

## LIQUID METAL EMBRITTELEMENT (LME) AKIBAT KONTAMINASI TEMBAGA PADA PIPA BAJA API 5L X70 DENGAN PENGELASAN BUSUR RENDAM (SAW)

**Budi Priyono**

Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI  
Gedung 470, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan  
E-mail : [bpriyono44@yahoo.com](mailto:bpriyono44@yahoo.com)

Masuk Tanggal : 28-04-2015, revisi tanggal : 12-07-2015, diterima untuk diterbitkan tanggal 18-08-2015

### Intisari

Dalam studi ini, telah dilakukan penelitian terhadap kegagalan berupa penetrasi logam tembaga ke dalam logam lasan jenis baja karbon paduan rendah (C-Mn-Mo) yang menyebabkan retak pada proses pembuatan pipa dengan pengelasan busur rendam atau SAW (*submerged arc welding*). Kegagalan tersebut dikenal sebagai *liquid metal embrittlement* (LME). Dalam penelitian ini, kegagalan LME disebabkan oleh kualitas lapisan tembaga, dimana LME ditandai dengan adanya bercak merah pada permukaan logam lasan. Mekanisme kegagalan LME yang telah dipelajari dalam penelitian ini adalah lapisan tembaga pada elektroda teroksidasi membentuk senyawa CuO, terbawa ke dalam logam cair, dan muncul ke permukaan logam lasan. Senyawa CuO tersebut kemudian tereduksi kembali oleh terak menjadi logam Cu dalam kondisi cair. Pada kondisi inilah akan terjadi penetrasi logam tembaga ke dalam logam lasan melalui batas butir yang dikenal dengan nama *liquid metal embrittlement* (LME). Dari hasil penelitian, kegagalan LME dalam penelitian ini lebih disebabkan oleh kualitas lapisan elektroda las yang terlampaui kuat, seharusnya lapisan tembaga lepas atau pecah sebelum masuk ke dalam busur lasan dan terperangkap dalam terak cair sebagai pengotor.

**Kata kunci :** Las busur rendam (SAW), Penggetasan dari logam cair (LME), Kontaminasi tembaga, Pipa baja API 5L X 70

### Abstract

*In this study, we conducted a study of failures in the form of copper metal penetration into the metal welds low-alloy carbon steel (C-Mn-Mo) which caused cracking in the process of making pipe with submerged arc welding or SAW (submerged arc welding). Such failures are known as liquid metal embrittlement (LME). In this study, the failure is caused by the quality LME copper layer, where LME characterized by red spot on the surface of the weld metal. LME failure mechanisms that have been studied in this research is a copper layer on the electrode is oxidized to form CuO compounds, brought into the molten metal, and surface weld metal. CuO compounds are then reduced again by the slag to metallic Cu in a liquid state. In this condition will occur metallic copper penetration into the weld metal through the grain boundaries which are known as liquid metal embrittlement (LME). LME failure in this study was due to the strong effect of the welding electrodes coating, the copper layer should be separated or broken before entering into an arc welds and trapped in the molten slag as an impurity.*

**Keywords:** Submerged arc welding (SAW), Liquid metal embrittlement (LME), Copper penetration, API 5L X 70 steel pipe

## 1. PENDAHULUAN

Pada proses pembuatan pipa sambungan tunggal longitudinal pengelasan busur rendam (SAW) dengan ukuran 32" (812,8mm) OD dan 15,9 mm W.T, terdapat kegagalan berupa retak pada logam lasan (manik las). Proses

pengelasan busur rendam (SAW) dengan tiga elektroda las dapat dilihat pada Gambar 1. Material pipa terbuat dari bahan baja API 5L X70 adalah baja paduan mikro atau dikenal dengan nama *high strength low alloy steel* (HSLA) yang memiliki kekuatan luluh (Sy) minimal 70 ksi (485 Mpa), kekuatan tarik (Su)

