

# **ANALISIS KERUSAKAN *TUBE THERMOCOUPLE* PADA REAKTOR *HYDROCRACKING* DI KILANG PENGOLAHAN MINYAK BUMI**

**Hadi Sunandrio**

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) - BPPT

Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan

E-mail : hadisunandrio@yahoo.com

*Masuk tanggal : 10-03-2014, revisi tanggal : 04-07-2014, diterima untuk diterbitkan tanggal : 18-07-2014*

## **Intisari**

**ANALISIS KERUSAKAN *TUBE THERMOCOUPLE* PADA REAKTOR *HYDROCRACKING* DI KILANG PENGOLAHAN MINYAK BUMI.** Thermocouple pada reaktor hydrocracking di kilang pengolahan minyak yang terbuat dari baja tahan karat (*stainless steel*) tipe 304 mengalami kebocoran. Kemudian dilakukan penelitian untuk menentukan sumber penyebab terjadinya kebocoran pada tube thermocouple tersebut. Metode yang digunakan untuk penelitian tersebut meliputi : pemeriksaan visual / fraktografi, metalografi, uji kekerasan, analisa komposisi kimia, dan analisa EDX (*energy dispersive X-ray analysis*). Hasil pemeriksaan secara visual pada permukaan dalam tube terlihat adanya retakan hingga tembus sampai keluar (bocor). Setelah retakan tersebut dibuka ternyata mempunyai permukaan yang memperlihatkan adanya ciri khas patah lelah (*fatigue fracture*). Struktur yang terbentuk pada tube thermocouple berupa fasa austenit, telah terjadi sensitisasi atau korosi batas butir (*intergranular corrosion*) hingga membentuk retakan pada batas butir (*intergranular cracking*) dan menjalar hingga ke tengah. Awal retak lelah (*initial fatigue crack*) diawali dari butiran yang terlepas dari ikatan strukturnya akibat telah mengalami sensitisasi pada batas butir dan retakan terlihat adanya produk korosi. Karena adanya beban yang bekerja secara dinamis, maka pada butiran yang terlepas tersebut timbul awal retak lelah (*initial fatigue crack*) dengan penjalaran retak memotong batas butir (*transgranular cracking*) hingga tembus sampai ke permukaan luar.

*Kata kunci : Tube thermocouple, Sensitisasi, Korosi batas butir, Fatik, Retak sepanjang batas butir*

## **Abstract**

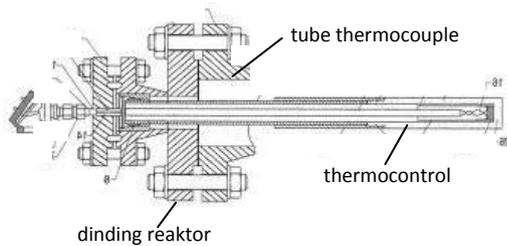
**FAILURE ANALYSIS ON *TUBE THERMOCOUPLE* REACTOR *HYDROCRACKING* IN OIL REFINERY PROCESSIN.** The thermocouple on hydrocracking reactor in oil refinery made by stainless steel grade 304 was fractured due to leakage. It was conducted an investigation to find out the root cause of the leakage of the thermocouple tube. The method used in the investigation is visual / fractography and metallography examination, hardness testing, chemical composition analysis and EDX analysis (*energy dispersive X-ray analysis*). Visual examination revealed of cracks existence on the inner surface of the tube, propagated and leakage took place. In the fracture area, the surface show typical of fatigue fracture. The structure of the thermocouple tube is austenite phase, having sensitization on grain boundary corrosion (*intergranular corrosion*) and formed cracks along grain boundaries-*intergranular cracking* and propagated into middle section of the tube thickness. The fatigue cracking initiated from the grains which regardless in the structure. This condition has undergone sensitization and cracks visible presence of corrosion products. Under cyclic loading, the removed grain induced fatigue initial crack and propagation by *transgranular* which then penetrated to outer surface.

*Keywords : Tube thermocouple, Sensitization, Intergranular corrosion, Fatigue, Transgranular crack*

## **PENDAHULUAN**

Untuk mendapatkan suatu produk bahan bakar minyak (bbm) yang bagus dan sesuai dengan standar yang berlaku, maka suhu di dalam reaktor *hydrocracking* pada kilang pengolahan minyak bumi harus selalu

dipantau, dan alat sensor yang mampu mengukur suhu sangat tinggi dan sering digunakan untuk industri pengolahan minyak adalah *thermocouple*.

