

## ANALISA KERUSAKAN TABUNG BAJA TAHAN KARAT UNTUK PENYIMPAN AIR PANAS

*Winarto dan E.S. Siradj*

Departemen Metalurgi & Material, Fakultas Teknik – Universitas Indonesia  
Kampus Baru UI - DEPOK – 16424  
Email: [winarto@metal.ui.ac.id](mailto:winarto@metal.ui.ac.id)

### Abstrak

Tabung penyimpan air panas yang terbuat dari lembaran baja tahan karat (stainless steel) jenis SS 316L yang dibentuk dengan proses pembentukan (drawing) dan penekukan (bending) dan disambung dengan las TIG dengan penambahan logam pengisi (filler wire) jenis material yang sama yaitu ER316L mengalami kebocoran dalam rentang waktu garansinya. Penelitian dan pengujian serta analisis kebocoran tabung tersebut dilakukan untuk mencari penyebab utama (main cause) kegagalan (kebocoran) berdasarkan aspek-aspek metalurgi yaitu melalui pengamatan visual, pengujian komposisi kimia bahan baku, pengujian mekanik (kekerasan), pengamatan metalografi, dan pengamatan fractography daerah yang bocor dengan Scanning Electron Microscope atau SEM. Dari seluruh hasil pengujian dan pengamatan ditemukan bahwa penyebab utama kebocoran adalah terjadinya korosi lubang (pitting) yang diinisiasi oleh adanya prosedur pengelasan yang tidak dilakukan (non-purging gas) dan hal tersebut menyebabkan kebocoran tabung baja tahan karat.

*Kata kunci:* Analisa kerusakan, Baja tahan karat 316L; Kebocoran tabung, Korosi lubang, Prosedur las

### I. Pendahuluan

*Solar Water Heater* (SWH) adalah unit pemanas air yang menggunakan sumber energi dari sinar matahari. Sistem ini bekerja berdasarkan fenomena konveksi yang disebut “*Thermosiphon*”, dimana air panas akan naik ketika mengalami pemanasan dan air yang dingin akan turun. Air dingin tersebut akan turun dari bagian bawah tangki penampung menuju *solar panel collector*. *Panel collector* akan menyerap sinar matahari dan mengubahnya menjadi panas. Air yang berada dalam *collector* tersebut akan panas dan kembali kebagian atas dari tangki penampung dan siap untuk digunakan<sup>[1]</sup>. Skematis gambar dari peralatan SWH dapat dilihat pada Gambar 1. Dibandingkan dengan *water heater* konvensional yang menggunakan gas sebagai sumber energi, unit ini memiliki kelebihan dalam efisiensi dan biaya operasional yang lebih rendah.



**Gambar 1.** Skematis Peralatan *Solar Water Heater* dengan tabung (*tube*) dibagian atasnya

Tabung penyimpan air panas (*Solar Water Heater Tube or SWH Tube*) mengalami kegagalan (kebocoran) dalam pengoperasian di lapangan. Tabung SWH merupakan salah satu bagian dari peralatan *Solar Water Heater* (SWH). Tabung ini digunakan untuk menyimpan air yang telah dipanaskan oleh unit pemanas (*solar panel*), dengan sumber air yang berasal dari Perusahaan Air Minum (PAM). Tabung tersebut dibuat dari baja tahan karat (*stainless steel*) lembaran yang terdiri dari 3 bagian yaitu 1 bagian selubung dan 2 bagian kubah (*dome*) dimana kubahnya dibentuk dengan proses pembentukan (*drawing and bending*). Ketiga bagian tersebut selanjutnya dilas menggunakan metode GTAW (TIG) dengan penambahan logam pengisi (*filler metal*) tipe ER316L.