minimal 570 Mpa, dengan  $S_y/S_u$  ratio maksimum 92% serta keuletan ( $\epsilon$ ) minimal 18%. Jenis kawat las yang digunakan pada pengelasan busur rendam mempunyai komposisi yang berlainan tergantung pada penggunaannya. Secara umum kawat las tersebut dapat dibedakan berdasarkan kandungan C-Mn dan unsur paduan Cr, Mo, Ni. Elektroda las yang digunakan pada pembuatan pipa API 5L X70 adalah jenis C-Mn-Mo analog dengan standar AWS A5.23-80 class EA2. Permukaan kawat dilapis dengan tembaga dengan tujuan untuk melindungi dari korosi dan kontak listrik antara elektroda dengan nozel. Dari beberapa literatur maupun standar belum ditemukan metoda pengujian kawat las terutama terhadap kualitas lapisan tembaga. Hal ini disebabkan lapisan tembaga pada elektroda las hanya memiliki tujuan tertentu saja, yaitu : meningkatkan ketahanan korosi dan daya hantar listrik. Oleh sebab itu proses pelapisan yang digunakan pada umumnya dengan metoda *immersion* pada larutan tembaga sulfat. Sehingga lapisan yang terbentuk sangat tipis tetapi tidak mudah terkelupas <sup>[1]</sup>.



Gambar 1. Mesin las busur rendam atau *submerged arc welding* (SAW) yang dipergunakan pada proses pembuatan pipa

*Liquid metal embrittlement* (LME) atau dikenal juga dengan nama *liquid metal cracking* (LMC) adalah perubahan sifat logam menjadi getas akibat penetrasi logam cair melalui batas butir dengan kondisi di bawah tegangan tarik. Logam yang sering menimbulkan penetrasi adalah logam Hg, Ga, Pb, Cd, Al dan Cu <sup>[2]</sup>. Salah satu contoh kegetasan pada logam paduan tembaga kekuatan tinggi akibat penetrasi logam Hg. Pada temperatur tinggi, cairan Pb, Cd, Zn dan Al dapat menimbulkan masalah kegetasan pada peralatan proses yang menggunakan baja tahan karat austenitik.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui penyebab dan mekanisme kegagalan LME pada material pipa API 5L X70 dengan metoda studi perbandingan beberapa jenis elektroda yang

dipergunakan pada pengelasan busur rendam. Beberapa jenis elektroda dari beberapa merek dagang yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu elektroda dengan kode S, L, B dan E. Untuk mendukung hal tersebut akan dilakukan serangkaian pengujian terhadap elektroda las yang digunakan yaitu analisa komposisi kimia dengan metoda OES, ketahanan lapisan tembaga pada temperatur tinggi menggunakan uji *heat quench test*. Diharapkan dari serangkaian pengujian dan pembahasan dapat diketahui kronologis dan mekanisme kegagalan LME pada material pipa baja API 5L X70 dengan metoda las busur rendam (SAW) dengan menggunakan beberapa jenis elektroda yang sesuai, metoda dan prosedur pengujian sebelum digunakan untuk produksi pipa dari material pipa baja API 5L X70. Selain itu dapat diketahui sebagai kontrol kualitas daripada elektroda las dengan menggunakan metoda las busur rendam.

## 2. PROSEDUR PERCOBAAN

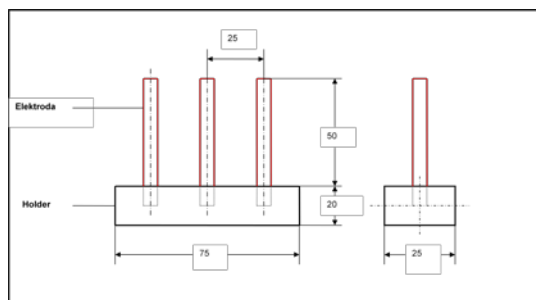
Material atau logam las yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon paduan rendah yang digunakan untuk pengelasan pipa API 5L X70 dengan metoda las busur rendam. Elektroda las yang digunakan dalam penelitian ini adalah elektroda las dari berbagai merek dagang yang umum digunakan di pabrik, dimana elektroda tersebut dilapis dengan tembaga (Gambar 2). Fungsi lapisan tembaga adalah untuk melindungi kawat las dari korosi agar tidak terjadi *sputtering* pada proses pengelasan. Beberapa jenis elektroda dari beberapa merek dagang yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu elektroda baja karbon paduan rendah (C-Mn-Mo) kemudian dibandingkan untuk melihat kualitas lapisannya.



