

SERANGAN KOROSI SUMURAN PADA *TUBE HEAT EXCHANGER* DI KILANG PENGOLAHAN MINYAK

PITTING CORROSION INCURSION ON HEAT EXCHANGER TUBE IN PROCESSING OIL REFINERY

Hadi Sunandrio^a dan Sutarjo^b

^{a,b}Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) - BPP Teknologi Kawasan PUSPIPTEK, Setu, Tangerang Selatan 15314 - Banten
Telp. : 021-7560930, Fax. : 021-7560903
Email : ^ahadisunandrio@yahoo.com,
^bsutarjodurahman@yahoo.com

Abstrak

Alat penukar panas (*Heat Exchanger*) adalah suatu alat yang berfungsi untuk menaikkan temperatur. Apabila salah satu komponen dari *Heat Exchanger* tersebut mengalami kerusakan, maka temperatur yang diinginkan tidak akan tercapai. Salah satu dari *tube heat exchanger* yang ada di Kilang Pengolahan Minyak mengalami kerusakan berupa putus akibat terkorosi. Setelah dilakukan pemeriksaan dan pengujian yang meliputi : pemeriksaan visual, metalografi, uji kekerasan, analisa komposisi kimia, dan analisa EDAX. Maka diketahui bahwa *tube Heat Exchanger* telah mengalami serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*) pada permukaan dalam dan luar *tube*. Terjadinya serangan korosi sumuran, karena pada permukaan dalam dan luar *tube* terlapisi oleh deposit yang cukup tebal dan mengandung unsur-unsur Sulphur (S) dan Chlor (Cl) yang dapat memicu timbulnya serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*), hingga *tube* mengalami penipisan di mana-mana dan putus.

Kata kunci : Alat penukar panas, *Tube*, Endapan, Korosi sumuran, putus.

Abstract

Heat exchangers is a tool that serves to raise the temperature. If one component of the Heat Exchanger is damaged, then the desired temperature will not be reached. One of the tube heat exchanger that is in Oil Refinery suffered damage in the form of broken due to corroded. After examination and testing that includes visual inspection, metallography, hardness testing, chemical composition analysis, and analysis of EDAX. It is known that the tube Heat Exchanger has suffered attacks pitting corrosion on the surface of the inner and outer tube. Pitting corrosion attack, because the surface of inner and outer tube coated by a deposit that is thick and contains elements of Sulphur (S) and Chlor (Cl) which can lead to pitting corrosion attack, to experience thinning tube where everywhere and broken

Keyword : Heat exchanger, Tube, Deposit, Pitting corrosion, Broken.

Diterima (*received*) : 23 September 2014, Direvisi (*reviewed*) : 15 Oktober 2014, Disetujui (*accepted*) : 22 November 2014

PENDAHULUAN

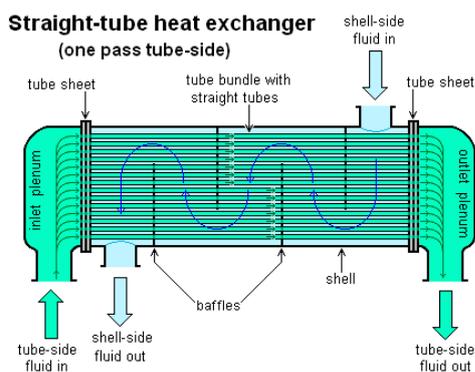
Peristiwa perpindahan panas banyak dijumpai dalam industri - industri perminyakan, misalnya pada proses pendinginan atau pemanasan umpan yang akan masuk ke reaktor atau suatu pembangkit tenaga. Salah satu tahapan

pada proses pengolahannya adalah proses pertukaran panas yang terjadi pada *heat exchanger* dimana temperatur yang diinginkan harus dijaga konstan dengan memanipulasi laju fluida pemanas yakni berupa *steam*.¹⁾

Penukar panas atau dalam industri kimia populer dengan istilah bahasa Inggrisnya, *heat exchanger* (HE), adalah suatu alat yang

memungkinkan perpindahan panas dan dapat berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Biasanya, medium pemanas dipakai uap lewat panas (*super heated steam*) dan air biasa sebagai air pendingin (*cooling water*). Penukar panas dirancang sebisa mungkin agar perpindahan panas antar fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung begitu saja. Penukar panas sangat luas dipakai dalam industri seperti kilang minyak, pabrik kimia maupun petrokimia, industri gas alam, refrigerasi, pembangkit listrik.¹⁾

Jenis *Heat Exchanger* yang umum digunakan di Kilang Pengolahan Minyak adalah tipe *Shell and Tube Heat Exchanger*, (Gambar 1).