Investigasi serta analisis kegagalan tabung SWH bertujuan untuk mencari penyebab utama (*main cause*) kegagalan (kebocoran) tabung penyimpan air panas (SWH) berdasarkan aspek- aspek metalurgi yaitu hasil pengujian laboratorium dan selanjutnya dibuat suatu kesimpulan

## II. Prosedur Penelitian

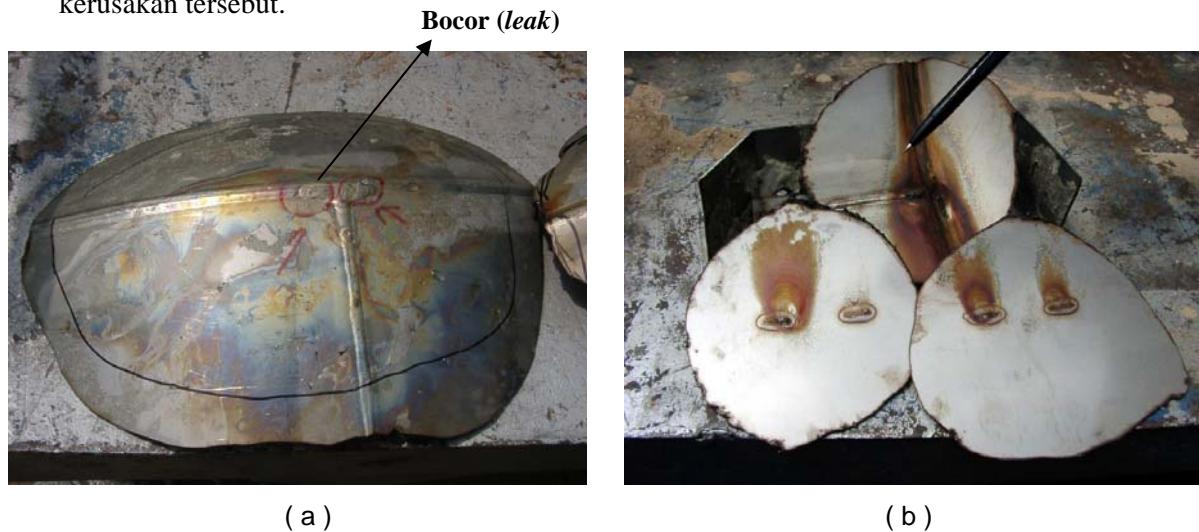
Adapun prosedur investigasinya adalah sebagai berikut <sup>[2],[3]</sup> :

1. Pengamatan Visual
2. Analisa Komposisi Kimia Bahan Baku (material)
3. Pengujian Mekanik (kekerasan)
4. Pengamatan & Analisa *Metallography*
5. Pengamatan & Analisa *Fractography* (kebocoran)
6. Diskusi (pembahasan) dan Kesimpulan

### II.1. Pengamatan Visual

Beberapa bagian dari potongan Tabung Penyimpan Air Panas (*Solar Water Heater Tube*) diamati dan difoto berdasarkan kondisi pada saat diterima (*as received*). Hasil pengamatan yang dapat diperoleh antara lain :

- A. Beberapa lubang kebocoran terlihat pada daerah dekat HAZ , seperti terlihat pada Gambar 2a.
- B. Tabung dibuat dari baja lembaran yang disambung dengan metode pengelasan. Perubahan warna terlihat pada daerah HAZ dari permukaan dalam tabung, seperti pada Gambar 2b.
- C. Deposit kerak (*corosion product*) ditemukan pada bagian dalam tabung yang berkumpul pada daerah lasan (*weldment*), seperti pada Gambar 2b.
- D. Tidak ditemukan adanya daerah yang mengalami pengecilan penampang (deformasi) akibat kerusakan tersebut.



**Gambar 2.** (a) Lokasi tabung *Solar Water Heater* yang bocor (b) Penampakan produk karat (warna kecoklatan) pada bagian dalam tabung di daerah lasan.

