

ANALISIS KERUSAKAN PIPA *BAFFLE* PADA SISTEM *HEAT EXCHANGER* SUATU PROSES TRANSFER PANAS

Eka Febriyanti

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) – BPPT

Kawasan Puspitek Serpong Tangerang 15314

E-mail : eka.ndut@yahoo.com

Masuk tanggal : 25-09-2013, revisi tanggal : 01-11-2013, diterima untuk diterbitkan tanggal : 18-11-2013

Intisari

ANALISIS KERUSAKAN PIPA *BAFFLE* PADA SISTEM *HEAT EXCHANGER* SUATU PROSES TRANSFER PANAS. Tulisan ini membahas tentang kombinasi antara serangan erosi (pengikisan) dan proses korosi yang terjadi pada permukaan luar sebagai faktor penyebab kebocoran pipa *baffle* dari *heat exchanger* dan memberi solusi pencegahan pada kasus yang sama di masa yang akan datang. *Heat exchanger* merupakan alat yang berfungsi untuk memindahkan panas dari cairan bertemperatur tinggi ke cairan yang bertemperatur lebih rendah melalui mekanisme kombinasi antara konduksi dan gaya konveksi. Ketika *heat exchanger* rusak maka dapat mempengaruhi seluruh sistem dari transfer panas. Pada penelitian ini pipa *baffle* dari *heat exchanger* yang rusak diperiksa dengan metode analisa kerusakan untuk menemukan penyebab kerusakan. Beberapa pemeriksaan dan pengujian dilakukan pada permukaan pipa untuk memperoleh data lengkap untuk analisa. Pemeriksaan pada pipa *baffle* dari *heat exchanger* menggunakan metode pengamatan visual, fraktografi, struktur mikro, uji kekerasan, analisa komposisi kimia, pemeriksaan SEM (*scanning electron microscopy*), serta uji komposisi produk korosi dengan EDS (*energy dispersive analyze X-ray*). Hasil pengamatan secara visual memperlihatkan adanya penipisan dinding akibat serangan erosi dan kehadiran produk korosi pada permukaan luar pipa *baffle*. Sebagai tambahan, dari analisa produk korosi juga mengkonfirmasi bahwa produk korosi mengandung ion agresif/ion korosif seperti ion Sulfur (S^{2-}). Erosi muncul diindikasikan adanya semburan uap dari pipa lainnya yang mengalami bocor di *steam drum*. Dengan kehadiran partikel keras (*hard particle*) seperti partikel keras pada debu bahan bakar di aliran turbulensi semburan maka dapat mempercepat proses mekanisme erosi. Setelah proses erosi, permukaan dinding luar pipa *baffle* terbuka lalu bereaksi dengan lingkungan korosif yaitu ion Sulfur (S^{2-}) dari debu bahan bakar sehingga terjadilah fenomena korosi. Jadi, dapat disimpulkan bahwa penyebab kerusakan adalah kombinasi antara serangan erosi dan proses korosi yang muncul di permukaan luar pipa *baffle* pada *heat exchanger*.

Kata Kunci : *Heat Exchanger, Pipa baffle, Erosi, Korosi*

Abstract

FAILURE ANALYSIS OF BAFFLE TUBE ON HEAT EXCHANGER SYSTEM IN HEAT TRANSFER PROCESS. This paper discussed about combination between erosion attack and corrosion process as a factor cause of baffle tube leaking in heat exchanger system and given some solution to prevent similar case in future. Heat exchangers transfer heat from a hot fluid to a colder fluid through the combined mechanisms of conduction and forced convection. When the heat exchanger fail, all of the processing system could be affected. In this research the failed baffle tubes of heat exchanger were investigated by failure analysis methods to find the caused of the failure. Several examinations were carried out to the baffle tubes to obtain detailed data for analysis. Examinations are carried out such as visual and fractography, microstructure, hardness testing, chemical composition analysis of baffle tube material, SEM and EDS. Visual examination shows wall thinning which caused by erosion attack and corrosion product at outside surfaces of baffle tube. Additional data obtained from EDS analysis confirm aggressive / corrosive ion such as Sulphur ion (ion S^{2-}) which spreaded around pipe surface investigated. Erosion attack is caused by steam burst from another pipe which have experienced leaking at steam drum. So, it can be concluded that the cause of failure are combination between erosion attack and corrosion process on the outside surfaces of baffle tube.