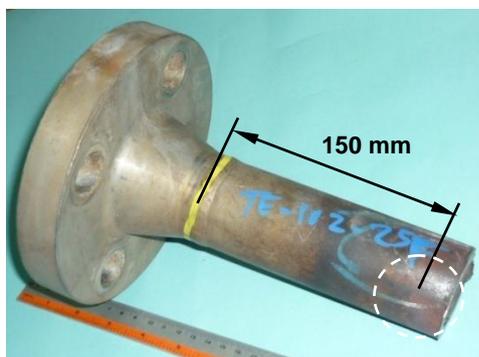


**Gambar 1.** Sketsa peletakan *thermocouple* pada dinding reaktor<sup>[1]</sup>

*Thermocouple* adalah suatu alat yang digunakan untuk mengukur suhu di dalam tungku / reaktor. Untuk mengetahui suhu di dalam tungku dibantu dengan alat yang disebut *thermocontrol*.

*Thermocouple* merupakan salah satu sensor yang paling umum digunakan untuk mengukur suhu karena relatif murah namun akurat yang dapat beroperasi pada suhu panas maupun dingin (antara -200 °C s/d 1200 °C).

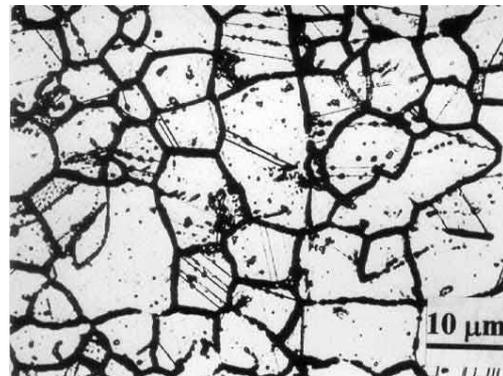
*Tube thermocouple* pada *reactor hydrocracking* di kilang pengolahan minyak terbuat dari baja tahan karat (*stainless steel*) tipe 304, mengalami kerusakan berupa bocor.



**Gambar 2.** Foto *tube thermocouple* pada reaktor *hydrocracking* yang bocor (lingkaran putih merupakan lokasi bocor)

Baja tahan karat tipe 304 adalah suatu logam paduan yang mempunyai sifat tahan terhadap korosi, sehingga banyak dipakai di dunia industri terutama pada peralatan yang dioperasikan pada temperatur tinggi. Permasalahan yang sering timbul pada baja tahan karat tipe 304 adalah ketika dioperasikan pada temperatur sensitisasi yaitu 500 - 900 °C, akan mengakibatkan

terbentuknya presipitasi karbida khrom (terutama  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) dan mengendap pada batas butir saat terjadi pendinginan. Sehingga daerah sekitar batas butir mengalami *depletion chrom*, atau miskin chromium (< 12%). Daerah yang kekurangan khromium itu menjadi lebih rentan terserang korosi dalam lingkungan agresif dibandingkan daerah yang jauh dari batas butir. Sehingga apabila berada pada lingkungan korosif cenderung akan terjadi korosi batas butir (*intergranular corrosion*)<sup>[2-3]</sup>.



**Gambar 3.** Korosi batas butir pada stainless steel tersensitisasi<sup>[4]</sup>

*Intergranular corrosion (IGC)* atau *intergranular attack (IGA)* atau korosi batas butir adalah serangan korosi pada daerah sepanjang batas butir atau daerah sekitarnya tanpa serangan yang cukup besar terhadap butirnya sendiri. Seperti kita ketahui, logam merupakan susunan butiran-butiran kristal seperti butiran pasir yang menyusun batu pasir. Butiran-butiran tersebut saling terikat yang kemudian membentuk mikrostruktur. Adanya serangan korosi batas butir menyebabkan butiran menjadi lemah terutama di batas butir sehingga logam kehilangan kekuatan dan keuletannya<sup>[4]</sup>.

Sebagian besar paduan logam rentan terserang korosi batas butir ketika dihadapkan pada lingkungan agresif. Hal ini disebabkan batas butir merupakan tempat pengendapan (*precipitation*) dan pemisahan (*segregation*), dimana membuat mereka secara fisik dan kimia berbeda dengan butirnya. Presipitasi dan segregasi

terjadi oleh adanya migrasi pengotor (*impurity*) atau unsur pepadu (*alloying element*) menuju batas butir. Pada paduan nikel dan *austenitic stainless steel*, kromium sengaja ditambahkan untuk memberikan sifat ketahanan korosi. Sekitar minimal 12% kromium dibutuhkan untuk membentuk lapisan pasif yang tidak nampak pada permukaan baja tahan karat. Lapisan ini berfungsi untuk melindungi logam dari lingkungan korosif. Pengendapan atas beberapa karbida sering disebut sebagai “sensitisasi”. Sensitisasi merupakan penyebab terjadinya serangan korosi batas butir dan terjadi saat pendinginan perlahan dari suhu 500 °C - 900 °C<sup>[4]</sup>.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan sumber penyebab bocornya *tube thermocouple* pada *reactor hydrocracking* di kilang pengolahan minyak bumi.