## II.2. Identifikasi Komposisi Kimia

Potongan kecil material dasar tabung SWH diuji komposisi kimianya dengan menggunakan alat *spark emission spectrometer*. Hasil uji komposisi kimia material SWH dapat dilihat pada Tabel 1. Berdasarkan standar *American Iron and Steel Institute* (AISI) <sup>[4],[5]</sup>, material Stainless Steel 316L diklasifikasikan sebagai baja tahan karat austenitik dengan penambahan 2 – 3% Molybdenum (Mo) yang bertujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi sumuran (pitting). Selain itu, kandungan unsur Karbon (C) nya sangat dibatasi jumlahnya yaitu maksimum 0.03% C, hal ini bertujuan untuk memperbaiki kemampulasaanya (*weldability*) serta mengurangi kecenderungan terhadap sensitasi atau korosi batas butir (*intergranular corrosion*).

**Tabel 1.** Hasil Pengujian Komposisi Kimia Tabung SWH

KETERANGAN	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
<b>Standard AISI 316L<sup>[4]</sup></b>	<b>0.030</b>	1.00	0.030	0.045	2.00	10-14	16-18	<b>2.00–3.00</b>
<b>Hasil Uji Tabung SWH</b>	<b>0.035</b>	0.43	0.002	0.020	1.70	10.19	18.00	<b>1.94</b>

Hasil pengujian Tabel 1 menunjukkan bahwa material dasar tabung SWH mendekati spesifikasi Stainless Steel 316L dengan kandungan unsur karbon sebesar 0.035% C, dimana nilai ini sedikit diatas batas maksimum karbon (C) yang diperbolehkan (yaitu maksimum 0.03%C). Demikian pula kandungan unsur Molybdenum (Mo) yang terditeksi sebanyak 0.194% Mo, dimana nilai Mo tersebut menunjukkan sedikit dibawah spesifikasi standarnya yaitu rentang antara 2 – 3 % Mo.

Data Hasil uji komposisi kimia menunjukkan bahwa material SWH sedikit berbeda dari spesifikasi standard yang dipersyaratkan. Hal ini mengindikasikan bahwa masalah material dasar tabung menjadi salah satu indikasi penyebab kegagalan (kebocoran) tabung SWH tersebut.

## II.3. Pengujian Mekanis (Uji Kekerasan)

Pengujian kekerasan di lakukan pada bagian penampang sambungan antara kubah (*dome*) dan selubung tabung. Pengujian yang dilakukan menggunakan metode Vickers (VHN)<sup>[6]</sup>. Pengujian kekerasan dilakukan dengan membagi potongan sampel pada tiga daerah penjejakan yaitu, daerah material dasar selubung tabung , daerah lasan (HAZ dan kampuh las), dan daerah kubah (dome). Hasil dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Kekerasan Tabung SWH dengan metode Vickers (VHN).

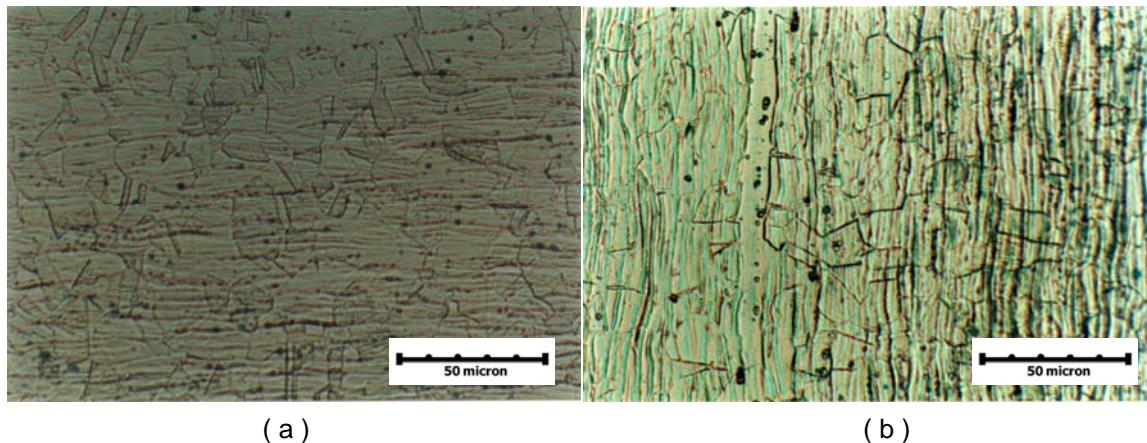
Penjejakan	Selubung (VHN)	HAZ (VHN)	Weld (VHN)	Kubah (VHN)
<b>1</b>	170	168	217	274
<b>2</b>	187	163	193	285
<b>3</b>	193	181	206	291
<b>4</b>	176	170	193	297
<b>5</b>	170	168	193	303
<b>Rata-Rata</b>	<b>183</b>	<b>170</b>	<b>200</b>	<b>290</b>