Keywords : *Heat exchanger, Tube baffle, Erosion, Corrosion*

PENDAHULUAN

Pipa *baffle* adalah nama sebutan pipa dari *heat exchanger* yang letaknya dekat dengan *baffle*. Sedangkan *baffle* adalah pengatur arah aliran fluida dapat juga berarti sebagai kisi atau panel penghalang yang digunakan pada beberapa tangki proses industri, seperti antara *shell* dan *tube* pada *heat exchanger*, reaktor kimia, dan *static mixer*^[1]. *Baffle* merupakan bagian yang terintegrasi antara *shell* dengan *tube* dari disain *heat exchanger*^[2]. Peranan utama *baffle* pada *heat exchanger* antara lain sebagai pemegang sejumlah pipa agar tetap pada posisinya (atau untuk mencegah kelonggaran) baik pipa dalam proses operasi maupun proses produksi. Selain itu, *baffle* berfungsi untuk mencegah terjadinya efek dari getaran yang diakibatkan kecepatan aliran dan dimensi dari *heat exchanger*. Dengan adanya *baffle* pada pipa menyebabkan fluida mengalir secara langsung di sepanjang sisi pipa. Hal ini bersifat menguntungkan karena dapat meningkatkan kecepatan aliran dan keefektifan dari koefisien transfer panas suatu *heat exchanger*^[2].

Umumnya pipa untuk *heat exchanger* menggunakan material ASTM A 192 dan selama pipa *baffle* beroperasi biasanya terkena beban mekanis berupa getaran dan fluktuasi temperatur secara berulang^[3-4].

Pada suatu sistem transfer panas telah ditemukan adanya kerusakan pada salah satu pipa dari *heat exchanger*. Setelah diperiksa ternyata pipa tersebut mengalami kerusakan dan berlubang pada posisi *baffle*. Pipa tersebut kemudian diteliti dan dianalisa di laboratorium analisa kerusakan untuk dicari penyebab kerusakan yang telah terjadi pada pipa *baffle* tersebut.

Tujuan penelitian dan analisis kerusakan yang dilakukan adalah untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan pipa *baffle* sehingga dapat dilakukan langkah langkah penanggulangan, dan untuk mencegah terjadinya pengulangan kerusakan yang sejenis yang mungkin

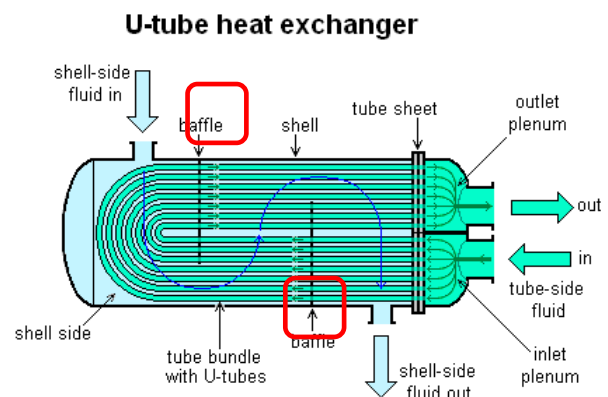
terjadi.

PROSEDUR PERCOBAAN

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan 1 sampel uji di 2 lokasi berbeda yaitu pipa di posisi *baffle* yang mengalami kerusakan dan berlubang di permukaan diameter luarnya. Pipa *baffle* tersebut berada pada sistem *heat exchanger* suatu proses transfer panas.