Gambar 1.
*Shell And Tube Heat Exchanger*¹⁾

Dimana terdiri atas suatu bundel pipa yang dihubungkan secara paralel dan ditempatkan dalam sebuah pipa mantel (cangkang). Fluida yang satu mengalir di dalam bundel pipa, sedangkan fluida yang lain mengalir di luar pipa pada arah yang sama, berlawanan, atau bersilangan. Kedua ujung pipa tersebut dilas pada penunjang pipa yang menempel pada mantel.¹⁾

Dalam hal ini kerusakan yang sering terjadi pada unit *heat exchanger* di Kilang Pengolahan Minyak adalah pada tube bundelnya, dimana sering mengalami serangan korosi (Gambar 2). Dan apabila salah satu dari komponen *heat exchanger* tersebut mengalami kerusakan, maka temperatur yang diinginkan tidak akan tercapai.²⁾

Pada kasus ini dijumpai adanya beberapa *tube heat exchanger* yang mengalami korosi cukup parah hingga menyebabkan tube putus (gambar 3).



Gambar 2.
Photo *Heat Exchanger* Yang Mengalami Serangan Korosi²⁾

Diketahui bahwa korosi adalah proses pelapukan atau perubahan sifat dari suatu bahan akibat pengaruh atau reaksinya dengan lingkungan sekitarnya.²⁾

Untuk mengetahui penyebab terjadinya kerusakan tersebut maka perlu dilakukan penelitian untuk mencari sumber penyebab terjadinya korosi pada *tube heat exchanger* tersebut dengan menggunakan beberapa metode pemeriksaan dan pengujian, meliputi : pemeriksaan visual, metalografi, uji kekerasan, analisa komposisi kimia, dan analisa EDAX (*Energy Dispersive X-Ray Analysis*)

BAHAN DAN METODE

Bahan

Jenis *Heat Exchanger* adalah tipe *Shell and Tube*. Material *Tube Heat Exchanger* yang putus terkorosi menggunakan bahan dari standard ASTM A 213 Grade T11.

Metode

Metode penelitian meliputi pemeriksaan dan pengujian sebagai berikut

- Pemeriksaan Fraktografi dengan menggunakan "Stereo Microscope" (mengacu pada ASTM E 340) : Untuk memeriksa permukaan kerusakan dan mendeteksi jenis kerusakan serta mencari awal dari kerusakan.
- Pemeriksaan Metalografi dengan menggunakan mikroskop optik "Metalloplan" (mengacu pada ASTM E 407) : Untuk mengamati struktur makro dan mikro serta mengamati kemungkinan adanya cacat mikro yang tidak terdeteksi oleh alat lain.
- Uji Kekerasan menggunakan alat "Frank Finotest" (mengacu pada SNI 19-0406) :

Untuk mengevaluasi perubahan nilai kekerasan yang terjadi setelah beroperasi.

- Pemeriksaan Komposisi Kimia menggunakan alat "OES Metorex Arc-Met 930" (mengacu pada ASTM A 751) : Untuk meneliti kandungan elemen yang ada pada material dasar dari tube.
- Analisis deposit menggunakan alat EDAX (Energy Dispersive X-Ray Analysis) : Untuk mendeteksi adanya elemen yang berpengaruh terhadap terjadinya kerusakan, seperti zat korosi, dll.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pemeriksaan Makro Fraktografi

Pemeriksaan secara visual pada *tube heat exchanger* yang putus memperlihatkan adanya serangan korosi yang cukup serius, pada Gambar 3.



Gambar 3.
Photo *Tube Heat Exchanger* Yang Putus Karena Terkorosi

Hasil pemeriksaan pada ujung *tube heat exchanger* yang putus (sampel 1, lihat Gambar 3), terlihat bahwa korosi telah menyerang permukaan luar dan dalam tube, seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dan 5.



