara kasat mata saja dapat disimpulkan bahwa lasan telah dilakukan dengan tidak sempurna. Lebih lanjut hasil pengamatan visual tersebut

dirangkaikan dengan hasil pengamatan metalografi baik makro maupun mikro.

Beberapa kegagalan dari proses pengelasan terlihat dari Gambar 6f dan Gambar 8, berupa tidak adanya fusi yang baik antara *weld* dan pipa baja karbon yang mengkonfirmasi hasil pengamatan visual pada Gambar 4. Gambar 6f menunjukkan permukaan kampuh lasan yang masih utuh dengan geometri yang asli yang tidak menunjukkan terjadinya penyambungan akibat proses pengelasan. Besar kemungkinan, pengaturan dari arus pengelasan yang tidak sesuai menjadi penyebabnya sehingga tidak dapat memberikan fusi yang baik didaerah tersebut.

Kehadiran dari retakan mikro khususnya yang terdeteksi terjadi pada akar lasan, diduga terjadi akibat adanya perubahan fasa dari material lasan yang berfasa austenitik menjadi martensitik yang dipicu oleh adanya tegangan yang bekerja yang merupakan residual stress pada lasan yang terbentuk akibat proses bending sebelum dilakukannya pengelasan [8][9]. Kehadiran fasa martensit yang ditunjukkan dalam Gambar 7 merupakan bukti terbentuknya fasa tersebut dan perubahan fasa ini diperkuat dengan hasil pengujian kekerasan pada Tabel 2 yang menunjukkan peningkatan kekerasan yang sangat signifikan bahkan keluar dari WPS yang diacu. Oleh karena martensit merupakan fasa yang keras, maka perambatan retakan mikro yang teridentifikasi sebelumnya akan terjadi dengan mudah kearah yang berlawanan dari posisi retakan mikro.

Perlu ditambahkan bahwa kehadiran retakan mikro pada akar lasan telah terdeteksi disemua bagian yang diamati. Tetapi karena ukurannya yang sangat halus, kehadiran dari retakan mikro ini tidak dapat diantisipasi sebelumnya melalui pengamatan radiografi. Tetapi dengan berjalannya waktu, retakan mikro ini akan merambat dan dampaknya semakin parah bila kemudian berasosiasi dengan daerah sambungan yang memiliki fusi yang tidak baik dan mengakibatkan terjadinya kebocoran dari pipa.

4 Kesimpulan

Dari pengamatan diatas dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Sesuai dengan WPS untuk pengelasan dari pipa yang di-*clad*, dan pemeriksaan terhadap material lasan, maka baik material pipa, material *clad* maupun material lasan, sesuai dengan standar yang dipersyaratkan yaitu: Material pipa adalah API 5LX60, PSL2, material *clad* adalah SS 316L dan material lasan adalah SS 309L.
- Pada proses konstruksi telah terjadi pemaksaan kondisi pipa yang akan dilas dengan melakukan *bending*, sehingga setelah pipa dilas, akan terjadi *residual stress* pada bagian lasan yang terbuat dari bahan

SS 309L yang mendorong terjadinya perubahan fasa austenitik menjadi martensitik.

- Proses lasan tidak dilakukan dengan sempurna, sehingga pada beberapa bagian lasan tidak mengalami fusi yang sempurna, yang membuat sambungan menjadi lemah.
- Telah teridentifikasi hadirnya banyak retakan mikro di beberapa bagian dari akar lasan, yang dengan waktu dapat merambat dengan mudah didalam struktur martensit berawal dari akar lasan.
- Retakan pada akar lasan akhirnya dapat berasosiasi dengan sambungan yang tidak sempurna karena tidak memiliki fusi yang baik dan akhirnya akan mengakibatkan keretakan yang menyeluruh dari daerah lasan.

Referensi

- [1] Dokumen Welding Procedure Specification (WPS) dan Welding Procedure Qualification Record (WPQR) "WPS API 004 CLAD SS MAIN TIE IN 2017"
- [2] A Practical Guide to Engineering Failure Investigation, Professional Engineering Publishing Limited London dan Bury St. Edmunds, UK, 1998 by Matthews, Clifford. Bsc. CEng. MBA
- [3] ASTM A312/A312M Standard, Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes.
- [4] API Specification 5L Standard, Specification for line pipe
- [5] Guiraldenq P dan Duparc O H, The genesis of the Schaeffler diagram in the history of stainless steel, Metall. Res. Technol. 114, 613 © EDP Sciences, 2017
- [6] Wang W, Wang X, Zhongba W, Lei Hu , Ping Hu, Failure analysis of dissimilar steel welded joints in a 3033t/h USC boiler, Electric Power Research Institute of Guangdong Power.
- [7] Olson D.L., Prediction of Austenitic Weld Metal Microstructure and Properties International Welding Research, WRC Bulletin 305, June 1985.
- [8] Solomonand N.I. Solomon, Deformation induced martensite in AISI 316 stainless steel, revista de metalurgia, 46 (2), marzo-abril, 121-128, 2010, issn: 0034-8570, eissn: 1988-4222.
- [9] Das A, Chakraborti P. C, Tarafder S. and. Bhadeshia H. K. D. H, Analysis of deformation induced martensitic transformation in stainless steels Materials Science and Technology, 2011, VOL 27 NO 1.