Gambar 2. Elektroda las dengan pelapis tembaga untuk las busur rendam (SAW)

Beberapa pengujian yang dilakukan adalah dengan analisa komposisi kimia menggunakan OES, ketahanan lapisan pada temperatur tinggi dan ketahanan lapisan terhadap retak akibat celup-cepat dengan metoda *heat-quench test*. Pada pengujian komposisi kimia dengan metoda

OES, lapisan tembaga yang menempel pada kawat elektroda dibersihkan terlebih dahulu. Hal ini dilakukan agar tidak berpengaruh terhadap hasil analisa komposisi kimia. Pengujian ketahanan lapisan pada temperatur tinggi menggunakan metoda pemanasan sampai temperatur 1000 °C. Prosedur pengujian ketahanan lapisan elektroda dilakukan pada temperatur tinggi dengan cara memanaskan elektroda pada temperatur 200 °C - 1000 °C, dengan waktu penahanan 30 menit pada setiap temperatur. Posisi dan pengaturan sampel elektroda las pada uji ketahanan lapisan temperatur tinggi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Posisi dan pengaturan sampel elektroda las pada uji ketahanan lapisan temperatur tinggi

Kondisi lapisan diamati pada setiap temperatur pemanasan dengan menggunakan mata telanjang atau dibantu dengan alat kaca pembesar (lup). Prosedur pengujian ketahanan lapisan pada temperatur tinggi adalah sebagai berikut:

- Elektroda las dengan diameter 4 mm dan berbentuk gulungan kawat dipotong sepanjang 1 meter dari masing-masing jenis elektroda las.
- Elektroda las dengan panjang 1 meter kemudian dipotong menjadi tiga buah spesimen dengan ukuran 60 mm untuk setiap jenis elektroda las yang akan diujikan.
- Spesimen dari berbagai jenis elektroda las kemudian dipasang pada *holder* tahan panas dalam posisi tegak dan sebaiknya berwarna putih agar lebih mudah pada saat pengamatan.
- Spesimen yang telah dipasang pada holder dipanaskan dengan menggunakan tungku *muffle*. Pemanasan dimulai dari temperatur kamar sampai dengan temperatur dimana lapisan tembaga pecah pada kategori (3). Pengamatan sebaiknya dilakukan dimulai pada temperatur 400 °C, dan pengamatan dilakukan setiap kenaikan temperatur 50 °C - 100 °C. Waktu penahanan dari masing-masing temperatur sekitar 30 menit.

- Pada saat lapisan pecah dengan kategori (3) akan terlihat serpihan lapisan tembaga berwarna hitam karena teroksidasi membentuk CuO dan jatuh pada *holder*. Pada kondisi ini dapat dinyatakan sebagai temperatur ketahanan lapisan pada temperatur tinggi (600 – 700 °C) yang bebas dari kasus kegagalan LME.

Pengujian *heat-quick* yang dilakukan sesuai dengan standar ASTM B 571 dengan tujuan untuk melihat secara kualitatif mengenai kekuatan atau daya lekat lapisan elektroda las<sup>[3]</sup>. Prosedur pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut : bahan elektroda las dipotong dengan panjang 50 mm, dipanaskan sampai temperatur 250 °C selama 1 jam. Kemudian dicelup cepat ke dalam air dan permukaan diamati dengan menggunakan mata telanjang atau dibantu dengan alat kaca pembesar (lup). Kategori kerusakan lapisan dikelompokkan menjadi 3 (tiga) kondisi dengan kode penomoran; (1) = Blistering, (2) = Retak, dan (3) = Pecah.

### 3. HASIL DAN DISKUSI

#### A. Hasil Analisa Komposisi Kimia Elektroda Las

Hasil analisa komposisi kimia pada elektroda las dapat dilihat pada Tabel 1. Bahan elektroda las yang digunakan sebagai logam pengisi proses pengelasan busur rendam (SAW) sangat bergantung pada komposisi kimia dan bahan yang akan dilas.