Gambar 4.
Photo Makro Ujung *Tube Heat Exchanger* Yang Putus (Sampel 1)



Gambar 5.
Photo Makro Potongan Memanjang *Tube* (Sample 1) Yang Memperlihatkan Pada Permukaan Dalam Telah Terserang Korosi Cukup Parah

Hasil pemeriksaan *tube heat exchanger* pada lokasi 1 meter dari daerah yang mengalami putus (sampel 2, lihat Gambar 3), terlihat bahwa korosi juga telah menyerang permukaan luar dan dalam tube, seperti pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6.
Photo Makro *Tube Heat Exchanger* Pada Lokasi 1 m Dari Daerah Yang Mengalami Putus (Sampel 2)

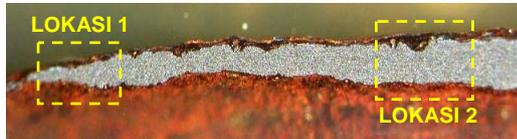


Gambar 7.
Photo Makro Potongan Memanjang *Tube* (Sample 2) Yang Memperlihatkan Pada Permukaan Dalam Telah Terserang Korosi Cukup Parah.

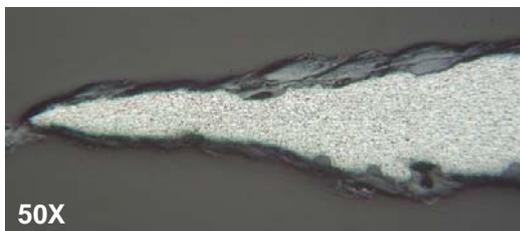
Hasil Pemeriksaan Metalografi

Berdasarkan hasil pemeriksaan metalografi potongan memanjang *tube heat exchanger*

pada daerah yang mengalami putus (sampel 1), terlihat adanya serangan *pitting corrosion* yang cukup parah pada permukaan luar dan dalam tube. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 8 s.d 11.

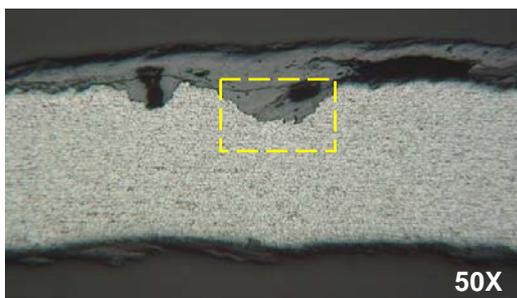


Gambar 8.
Makro Etsa Potongan Memanjang *Tube Heat Exchanger* Pada Daerah Yang Mengalami Putus (sample 1)
Perbesaran : 25X. Etsa : Nital 2%



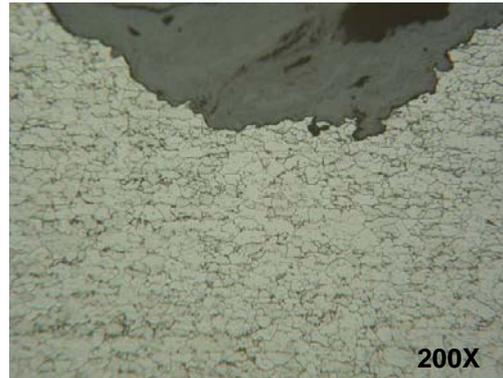
Gambar 9.
Struktur Mikro Pada Ujung Tube Didaerah Yang Putus (lokasi 1, lihat Gambar 8)

Pada Gambar 9 menunjukkan struktur mikro *tube heat exchanger* berupa feritik dengan butir karbida yang tersebar merata, terlihat pada permukaan luar dan dalam tube terkikis oleh korosi.



Gambar 10.
Struktur Mikro Potongan Memanjang *Tube* Pada Lokasi 2 Berupa Feritik Dan Karbida Yang Tersebar Merata.

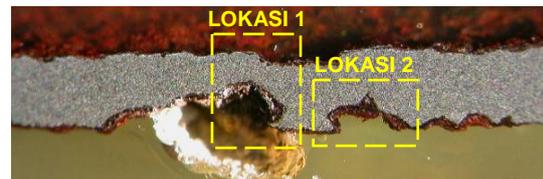
Terlihat pada Gambar 10 permukaan luar terlapisi oleh deposit yang cukup tebal hingga menimbulkan serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*).