Metode yang digunakan untuk penelitian tersebut meliputi : pemeriksaan visual / fraktografi dan metallografi, uji kekerasan, analisa komposisi kimia, dan analisa EDX (*energy dispersive X-ray analysis*)

## **PROSEDUR PERCOBAAN**

Prosedur percobaan meliputi pemeriksaan dan pengujian sebagai berikut :

### **Pemeriksaan Visual dan Fraktografi**

Pemeriksaan visual maupun fraktografi merupakan pemeriksaan pada permukaan sampel uji yang mengalami kerusakan. Bertujuan untuk mengetahui penyebab terjadinya kerusakan pada sampel uji yang akan diteliti dan mendeteksi jenis kerusakannya, serta mencari awal terjadinya kerusakan tersebut. Alat yang digunakan adalah “*Stereo Microscope*”, metode pengujian mengacu pada ASTM E 340.

### **Pemeriksaan Metallografi**

Pemeriksaan metallografi adalah untuk mengetahui struktur mikro dari sampel uji, serta mengamati kemungkinan adanya

cacat mikro yang tidak terdeteksi oleh alat lain.

Proses analisis metalografi ini diawali dengan proses pemilihan lokasi untuk pengambilan sampel. Prosesnya diawali dengan penghalusan permukaan dengan penggerindaan dan polishing, proses ini dilakukan dengan menghaluskan permukaan benda uji atau sampel dengan menggunakan kertas amplas secara bertahap dari amplas kasar berturut-turut ke amplas yang halus (dari ukuran CCW 80 s/d CCW 600), dengan media air hingga halus. Pemolesan dilakukan dengan diamond pasta berukuran 6 $\mu$ , 3 $\mu$ , 1 $\mu$  dan ¼ $\mu$ . Untuk proses etsa, larutan etsa yang digunakan adalah aqua regia.

### **Pengujian Kekerasan**

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengevaluasi perubahan nilai kekerasan dari material yang diteliti apakah masih dalam nilai kekerasan standar yang diijinkan, atau seberapa jauh perubahan nilai kekerasan yang terjadi akibat dari pengoperasian, suhu, atau pengaruh lainnya. Alat yang digunakan adalah “*Frank Finotest*”, metode pengujian mengacu pada ASTM E 340. SNI 19-0409-1989.

### **Pemeriksaan Komposisi Kimia**

Pemeriksaan komposisi kimia dilakukan dengan mengambil sampel dari benda uji, tujuannya untuk mengetahui apakah kandungan elemen yang ada pada material dasar sampel telah sesuai dengan spesifikasi komposisi kimia standar yang digunakan. Alat yang digunakan adalah “*OES Metorex Arc-Met 930*”, metode pengujian mengacu pada ASTM A 751.

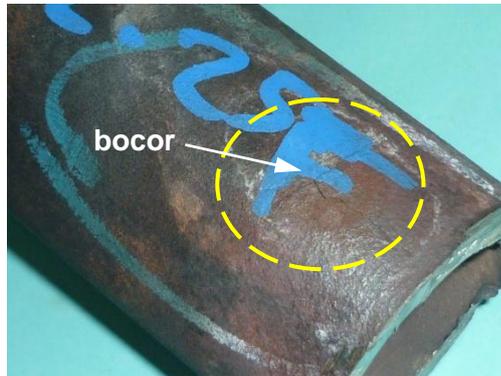
### **Pemeriksaan dengan EDX**

Pemeriksaan dengan menggunakan *EDX (energy dispersive X-ray analysis)* dilakukan pada daerah yang mengalami kerusakan, tujuannya untuk mendeteksi adanya elemen-elemen yang berpengaruh terhadap terjadinya kerusakan, seperti zat korosi, dan lain-lain.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pemeriksaan Visual / Fraktografi

Berdasarkan pemeriksaan secara visual pada *tube thermocouple* terlihat *tube* telah mengalami bocor dari dalam ke luar, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Foto makro permukaan luar *tube thermocouple* yang mengalami bocor (tanda panah merupakan lokasi bocor)

Gambar 5 menunjukkan permukaan dalam *tube* di lokasi yang bocor terlihat adanya beberapa retakan.