Tabel 1. Hasil analisa komposisi kimia dari berbagai tipe elektroda las yang digunakan untuk las busur rendam (SAW)

Unsur (% berat)	TIPE ELEKTRODA LAS					
	S-1	S-2	S-3	L	B	E
C	0,1488	0,1456	0,1477	0,1256	0,1054	0,1276
Si	0,1717	0,1673	0,1710	0,1549	0,0843	0,1649
S	0,0080	0,0104	0,0091	0,0084	0,0116	0,0140
P	0,0132	0,0168	0,0147	0,0180	0,0180	0,0195
Mn	0,9875	0,9698	0,9842	1,0005	1,9189	1,1155
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,07
Cr	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
Mo	0,54	0,54	0,54	0,53	0,51	0,41
V	0,0057	0,0050	0,0057	0,0051	0,0066	0,0032
Cu	0,0326	0,0310	0,0341	0,0319	0,0399	0,0499
Ti	0,0020	0,0019	0,0022	0,0018	0,0021	0,0029

Dari hasil analisa komposisi kimia pada Tabel 1, kawat las terbuat dari bahan baja karbon rendah paduan rendah (C-Mn-Mo), analog dengan standar AWS A5.23-80 class EA2 dengan komposisi C = 0,07-0,17; Mn = 0,95-1,35; Mo = 0,45-0,65<sup>[4]</sup>.



## B. Pengamatan Visual Pada Manik Lasan

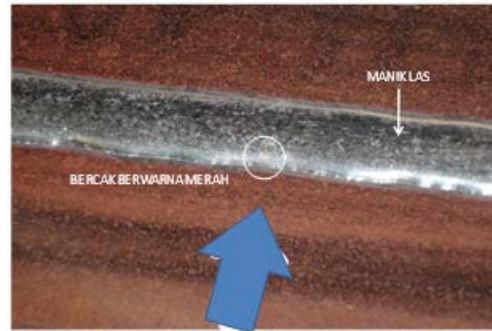
Tabel 2 menunjukkan hasil pengamatan visual terhadap manik lasan hasil proses pengelasan dengan metoda SAW pada pengelasan pipa API 5L X70. Dari hasil pengamatan visual pada manik lasan terdapat bercak merah pada permukaan lasan yang merupakan logam tembaga yang terkontaminasi pada logam lasan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

**Tabel 2.** Kualitas jenis elektroda lasan pada material pipa API 5L X70 dengan pengelasan busur rendam

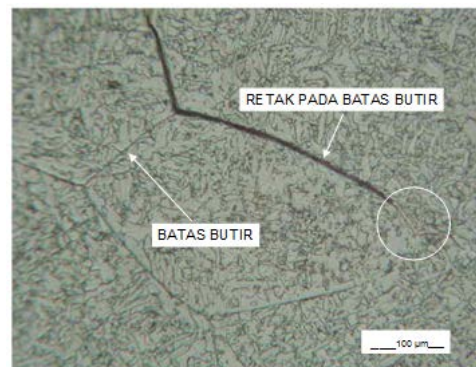
JENIS ELEKTRODA LAS					
S-1	S-2	S-3	L	B	E
Baik	Baik	Baik	Kegagalan LME	Kegagalan LME	Baik

Akan tetapi apabila tembaga tersebut dihilangkan dan diamati di bawah mikroskop maka akan terlihat retakan pada permukaan logam lasan tersebut dan pada ujung retakan terdapat logam tembaga, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Retakan tersebut berada pada logam lasan (manik las) yang menjalar pada batas antara *dendrite* logam lasan. Menurut Savage dkk [5], LME dihasilkan dari interaksi antara atom-atom cairan logam dengan beberapa atom yang ditemukan pada ujung retakan. Selain itu untuk kasus LME akibat kontaminasi tembaga maka retak yang terjadi di area *heat affected zone* (HAZ) pada umumnya adalah terjadi sepanjang batas butir (*intergranular cracking*). Pada Tabel 2, juga memberikan informasi bahwa elektroda las tipe S dan E menghasilkan kualitas lasan yang baik, sedangkan elektroda las tipe L dan B menghasilkan kegagalan LME pada hasil lasan dari material elektroda las C-Mn-Mo. Hal ini memberikan indikasi bahwa temperatur pecahnya lapisan tembaga pada elektroda las

sangat berperan terhadap kegagalan LME pada material pipa API 5L X70.