Hasil pengujian kekerasan pada Tabel 2 memperlihatkan nilai kekerasan material dasar selubung sebesar 183 VHN, sedangkan material dasar kubah sebesar 290 VHN. Tingginya nilai kekerasan pada daerah kubah (*dome*) sebesar 290 VHN mengindikasikan bahwa material tersebut telah mengalami *strain hardening* akibat deformasi dingin yaitu proses pembentukan (*drawing process*) untuk dibentuk seperti mangkuk.<sup>[7]</sup> Sedangkan penurunan nilai kekerasan di daerah HAZ kemungkinan diakibatkan oleh adanya proses pertumbuhan butir (*grain growth*) di daerah HAZ.<sup>[8]</sup>

#### II.4. Analisa Struktur Mikro

Struktur mikro Tabung SWH diambil pada 4 bagian yaitu daerah material dasar (*base metal*) selubung, material dasar kubah dan daerah lasan (*HAZ* dan *Weld Metal*).

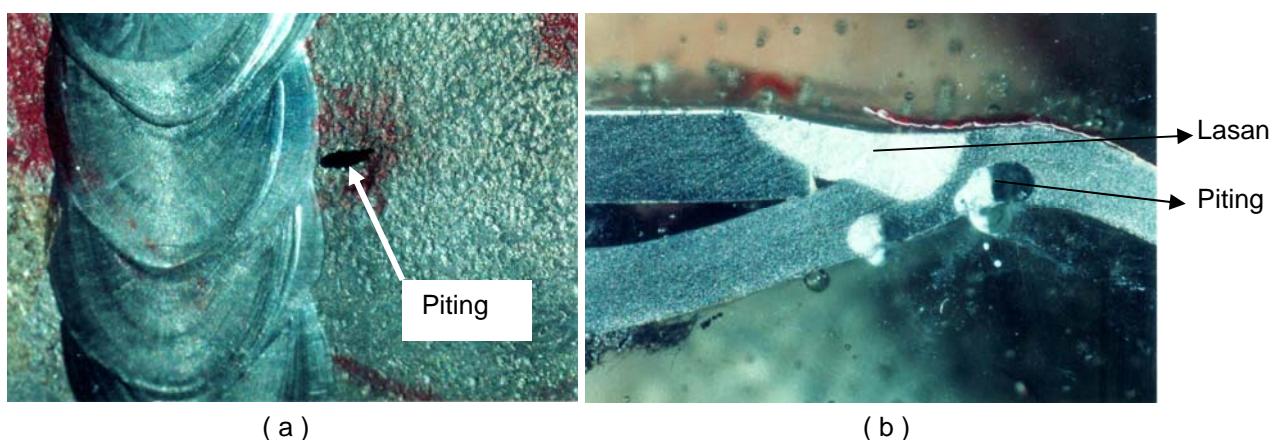
Hasil pengamatan struktur mikro juga memperlihatkan bahwa struktur mikro pada bagian material dasar merupakan struktur mikro *austenitic stainless steel* yang terdiri atas butir austenit dengan *annealed twin*,<sup>[5]</sup> seperti terlihat pada Gambar 3(a). Pola gelombang pada material dasar seperti terlihat pada Gambar 3(b) mengindikasikan bahwa material tersebut telah mengalami proses penggerakan dingin (*cold forming by drawing*). Sehingga terjadi apa yang disebut dengan pengerasan regangan (*strain hardening*), sehingga hal ini mengakibatkan kekerasan meningkat<sup>[7]</sup>.