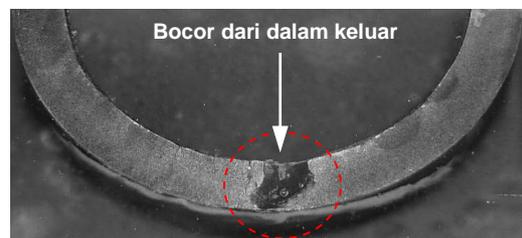
**Gambar 5.** Foto makro permukaan dalam *tube thermocouple*

Gambar 6 menunjukkan *tube thermocouple* pada arah potongan memanjang untuk memperlihatkan bahwa lokasi terjadinya kebocoran diawali dari permukaan bagian dalam yang mengalami beberapa retakan.



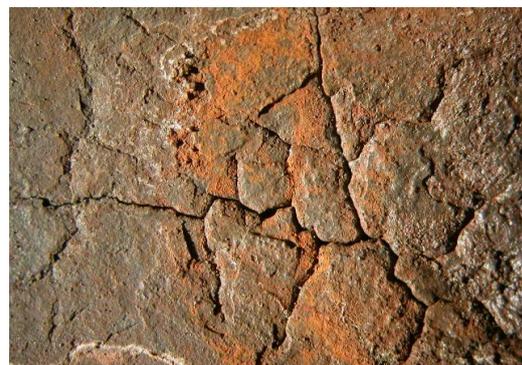
**Gambar 6.** Foto makro potongan arah memanjang *tube thermocouple*

Untuk meyakinkan bahwa bocornya *tube* diawali dari permukaan dalam, maka *tube* dipotong arah melintang seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Foto makro potongan arah melintang *tube thermocouple* di daerah yang mengalami bocor

Gambar 8 menunjukkan permukaan dalam *tube* yang merupakan tempat terjadinya kebocoran, dan mempunyai permukaan yang memperlihatkan adanya ciri khas patah lelah (*fatigue fracture*) seperti terlihat pada Gambar 9.



**Gambar 8.** Foto makro pada permukaan dalam *tube* di lokasi yang retak hingga tembus keluar.

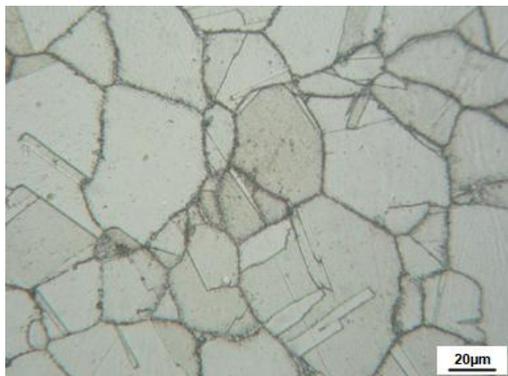


**Gambar 9.** Retak pada bagian dalam *tube* yang tembus keluar tersebut setelah dibuka ternyata mempunyai permukaan yang memperlihatkan adanya ciri khas retak lelah (*fatigue crack*)<sup>[5]</sup>

Gambar 9 menunjukkan retak lelah (*fatigue crack*) dimulai dari sisi bagian dalam kemudian menjalar keluar yang ditandai dengan adanya garis-garis pantai (*beach marck*).

### Hasil Pemeriksaan Metalografi

Gambar 10 menunjukkan hasil pemeriksaan metalografi dengan menggunakan mikroskop optik pada material *tube thermocouple* yang mengalami kerusakan (bocor). Pada gambar tersebut struktur mikro tube berupa austenit, dan telah terjadi sensitisasi atau korosi batas butir (*intergranular corrosion*).



**Gambar 10.** Struktur mikro berupa austenit, telah terjadi sensitisasi atau korosi batas butir. Etsa : Aqua Regia

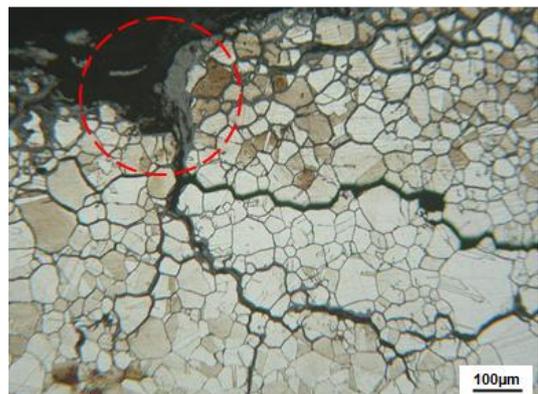
Gambar 11 dan 12 menunjukkan hasil pemeriksaan metalografi potongan arah melintang pada permukaan dalam *tube thermocouple*. Teramati dalam gambar tersebut adanya retakan - retakan melalui batas butir ke arah dalam. Awal retak dimulai dari butiran yang terlepas dari

ikatan strukturnya akibat telah mengalami sensitisasi.