Gambar 4. Logam tembaga secara visual teramati sebagai bercak merah yang menunjukkan kegagalan LME pada material pipa API LX 70 dengan las busur rendam



Gambar 5. Struktur mikro logam las teramati adanya penetrasi logam tembaga pada batas butir pada area di bawah bercak merah yang ditandai dengan lingkaran putih (seperti penjelasan dalam Gambar 3). Etsa 2 % Nital

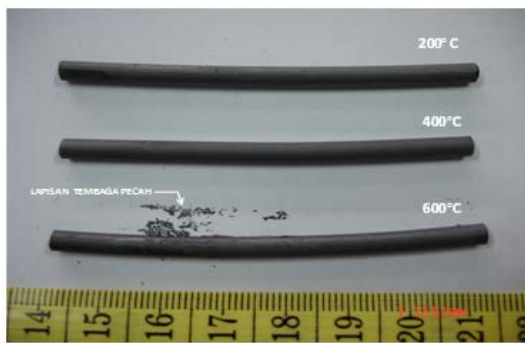
## C. Ketahanan Lapisan Pada Temperatur Tinggi

Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian ketahanan lapisan elektroda las pada temperatur tinggi beserta penilaian tingkat kerusakannya. Dan Gambar 6, menunjukkan contoh lapisan tembaga pecah pada temperatur 600 °C dari spesimen elektroda las – Spesimen E.

**Tabel 3.** Hasil uji ketahanan lapisan dari elektroda las dengan metoda las busur rendam (SAW) pada material API 5L X70

T (°C)	JENIS ELEKTRODA LAS					
	S-1	S-2	S-3	L	B	E
200	-	-	-	Baik	Baik	Baik
400	-	-	-	Baik	Baik	Baik
500	Baik	Baik	Baik	Baik	Baik	-
600	Baik	Baik	Baik	Lapisan Cu terkelupas 1	Baik	Lapisan Cu terkelupas 3
700	Lapisan Cu terkelupas 3	Lapisan Cu terkelupas 3	Lapisan Cu terkelupas 3	Lapisan Cu terkelupas 1	Baik	-
800	Lapisan Cu terkelupas 3	Lapisan Cu terkelupas 3	Lapisan Cu terkelupas 3	Lapisan Cu terkelupas 2	Lapisan Cu terkelupas 1	-
900	-	-	-	Lapisan Cu terkelupas 2	Lapisan Cu terkelupas 2	-
1000	-	-	-	Lapisan Cu terkelupas 3	Lapisan Cu terkelupas 3	-

Keterangan : (1) = Blistering, (2) = Retak, (3) = Pecah



Gambar 6. Lapisan tembaga dari elektroda las yang mengalami pecah pada T= 600 °C – Spesimen E

Dari hasil pengujian ketahanan lapisan las pada temperatur tinggi (Tabel 3) yang mengalami pecah (kategori 3) adalah sebagai berikut:

- Temperatur 600 °C : spesimen – E
- Temperatur 700 °C : spesimen – S1 – S2 – S3
- Temperatur 1000 °C : spesimen – L dan spesimen - B

Tabel 4. Hasil uji *heat-quench* dari elektroda las dengan metoda las busur rendam (SAW) pada material baja karbon paduan rendah (C-Mn-Mo)

T (°C)	JENIS ELEKTRODA LAS					
	S-1	S-2	S-3	L	B	E
250	Baik	Baik	Baik	Baik	Baik	Baik