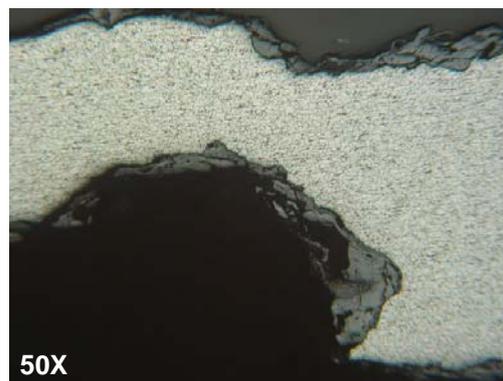
Gambar 11.
Perbesaran 200X Dari Gambar 10

Perbesaran dari Gambar 10 di daerah yang mengalami serangan (*pitting corrosion*), terlihat tertutupi oleh deposit.

Begitu pula hasil pemeriksaan metalografi potongan memanjang *tube heat exchanger* pada lokasi 1 meter dari daerah yang mengalami putus (sampel 2), terlihat adanya serangan *pitting corrosion* yang cukup parah pada permukaan luar dan dalam tube. Kerusakan ini ditunjukkan pada Gambar 12 s.d 15.

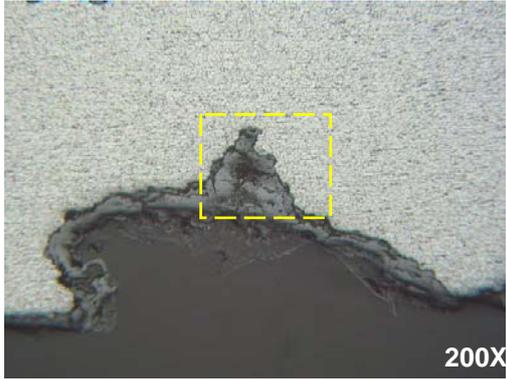


Gambar 12.
Makro Elsa Potongan Memanjang *Tube Heat Exchanger* Pada Lokasi 1 Meter Dari Daerah Yang Mengalami Putus (Sampel 2).
Perbesaran : 25X. Etsa : Nital 2%.



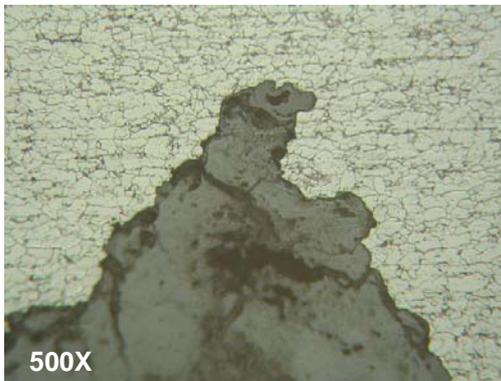
Gambar 13.
Struktur Mikro Potongan Memanjang *Tube* Pada Lokasi 1 (lihat Gambar 12),

Terlihat pada Gambar 13 permukaan dalam mengalami serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*).



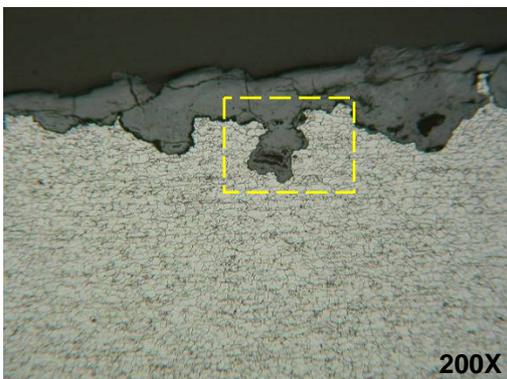
Gambar 14.
Struktur Mikro Potongan Memanjang *Tube*
Pada Lokasi 2 (lihat Gambar 12),

Terlihat pada Gambar 14 permukaan dalam mengalami serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*).