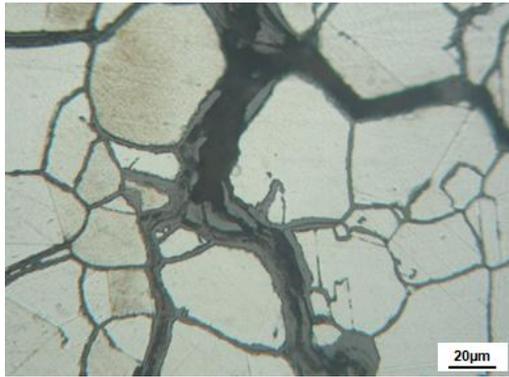
**Gambar 11.** Struktur mikro pada permukaan dalam tube memperlihatkan adanya retakan - retakan ke arah tengah. Etsa : Aqua Regia

Gambar 12 menunjukkan perbesaran dari Gambar 11 di daerah yang dilingkari merah. Area tersebut memperlihatkan bahwa tube telah mengalami sensitisasi atau korosi batas butir (*intergranular corrosion*)<sup>[3]</sup>, Awal retak lelah (*initial fatigue crack*) diawali dari butiran yang terlepas dari ikatan strukturnya akibat telah mengalami sensitisasi, hingga membentuk retakan pada batas butir (*intergranular crackings*) dan menjalar hingga ketengah.



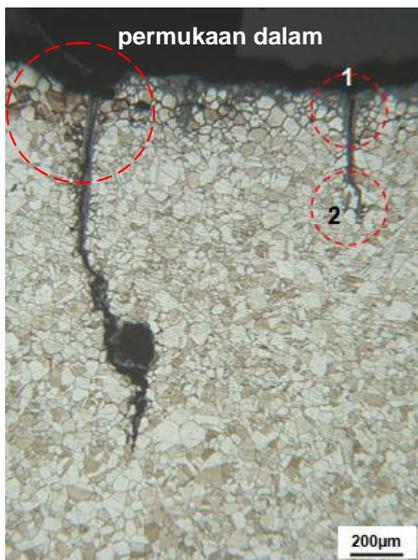
**Gambar 12.** Perbesaran dari gambar 11 di daerah yang merupakan awal timbulnya retak lelah, dimana terlihat adanya butiran yang terlepas dari ikatan strukturnya (lihat lingkaran merah). Etsa : Aqua Regia

Gambar 13 menunjukkan adanya retakan pada batas butir dan adanya produk korosi.



**Gambar 13.** Perbesaran dari gambar 12 yang menunjukkan adanya produk korosi pada batas butir dan retakan. Etsa : Aqua Regia

Gambar 14 menunjukkan struktur mikro dibagian dalam tube yang telah mengalami *thermal fatigue corrosion*, terlihat penjalaran retak memotong batas butir (*transgrannular crackings*).



**Gambar 14.** Struktur mikro pada permukaan dalam *tube thermocouple* yang telah mengalami *thermal fatigue corrosion*<sup>[5]</sup>. Etsa : Aqua Regia

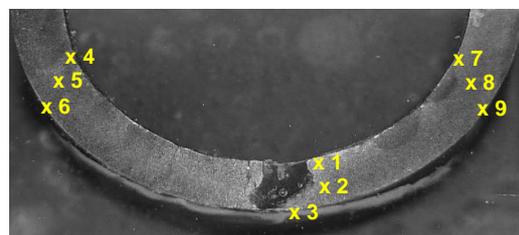
Awal retak lelah (*initial fatigue crack*) diawali dari butiran yang terlepas dari ikatan strukturnya akibat telah mengalami sensitisasi (lihat lingkaran merah pada Gambar 14 di lokasi 1).



**Gambar 15.** Struktur mikro pada awal retak lelah (*initial fatigue crack*) dimulai pada daerah yang mengalami sensitisasi. Etsa : Aqua Regia

### Hasil Uji Kekerasan

Berdasarkan hasil uji kekerasan, maka dapat dikatakan bahwa *tube thermocouple* telah memenuhi standar material ASTM A 312 Tipe TP 304 H (baja tahan karat tipe TP 304 H).