**Gambar 3.** (a) Struktur mikro selubung *Solar Water Heater* (b) Struktur mikro kubah (*dome*) *Solar Water Heater*, etsa oksalat

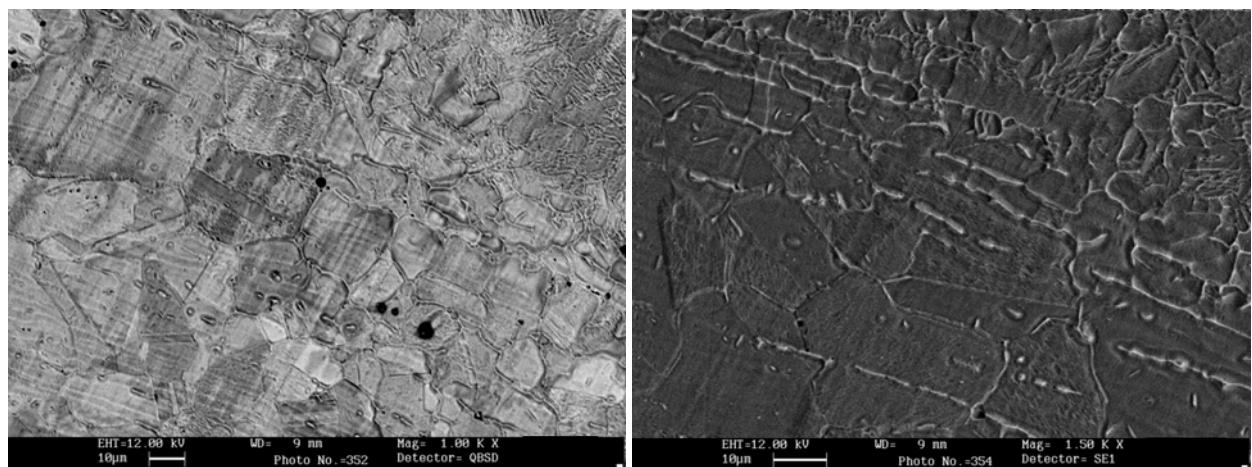
#### II.5. Pengamatan Fractography (Permukaan yang Bocor)

Pengamatan fractography dilakukan untuk memperoleh gambaran dan data yang lebih lengkap, dimana potongan kecil tabung SWH diamati dibawah mikroskop optik stereoscan. Hasil pengamatan *fractography* terlihat pada Gambar 4(a). Gambar tersebut memperlihatkan kerusakan korosi sumuran (*pitting*) pada daerah HAZ. Selain itu juga ditemukan beberapa sumuran yang dangkal (belum terjadi kebocoran) pada bagian dalam tabung dekat lasan seperti terlihat pada Gambar 4(b).



**Gambar 4.** (a) Kebocoran berupa korosi lubang (*pitting*) di HAZ (b) Struktur penampang makro sambungan las antara kubah (*dome*) dan selubung dimana terjadi korosi lubang (*pitting*) yang dangkal (belum terjadi kebocoran), pembesaran 15X

Pengamatan dengan menggunakan peralatan *scanning electron microscope* (SEM) memberikan gambaran yang lebih jelas daerah dekat sambungan las (HAZ) yang mengalami sensitasi atau korosi batas butir (*intergranular corrosion*) akibat proses pemanasan suhu tertentu akibat dari proses pengelasan, seperti terlihat pada Gambar 5. Foto SEM memperlihatkan daerah terpengaruh panas (HAZ) dimana dibatas butir terjadi suatu penumpukan endapan krom karbida ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) yang dengan detektor *back-scatter difraction* atau QBSD (Gambar 5(a)) maupun dengan detektor *Secondary Electron* (SE) (Gambar 5(b)) menunjukkan suatu garis tebal dibatas butir.