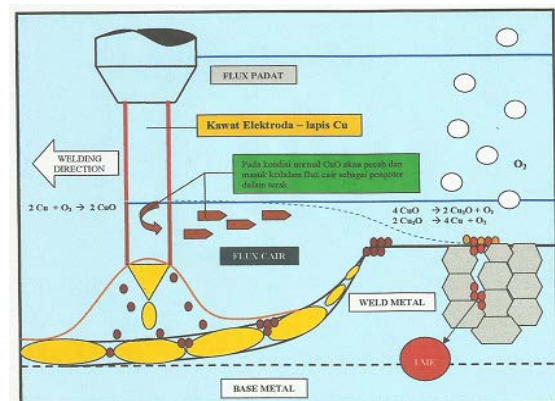
Hasil pengujian *heat-quench* dari berbagai jenis elektroda las dapat dilihat pada Tabel 4. Hasil tersebut menunjukkan seluruh elektroda las yang diuji secara kualitatif kualitas lapisan tembaga pada elektroda las menunjukkan hasil yang baik (tidak ada gejala retak, blister atau pecah).

#### D. Mekanisme LME Pada Pengelasan Busur Rendam

Dari serangkaian kegiatan percobaan yang telah dilakukan mulai dari perubahan parameter proses pengelasan sampai dengan penggantian elektroda las, permasalahan utama kegagalan LME pada material pipa API 5L X70 dengan las busur rendam (SAW) sebenarnya terletak pada kualitas lapisan tembaga. Hal ini didukung oleh hasil pengujian lapisan elektroda las terhadap ketahanan panas pada temperatur tinggi yang menunjukkan perbedaan cukup mencolok terutama pada hubungan antara temperatur dengan tingkat kerusakan pada kategori (3), seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

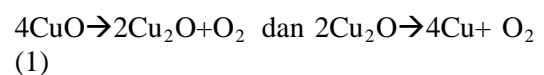
Mekanisme kegagalan LME pada material pipa API 5L X70 dengan las busur rendam (SAW) dapat dilihat pada Gambar 7. Pada proses pengelasan kawat elektroda las yang dilapis Cu akan teroksidasi membentuk senyawa CuO berwarna hitam, karena pengaruh panas

pengelasan dan tembaga sendiri yang bersifat reduktor.



Gambar 7. Mekanisme LME pada metoda las busur rendam (SAW)

Pada temperatur 600 – 700 °C lapisan CuO diharapkan pecah dan terbawa oleh terak cair atau sebagai pengotor, sehingga kawat elektroda mencair dan tidak mengandung CuO yang dapat menyebabkan kegagalan LME atau inklusi. Apabila pada temperatur 600 – 700 °C lapisan CuO tidak pecah, maka akan terbawa ke dalam cairan logam lasan sebagai inklusi dalam bentuk cairan CuO yang memiliki titik cair 1026 °C (lebih rendah dari logam las). Inklusi tersebut akan terkonsentrasi dan muncul di permukaan cairan logam karena berat jenis CuO (6,40 g/cm<sup>3</sup>) < Fe-baja (7,35 g/cm<sup>3</sup>). Pada proses pendinginan berlangsung dan temperatur masih cukup tinggi, CuO di permukaan logam las yang tertutup oleh terak akan direduksi oleh flux/terak menjadi Cu dengan reaksi sebagai berikut :



Sifat fisik Cu<sub>2</sub>O : Warna merah; Berat Jenis 6,0 g/cm<sup>3</sup>; T<sub>cair</sub> 1235 °C . Sifat Fisik CuO : Warna hitam; Berat jenis 6,40 g/cm<sup>3</sup> ; T<sub>cair</sub> 1026 °C [6]. Apabila temperatur masih cukup tinggi logam Cu dalam kondisi cair (1083 °C) menyebabkan penetrasi ke dalam logam lasan yang telah membeku melalui batas butir, penjalaran retak berjalan terus sampai logam Cu membeku. Mekanisme di atas didukung oleh hasil pengujian terutama pada pengujian ketahanan lapisan pada temperatur tinggi. Ketahanan lapisan sampai temperatur 600 – 700 °C yang menghasilkan lasan bebas dari kasus kegagalan LME adalah untuk elektorda jenis S dan E. Sedangkan elektroda jenis L dan B memiliki ketahanan lapisan sampai 1000 °C, dan akan rentan terhadap kasus kegagalan LME. Data yang dihasilkan dari pengujian ketahanan

lapisan elektroda las pada temperatur tinggi dengan metoda di atas dapat mewakili dalam penanganan kasus kegagalan LME pada material pipa API 5L X70 dengan metoda las busur rendam. Namun dalam pelaksanaannya perlu dibuat prosedur pengujian yang lebih mudah dan praktis.