**Gambar 16.** Lokasi pengujian kekerasan

Hasil uji kekerasan dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah ini.

**Tabel 1.** Harga kekerasan rata-rata (HV) material tube thermocouple

Nilai Kekerasan Rata-Rata(HV)	Standar ASTM A 312 Tipe TP304 H
186	195 HV (maksimum)

### Hasil Analisa Komposisi Kimia

Berdasarkan hasil analisa komposisi kimia dapat dikatakan bahwa material *tube thermocouple* telah memenuhi standar material ASTM A 312 Tipe TP 304 H (baja tahan karat tipe TP 304 H).

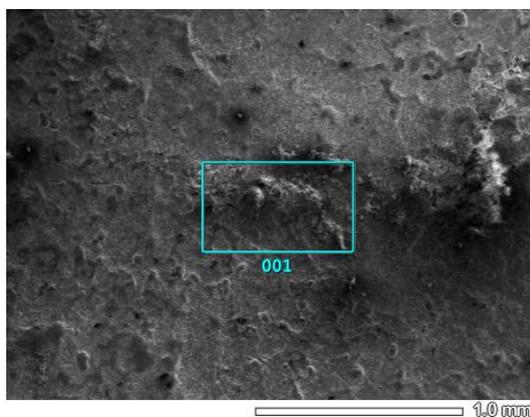
Hasil analisa komposisi kimia dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil analisa komposisi kimia material tube thermocouple

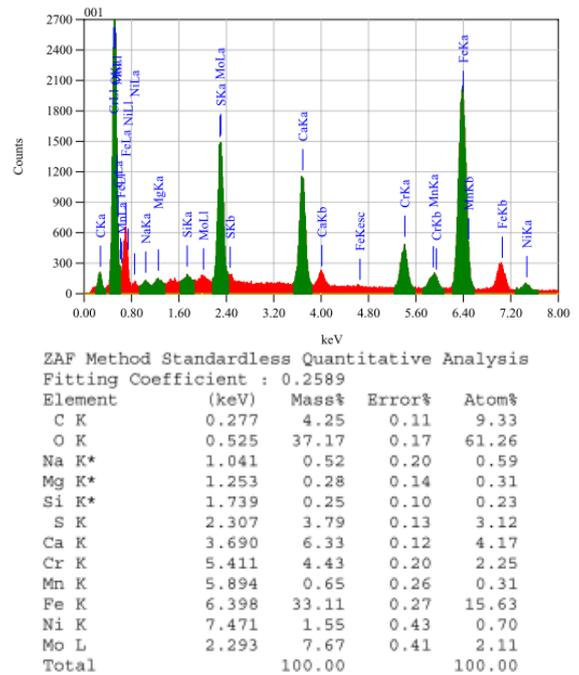
Elemen	Hasil (% berat)	Standar ASTM A 312 Tipe TP 304 H
C	0,08	0,04 - 0,10
Si	0,33	0,75 maks.
Mn	1,61	2,00 maks.
Ni	10,23	8,00 - 11,00
Cr	19,12	18,00 - 20,00
S	0,012	0,030 maks.
P	0,017	0,040 maks.

### Hasil Analisa dengan EDX

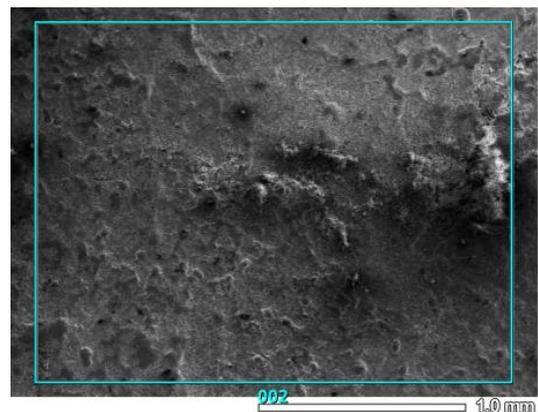
Hasil pemeriksaan dengan *EDX (energy dispersive X-ray analysis)* pada permukaan dalam *tube thermocouple* di daerah yang bocor dan terkorosi ditunjukkan pada Gambar 17 sampai dengan Gambar 22.