Gambar 15.
Perbesaran 500X Dari Gambar 14

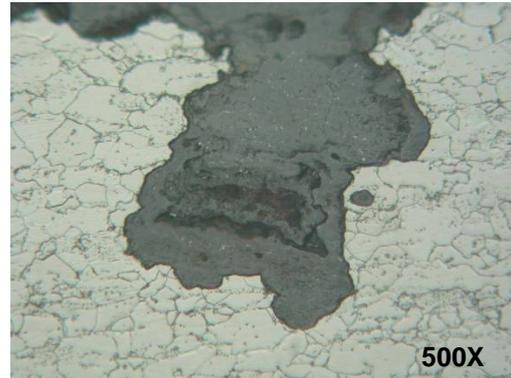
Pada Gambar 15 dipermukaan yang mengalami serangan *pitting corrosion*, didalamnya terjadi *secondary pitting corrosion*.



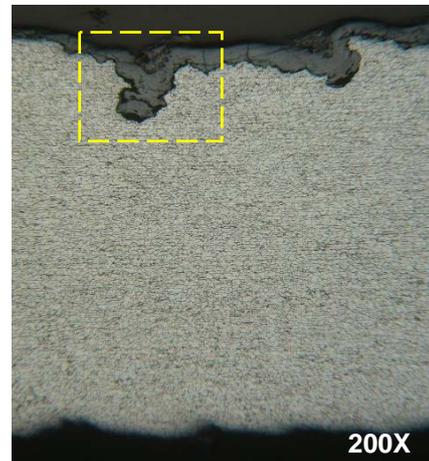
Gambar 16.
Struktur Mikro Pada Permukaan Luar Di
Lokasi Lain

Pada Gambar 16 terlihat pada permukaan luar di lokasi lain juga mengalami serangan

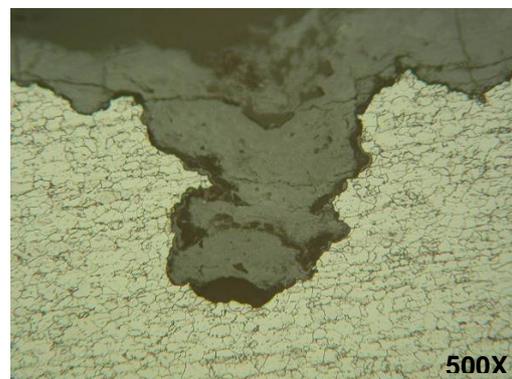
pitting corrosion dan pada permukaannya tertutupi oleh deposit.



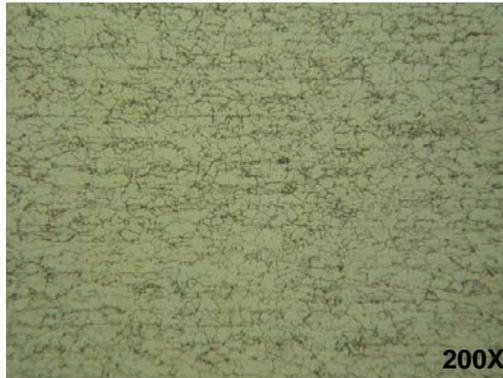
Gambar 17.
Perbesaran 500X Dari Gambar 16 Di Lokasi
Mengalami Serangan Korosi Sumuran (*Pitting
Corrosion*).



Gambar 18.
Struktur Mikro Di Lokasi Yang Lain, Terlihat
Pada Permukaan Luar Mengalami Serangan
Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*).



Gambar 19.
Perbesaran 500X Dari Gambar 18 Di Lokasi
Yang Mengalami Serangan Korosi Sumuran
(*Pitting Corrosion*).



Gambar 20.
Struktur Mikro Di Bagian Tengah Tube Berupa Ferritik Dan Karbida Yang Tersebar Merata Etsa : Nital 2%.

Hasil Uji Kekerasan

Berdasarkan hasil uji kekerasan terhadap material *tube heat exchanger* (Tabel 1) telah memenuhi *standard material ASTM A 213 Grade T11³⁾*.

Tabel 1.
Hasil Pengujian Kekerasan

Nilai Kekerasan (HV)		Standard ASTM A 213 Grd. T11
Spl. 1	Spl. 2	
123	149	
122	156	
124	161	
124	148	
124	166	
123.4	156.0	170 HV (max.)