#### E. Kualitas Lapisan Elektroda Las

Elektroda las jenis paduan baja paduan rendah sesuai dengan standar ANSI/AWS A 5.23-90 dikelompokkan berdasarkan komposisi kimia dan diameter kawat las. Permukaan kawat dilapis Cu pada elektroda jenis baja paduan rendah (C-Mn-Mo). Lapisan Cu pada elektroda las bertujuan untuk meningkatkan ketahanan korosi sebagai perlindungan sementara dan konduktivitas listrik<sup>[2]</sup>. Namun demikian dari hasil pembahasan di atas untuk menghindari kasus kegagalan LME, lapisan tembaga pada elektroda las perlu memiliki sifat-sifat sebagai berikut :

1. Ketahanan lapisan atau daya lekat harus baik, dilakukan mengacu pada standar uji ASTM B 571 : *heat-quench test*.
2. Ketahanan lapisan pada temperatur tinggi berkisar 600 – 700 °C harus memiliki kategori pecah atau (3) dilakukan dengan pengembangan dari metoda yang sudah ada.

#### 4. KESIMPULAN

Elektroda las yang digunakan pada pengelasan pipa API 5L X 70 las busur rendam (SAW) adalah menggunakan material baja karbon paduan rendah (C-Mn-Mo) dilapis tembaga, analog dengan standar AWS A 5.23-90.

Kasus kegagalan LME disebabkan oleh lapisan tembaga yang ditandai dengan bercak merah pada permukaan logam lasan. Dengan mekanisme kegagalan LME, pertama-tama lapisan tembaga pada elektroda teroksidasi membentuk senyawa CuO dan terbawa ke dalam logam cair. Kemudian muncul ke permukaan logam lasan dan tereduksi kembali oleh terak/*flux* menjadi logam Cu dalam kondisi cair. Pada kondisi inilah akan terjadi penetrasi logam tembaga ke dalam material baja karbon paduan rendah melalui batas butir.

Pada proses pengelasan SAW, lapisan tembaga seharusnya lepas atau pecah sebelum masuk ke dalam busur lasan dan terperangkap dalam terak cair sebagai pengotor. Lapisan tembaga tidak boleh lepas pada temperatur rendah atau saat melewati *flux* padat karena akan menurunkan kualitas flux pada saat proses daur ulang, akan tetapi diharapkan terlepas pada temperatur 600 – 700 °C agar terhindar dari kasus kegagalan LME.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Ir. Triwibowo dari B2TKS – BPPT dalam kerjasamanya untuk penelitian penanganan kasus kegagalan pada pengelasan pipa dengan busur rendam atau SAW (*submerged arc welding*). Disamping itu penulis mengucapkan terima kasih kepada Sugandi dan Rahmat dari Lab. *Heat Treatment* dan Metalografi P2MM-LIPI yang telah membantu dalam pelaksanaan pengujian penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASM International, “ASM Handbook,” Vol.6, *Welding, Brazing, and Soldering*. USA, 1995.
- [2] Dillon.,C.P., “Corrosion Control in the Chemical Process Industries,” *MC Graw-Hill Book Company, Toronto*, pp. 67 – 68, 1986.
- [3] ASTM Standards 2000, “ Volume 02.05, Section 2 Nonferrous Metal Products,” *American Society For Testing And Materials*, 1999.
- [4] AWS, “ Spesification for Low Alloy Steel Electrodes and Flux For Submerged Arc Welding,” *AWS specification.*, A5.23-90, 1997.
- [5] W.F. Savage, E.F. Nippes, and M.C. Mushala, “ Liquid Metal Embrittlement of The Heat Affected Zone by Copper Contamination,” *Welding Research Supplement.*, August, pp. 237-245, 1978.
- [6] ASM, “ Metals Hand Book,” Vol. II, Non-Ferrous Metals., *American Society for Metals*, Ohio, 1990.