**Gambar 5.** (a) Foto SEM dengan detektor QBSD maupun (b) dengan detektor SE memperlihatkan daerah terpengaruh panas (HAZ) yang mengalami sensitasi atau pengendapan krom karbida di batas butir (*intergranular corrosion*)

### III. Pembahasan (Diskusi)

Data analisis dari pengujian komposisi kimia menunjukkan material dasar kurang memenuhi spesifikasi sebagai Stainless Steel 316L akibat unsur Karbon (C) dan Molybdenum (Mo) yang tidak memenuhi spesifikasi, meskipun struktur mikro tabung tersebut menunjukkan struktur butiran austenitik berupa struktur kembaran (*twinning*).<sup>[5]</sup> Pengaruh tingginya kadar karbon (C) pada baja tahan karat austenitik ini mempengaruhi kemampuan (*weldability*) dari material tabung SWH.<sup>[10]</sup>

Pada permukaan sampel yang mengalami kegagalan, hasil pengamatan metalografi menunjukkan adanya daerah sensitasi pada HAZ. Sensitasi adalah suatu fenomena dimana Kromium Karbida ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) mengendap pada batas butir, kejadian ini biasa terjadi pada kelas Stainless Steel dengan kandungan Karbon (C) yang tinggi.<sup>[11]</sup> Kondisi ini dapat terjadi sebagai akibat proses pengelasan dan pendinginannya yang lambat sehingga waktu *dwell* dari pengendapan Kromium Karbida terjadi pada temperatur antara  $480^\circ\text{C}$  sampai dengan  $850^\circ\text{C}$ . Rentang temperatur tersebut merupakan daerah terpengaruh panas (HAZ) dimana terjadi panas berlebih dialami oleh tabung dan efek mekanik ketika pembentukan silinder tabung. Daerah terpengaruh panas (HAZ) merupakan daerah terlemah pada lasan. Proses pelemanan (*degradation*) di HAZ meningkat dengan meningkatnya proses deformasi pada bagian kubah (*dome*).<sup>[11]</sup> Hal ini diperkuat dari pengamatan struktur mikro daerah lasan dimana terjadi suatu proses pembesaran butir (*grain growth*) serta nilai kekerasan yang rendah (170 HV) di HAZ bagian kubah (*dome*). Semakin besar deformasi yang diberikan akan meningkatkan energi dalam dari material SS316 sehingga pada saat diberikan panas yang tinggi akibat proses pengelasan, material akan mengalami proses pertumbuhan butir (*grain growth*) di HAZ dan diikuti dengan proses difusi karbon yang bersenyawa dengan unsur krom yang membentuk Kromium Karbida ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) ke batas butir. Hal ini akan menyebabkan kadar krom (Cr) yang berfungsi sebagai unsur ketahanan korosi berkurang (<12% Cr) di batas butir sehingga terjadi korosi batas butir (*intergranular corrosion*).<sup>[11]</sup>

Hasil pengamatan kebocoran tabung serta kunjungan lapangan (site visit) menunjukan adanya warna coklat yang timbul di bagian dalam (*inner side*) tabung yang mengindikasikan bahwa proses pengelasan tabung telah menyebabkan bagian dalam tabung ter-oksidasi akibat tidak dilakukannya proses perlindungan dengan gas mulia (*shielding gas*) di bagian belakang lasan (*no-purging*). Proses pengelasan baja tahan karat umumnya dilakukan proses perlindungan dengan gas mulia pada bagian belakang pelat yang di las atau disebut dengan *purging gas* yang menggunakan gas mulia (Argon).<sup>[12]</sup>