Sumber Data :
Standard ASTM A 213, "Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy Steel - Boiler, Superheater and Heat Exchanger Tube"

Analisis Komposisi Kimia

Berdasarkan hasil analisis komposisi kimia terhadap material *tube heat exchanger* telah memenuhi *standard material ASTM A 213 Grade T11³⁾*. Hasil analisis komposisi kimia dapat dilihat pada Tabel 2 :

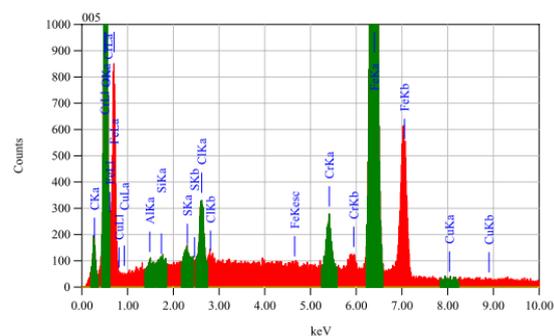
Tabel 2.
Hasil Analisa Komposisi Kimia

Unsur	Result (% wt)	Standard ASTM A 213 Grd. T11
C	0.11	0.05 - 0.15
Si	0.22	0.50 max.
Mn	0.54	0.30 - 0.61
Cr	1.03	0.80 - 1.25
Ni	0.080	---
Mo	0.58	0.44 - 0.65
S	0.0064	0.025 max.
P	0.014	0.025 max.

Sumber Data :
Standard ASTM A 312, "Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy Steel - Boiler, Superheater and Heat Exchanger Tube"

Analisis EDAX

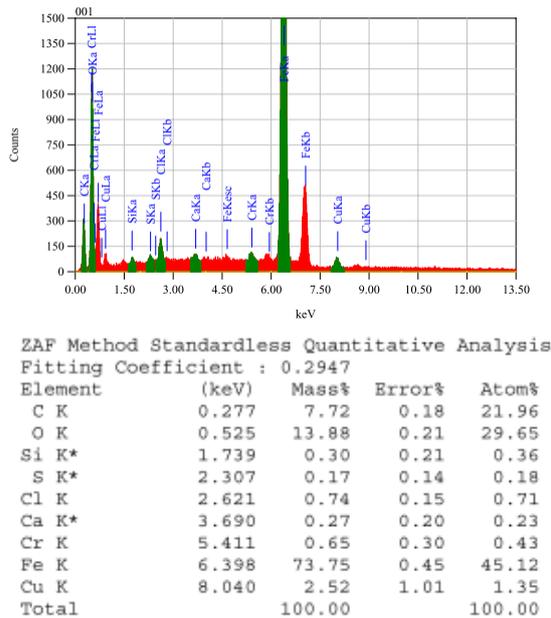
Hasil pemeriksaan dengan *EDAX (Energy Dispersive X-Ray Analysis)* pada permukaan luar dan dalam *tube heat exchanger* di daerah yang terkorosi dapat dilihat pada Gambar 21 dan 22 dibawah ini:



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.2382

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%
C K	0.277	3.22	0.14	8.60
O K	0.525	24.56	0.15	49.23
Al K*	1.486	0.21	0.20	0.25
Si K	1.739	0.08	0.17	0.09
S K*	2.307	0.14	0.11	0.14
Cl K	2.621	1.19	0.12	1.08
Cr K	5.411	1.80	0.25	1.11
Fe K	6.398	68.74	0.38	39.47
Cu K*	8.040	0.05	0.83	0.03
Total		100.00		100.00

Gambar 21.
Grafik Dan Tabel Hasil Pemeriksaan Dengan *EDAX (Energy Dispersive X-Ray Analysis)* Pada Permukaan Luar *Tube Heat Exchanger*.



Gambar 22. Grafik dan Tabel hasil pemeriksaan dengan EDAX (*Energy Dispersive X-Ray Analysis*) Pada Permukaan Dalam *Tube Heat Exchanger*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan karakteristik kerusakan yang terdapat pada *Tube Heat Exchanger* memperlihatkan bahwa tube mengalami putus berbentuk seperti rapuh (kropos) akibat terserang korosi pada sisi luar dan dalam. Disepanjang permukaan luar dan dalam tube yang patah terlihat tertutupi oleh lapisan deposit yang cukup tebal disertai dengan serangan korosi yang cukup dalam di mana-mana, lihat Gambar 3 s.d 7.³⁾