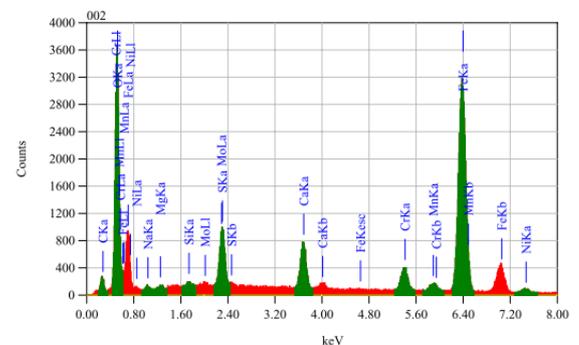
**Gambar 17.** Posisi pemeriksaan deposit dipermukaan patahan *tube thermocouple* lokasi 001



**Gambar 18.** Grafik dan tabel hasil pemeriksaan deposit dipermukaan patahan *tube thermocouple* di lokasi 001



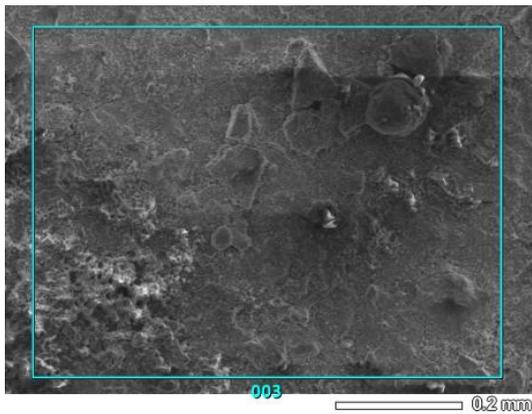
**Gambar 19.** Posisi pemeriksaan deposit dipermukaan patahan *tube thermocouple* di lokasi 002



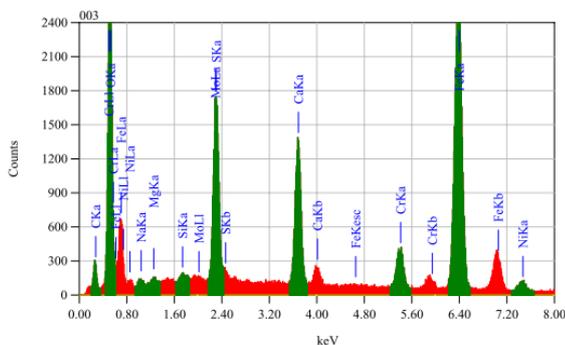
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.2617

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%
C K	0.277	4.43	0.12	10.11
O K	0.525	33.91	0.17	58.11
Na K*	1.041	0.59	0.27	0.71
Mg K*	1.253	0.33	0.19	0.37
Si K*	1.739	0.24	0.13	0.23
S K	2.307	2.34	0.16	2.00
Ca K	3.690	3.42	0.14	2.34
Cr K	5.411	3.13	0.23	1.65
Mn K				
Fe K	6.398	46.42	0.32	22.78
Ni K	7.471	1.16	0.53	0.54
Mo L	2.293	4.02	0.52	1.15
Total		100.00		100.00

**Gambar 20.** Grafik dan tabel hasil pemeriksaan deposit dipermukaan patahan *tube thermocouple* di lokasi 002



**Gambar 21.** Posisi pemeriksaan deposit dipermukaan patahan *tube thermocouple* dilokasi 003



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis  
Fitting Coefficient : 0.2717

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%
C K	0.277	5.13	0.12	11.47
O K	0.525	34.53	0.19	57.98
Na K	1.041	0.46	0.22	0.54
Mg K	1.253	0.26	0.16	0.29
Si K	1.739	0.14	0.11	0.14
S K	2.307	3.67	0.14	3.07
Ca K	3.690	6.36	0.13	4.26
Cr K	5.411	3.26	0.21	1.69
Fe K	6.398	36.37	0.28	17.50
Ni K	7.471	1.82	0.46	0.83
Mo L	2.293	8.01	0.44	2.24
Total		100.00		100.00

**Gambar 22.** Grafik dan tabee hasil pemeriksaan deposit dipermukaan patahan *tube thermocouple* dilokasi 003

Dari hasil pemeriksaan secara visual dan makro fraktografi terhadap *tube thermocouple* terlihat bahwa *tube* telah mengalami retak dari dalam hingga tembus sampai keluar (bocor). Retak pada *tube* yang tembus sampai keluar tersebut ternyata mempunyai permukaan yang memperlihatkan adanya ciri khas patah lelah (*fatigue fracture*), yang di mulai dari sisi bagian dalam kemudian menjalar keluar yang ditandai dengan adanya garis-garis pantai (*beach mark*)<sup>[5-6]</sup>.

Struktur mikro material *tube thermocouple* berupa austenit, telah terjadi sensitisasi atau korosi batas butir (*intergranular corrosion*), (Gambar 10).