Korosi *Pitting* atau korosi lubang terjadi pada daerah dekat lasan atau HAZ dengan arah berasal dari bagian dalam ke bagian permukaan. Proses *pitting* tersebut di-inisiasi dengan adanya lapisan oksidasi bagian *inner* tabung akibat tidak dilakukannya *purging gas*. Lapisan oksida bagian dalam tabung ini menyebabkan perbedaan konsentrasi oksigen di bagian bawah dan diluar lapisan oksida tersebut. Selain itu media (air dari PAM) yang dipakai untuk dipanaskan umumnya mengandung sedikit unsur klorida (Cl), sehingga proses korosi lubang berlangsung cepat dan hal ini diperkuat dengan adanya pelemahan (*degradasi*) di daerah HAZ melalui korosi batas butir (*intergranular corrosion*) sehingga *pitting* (lubang) umumnya terjadi di HAZ.

Kondisi air (dari PAM) dapat menjadi sangat korosif terhadap Stainless Steel 316 jika dibiarkan dalam kondisi diam (*stagnant*) untuk waktu yang lama. Selain itu agresifitas korosi akan meningkat dalam kondisi tertutup tanpa adanya akses terhadap atmosfir.<sup>[13]</sup>

#### IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil investigasi & pengujian laboratorium diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penyebab utama dari kebocoran tabung SWH adalah akibat proses korosi sumuran (*pitting*).
2. Terjadiinya korosi sumuran (*pitting*) diinisiasi oleh tidak sesuainya komposisi material dasar tabung dengan standard (AISI 316L) dimana kadar karbon (C) cukup tinggi dan Molibdenum (Mo) cukup rendah sehingga fenomena sensitasi pada HAZ mudah terjadi. Selain itu adanya ketidak-sesuaian prosedur las yaitu tidak dilakukannya *purging gas* (*no-purging gas*) pada proses pengelasan mengakibatkan adanya oksidasi diperlakukan dalam tabung dan oksidasi ini memicu terjadinya korosi sumuran (*pitting*).

#### V. Daftar Pustaka

- [1] Andy McDonald and Joshua Bills., *The Kentucky Solar Energy Guide*, A publication of Appalachia - Science in the Public Interest and the Kentucky Solar Partnership, February 2005
- [2] ASM Metals Handbook Vol. 10, *Failure Analysis and Prevention*, American Society for Metals, Metals Park Ohio, 1987.
- [3] ASM Metals Handbook, *Handbook of Case Histories in Failure Analysis Vol. 1*, ASM International, Metals Park Ohio 1994.
- [4] ASM Metals Handbook Vol. 1, *Properties and Selection: Iron and Steel*, American Society for Metals, Metals Park Ohio, 1987.
- [5] ASM Specialty Handbook, *Stainless Steel*, ASM International, 1994.
- [6] ASTM Standard, *Metal Test Methods and Analytical Procedures*, Vol. 03.01 Sec. III, ASTM-2000.
- [7] Avner, Sidney H. *Introduction to Physical Metallurgy*. Second Edition. McGraw-Hill Book Company. 1974.
- [8] Kou, Sindo., *Welding Metallurgy*, John Wiley & Son, 1987.
- [9] ASM Specialty Handbook, *Stainless Steel*, ASM International, 1994.
- [10] Sunniva R. Colline and Peter C. Williams Chief. Weldability and corrosion studies of AISI 316 L Electropolished Tubing, *Welding Journal*. 2000.
- [11] P. S. Korinko and S. H. Malene. Considerations for the weldability of types 304 L and 316 L Stainless Steel. *Welding Journals*. 2001.
- [12] *The Procedure Handbook of Arc Welding 12th Edition*, The Lincoln Electric Company, Cleveland, 44117, 1986
- [13] M.G. Fontana and N.D . Greene, *Corrosion Engineering*, 2d ed., McGraw-Hill, 1978