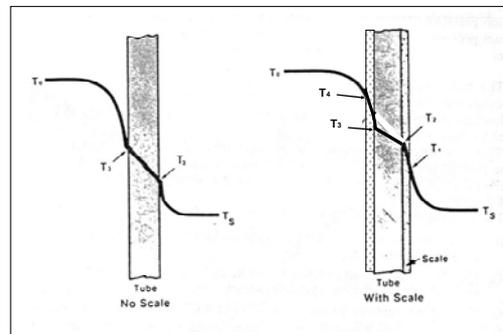
Struktur mikro potongan memanjang disepanjang *Tube Heat Exchanger* yang patah berupa feritik dan karbida yang tersebar merata, terlihat pada hampir keseluruhan permukaan luar dan dalamnya tertutupi oleh lapisan deposit yang cukup tebal, sehingga menimbulkan serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*), lihat Gambar 8 s.d 19.⁴⁾⁵⁾

Struktur mikro potongan memanjang di bagian tengah tube berupa feritik dan karbida yang tersebar merata, lihat Gambar 20.

Dari hasil pemeriksaan metallografi diatas menunjukkan bahwa *Tube Heat Exchanger* sebelumnya telah mengalami panas berlebih (*over heating*) pada saat dioperasikan, dikarenakan pada permukaan luar dan dalam tube terlapis atau tertutup oleh deposit yang cukup

tebal, terbukti dengan telah terbentuknya presipitasi karbida yang tersebar merata diseluruh butiran ferit.³⁾

Deposit yang terbentuk secara merata tersebut diatas tentunya dapat menghambat perpindahan panas dari luar pipa sebagai sumber panas pembakaran menuju ke dalam sebagai media atau fluida yang dipanaskan. Akibatnya secara teori dapat meningkatkan temperatur hingga melampaui temperatur desain maksimum tube, sehingga dapat menyebabkan *tube over heating*, walaupun belum sampai merubah bentuk struktur mikro. Dengan meningkatnya temperatur, walaupun sedikit diatas temperatur disain maksimum akan tetapi dalam jangka waktu tertentu sudah membentuk adanya presipitasi karbida yang tersebar merata diseluruh butiran kristal.⁶⁾



Gambar 23. Ilustrasi Profil Temperatur Dari Temperatur Gas Pembakar (T_o) Terhadap Aliran Fluida (T_s) Yang Mengalir Didalam Pipa.⁶⁾

Sebagai ilustrasi pengaruh lapisan deposit (*scale layer*) akan mempengaruhi profil temperatur yang dialami oleh tube, dapat dilihat pada Gambar 23 yang melukiskan secara skematis perbedaan temperatur pada proses perpindahan panas dari gas pembakar terhadap fluida yang mengalir didalam *tube*.⁶⁾

Dari hasil pemeriksaan deposit pada permukaan dalam dan luar *Tube Heat Exchanger* dengan metoda SEM dan EDX terindikasi mengandung unsur-unsur : *Carbon (C), Oxygen (O), Silicon (Si), Aluminium (Al) - diameter luar, Sulphur (S), Chlor (Cl), Natrium (Na), Calcium (Ca) - diameter dalam, Chrome (Cr), Iron (Fe) dan Cooper (Cu)*.

Deposit yang terbentuk pada permukaan dalam dan luar tube akibat reaksi antara material *tube* dengan oksigen sehingga membentuk Fe_2O_3 (*iron okside*) adalah berupa kerak oksida besi yang biasa dikenal dengan serangan korosi merata (*General Corrosion*).⁷⁾

Dalam kondisi basah deposit yang mengandung Cl dan S tersebut dapat menimbulkan korosi dibawah deposit (*corrosion under deposit*) yang serius,

sehingga korosi berkembang dan dapat merusak lapisan film pada permukaan dalam dan luar *tube heat exchanger*, dimana lapisan film tersebut berfungsi sebagai pelindung dari serangan korosi. Dengan rusaknya lapisan film yang berada dibawah lapisan didposit pada permukaan dalam dan luar *tube heat exchanger* maka daerah tersebut akan mudah terserang korosi.⁷⁾ Dilihat dari bentuk dan fenomena terjadinya korosi, maka dalam dan luar *tube heat exchanger* telah mengalami serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*).^{8) 9) 10)} Proses korosi terus berlangsung hingga mengakibatkan *tube heat exchanger* mengalami penipisan di mana - mana.⁷⁾⁸⁾ Dengan sisa ketebalan yang ada maka *Tube Heat Exchanger* tidak mampu lagi menahan tekanan fluida dari dalam, sehingga *tube* putus.