Struktur mikro pada bagian dalam tube telah mengalami *sensitization* atau korosi batas butir (*intergranular corrosion*), hingga membentuk retakan pada batas butir. Pada batas butir dan retakan terlihat adanya produk korosi, (Gambar 11, 12 dan 13).

Selain itu ditemukan juga adanya struktur mikro dibagian dalam tube yang telah mengalami *thermal fatigue corrosion*, dimana penjaran retak fatik memotong batas butir (*transgrannular crackings*), awal retak lelah (*initial fatigue crack*) dimulai dari butiran yang terlepas dari ikatan strukturnya akibat telah mengalami sensitisasi, (Gambar 14 dan 15).

Besar kecilnya kandungan khrom sangat berpengaruh sekali terhadap ketahanan korosinya. Bila dalam paduan baja terdapat sejumlah kecil khrom maka baja tersebut akan lebih tahan terhadap korosi dibandingkan baja pada umumnya. Semakin banyak khrom yang terkandung dalam baja, maka ketahanan korosinya semakin baik. Jika jumlah khromium (*Cr*) antara 10 % - 12 % maka paduan akan memiliki ketahanan yang baik (*satisfactory resistance*) terhadap korosi udara atau *spontaneous rusting*. Oleh karena itu baja tahan karat harus mengandung unsur khromium tidak kurang dari 10 % agar sifat khas yang telah disebutkan di atas dapat dimiliki<sup>[7]</sup>.

Dari hasil pemeriksaan deposit pada permukaan dalam *tube thermocouple* dengan metoda EDX terindikasi mengandung unsur-unsur : Carbon (C), Oksigen (O), Natrium (Na), Magnesium (Mg), Silikon (Si), Aluminium (Al), Sulfur (S), Kalsium (Ca), Khromium (Cr), Mangan (Mn), Besi (Fe), Nikel (Ni) dan Molibdenum (Mo) seperti ditunjukkan pada Gambar 18, 20 dan 22. Dari hasil EDX dijumpai adanya unsur yang bersifat korosif seperti Sulfur (S) dengan adanya lingkungan yang bersifat korosif maka akibatnya pada batas butir akan lebih mudah terkorosi.

Dengan lepasnya beberapa butiran dari ikatan struktur akibat mengalami sensitisasi akan menyebabkan permukaan dalam *tube thermocouple* rentan terhadap kerusakan. Daerah tempat lepasnya butiran tersebut akan menjadikan initial dari beberapa kerusakan seperti yang terjadi pada permukaan dalam *tube thermocouple*, tergantung dari pembebanannya.

Metode yang biasa digunakan untuk mencegah sensitisasi pada baja tahan karat austenitik yaitu mengurangi kadar karbon dari material, menstabilkan atom karbon sebagai karbida non-kromium dengan menambah titanium, niobium, zirkonium, *local solution heat treatment* dengan sinar laser dan lain-lain.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian terhadap *tube thermocouple*, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. *Tube thermocouple* mengalami bocor dikarenakan pada permukaan dalam tube mengalami sensitisasi atau korosi batas butir (*intergranular corrosion*), hingga membentuk retakan pada batas butir (*intergranular cracking*).
2. Akibat mengalami sensitisasi maka ada beberapa butiran yang terlepas dari ikatan strukturnya. Butiran yang terlepas tersebut dengan beban yang bekerja adalah dinamis, dapat menimbulkan awal retak lelah (*initial*

*fatigue crack*) dengan penjalaran retak memotong batas butir (*transgranular cracking*) hingga menyebabkan tube bocor.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] JSW (Japan Steel Works). 1968. "Drawing Reactor Hydrocracking Plant". Far East Sumitomo Japan.
- [2] Dmitri Kopeliovich, Dr. 2006. "*Intergranular Corrosion*". ([http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=intergranular\\_corrosion](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=intergranular_corrosion) , diakses 02 Agustus 2013)
- [3] Jones, Denny A. 1992., "Principles and Prevention of Corrosion". Maxwell Publishing Company, Canada.
- [4] Callister William D. 2001., "Fundamentals of Materials Science and Engineering". Fifth Edition, John Wiley & Sons Inc, New York.
- [5] H. Kitegava. 1998., "Corrosion Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure". NACE, Houston.
- [6] ASM Metals Handbook. 2002. "*Failure Analysis and Prevention*". Vol 11, American Society for Metals, Washington D.C.
- [7] Fontana Mars G. 1996., "Corrosion Engineering". Third Edition, Mc. Graw - Hill Book Company, New York.
- [8] Davies J.R. 2000., "*Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*". ASM International, New York.