Nilai kekerasan didaerah yang putus berkisar antara 122 HV s/d 124 HV, sedangkan nilai kekerasan yang berjarak \pm 1 meter dari posisi yang putus adalah berkisar antara 148 HV s/d 166 HV, hal ini menunjukkan bahwa *tube* yang putus rapuh (kropos) karena terserang korosi nilai kekerasan atau kekuatannya lebih rendah bila dibandingkan dengan yang berjarak \pm 1 meter dari posisi yang putus. Hasil pemeriksaan komposisi kimia terhadap *Tube Heat Exchanger* telah memenuhi spesifikasi standard ASTM A 213 Grd. T11.

SIMPULAN

Dari pembahasan diatas ternyata *Tube Heat Exchanger* mengalami putus karena serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*) pada permukaan dalam dan luar *tube*. Terjadinya serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*) karena pada permukaan dalam dan luar *tube* terlapis oleh deposit yang cukup tebal dan mengandung unsur-unsur Sulphur (S) dan Chlor (Cl) yang dapat memicu timbulnya serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*), hingga *tube* mengalami penipisan di mana-mana. Selain itu dengan adanya lapisan deposit pada permukaan dalam dan luar *tube* dapat menghambat perpindahan panas antara gas yang terbakar untuk memanasi pipa dan fluida air yang mengalir di dalam pipa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Hamir Hamzah selaku Kepala B2TKS

BPPT dan Dr.Ing.H.Agus Suhartono selaku Kepala Bidang Kajian Material B2TKS, untuk koordinasi dan pemberian ijin dalam menggunakan alat uji di laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

1. "Applications and Uses". <http://thermex.co.uk/Shell-and-Tube-Heat-Exchangers-1> Retrieved 2011-08-23.
2. Xie Jeffrey, Butcher Murray, Rockwell Tyler, Yazdanfar Katy, Chang Howard, *Corrosion of a Shell-and-Tube Heat Exchanger*, NACE International.
3. Virk M.A, Butt M.A, Chughtai A, Ahmad M, Khan I.H, Deen K.M, *Failure Analysis of Heat Exchanger Fluid Vapor Phase Vent Lines in a Polyester Plant*, Journal of Engineering Failure Analysis, Vol. 17, Issue 2, March 2010, Pages 447-454.
4. Cebro, Irwin Syahri, *Analisa Korosi Pada Heat Exchanger E-4512 PT. Arun NGL Co*, Jurnal Polimesin - Politeknik Negeri Lhokseumawe - Jurusan Teknik Mesin, Vol. 1, No. 1, 2006, hal. 50-60.
5. Ibrahim, Rizal Mohammad, *Analisa Kegagalan Material Baja Karbon ASTM A 179 dan SS 316L pada Tube Heat Exchanger 09-E-105 PT Petrokimia Gresik*, Jurnal Teknik Material dan Metalurgi - Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Vol. 1, No. 1, 2013, hal. 50-60.
6. French.David.N., *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, John Wiley & Sons, New York of America, 2008.
7. Michael Schütze, *High Temperature Corrosion Issues in the Chemical and Petrochemical Industries*, Journal of Corrosion Engineering, Science and Technology, Vol. 40, Issue 3, September 2005, pp. 203-213.
8. Frankel G.S., *Pitting Corrosion of Metals A Review of the Critical Factors*, Journal of The Electrochemical Society (JES), Vol. 145, No. 6, 2010, pp. 2186-2198.
9. Galvele Jose R, *Pitting Corrosion of Metals A Transport Processes and the Mechanism of Pitting of Metals*, Journal of The Electrochemical Society (JES), Vol. 123, No. 11, 2008, pp. 464-480.
10. Luis Garfias, Erick Ramirez; Xinming Hu, Anne Neville, Ismarullizam Ismail, *In Situ Visualization of Pitting Corrosion on CRAs at High Temperature and Pressure*, Journal of Corrosion 2013 Conference & Expo : Control of Corrosion in Oil and Gas Production with Inhibitors Investigation of Pitting - Corrosion and Inhibition in Sweet Conditions, 2013.