Posisi pipa *baffle* pada *heat exchanger* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Gambaran posisi pipa *baffle* yang rusak dan bocor pada *heat exchanger*^[2]

Kondisi kerusakan pipa *baffle* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Gambar pipa *baffle* yang rusak pada *heat exchanger* memperlihatkan adanya lubang akibat serangan korosi-erosi

Spesifikasi Material dan Kondisi Operasi Pipa *Baffle*

Dari informasi yang diperoleh, spesifikasi material pipa *baffle*, data operasional, serta kondisi operasi dari *heat exchanger* tempat

pipa *baffle* yang diteliti secara rinci ditampilkan pada Tabel 1.

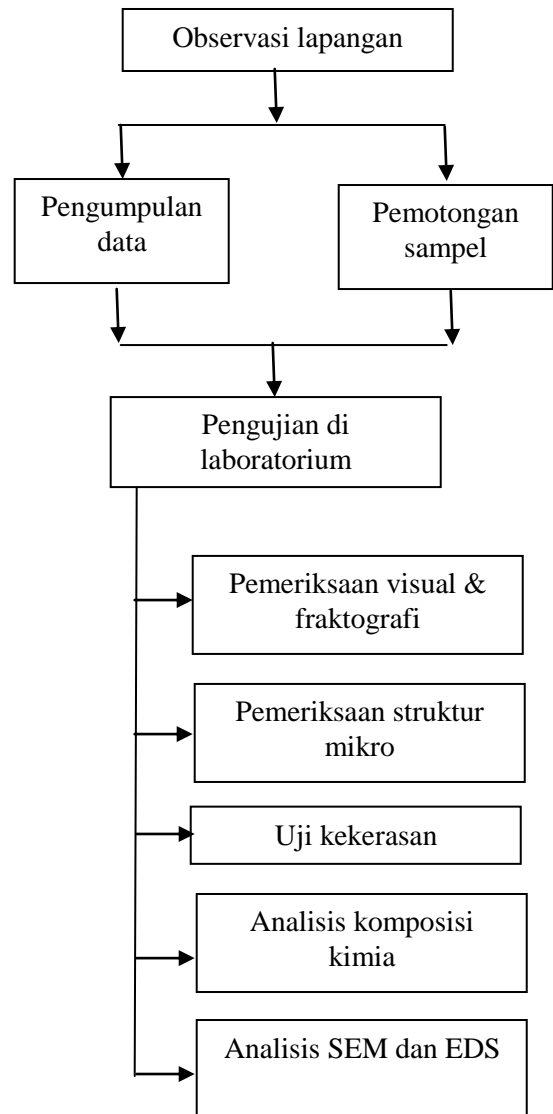
Tabel 1. Data spesifikasi material dan kondisi operasi pipa *baffle*

Jenis Pipa	<i>Pipa baffle</i>
Lokasi Pipa	Heat exchanger
Material Pipa <i>Baffle</i>	ASTM A 192
Tebal Pipa (Mm)	4
Diameter Pipa (Mm)	76,2
Tekanan Steam (Kg/Cm ²)	64,5
Tekanan Disain, (Kg/Cm ²)	74
Temp. Steam Di Outlet Superheater (°C)	470
Temp. Feed Water (°C)	138
Flow Feed Water, (Ton/Jam)	125
Flow Steam (Ton/Jam)	125

Pengujian

Sesuai dengan yang telah ditentukan, setelah dilakukan proses pemotongan pada pipa *baffle* yang mengalami kerusakan kemudian dilanjutkan ke tahapan pengujian. Serangkaian metode pengujian dan pemeriksaan terhadap pipa di posisi *baffle* secara jelas dapat dilihat dengan diagram alir pada Gambar 3.

Pengujian yang dilakukan meliputi: pengamatan permukaan, pemeriksaan visual bersamaan dengan pemeriksaan fraktografi pada daerah yang berlubang, pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Kemudian dilakukan pengujian kekerasan menggunakan metode *macro hardness vickers*.



Gambar 3. Diagram alir pemeriksaan dan pengujian terhadap pipa *baffle* yang mengalami kerusakan dan kebocoran

Analisa komposisi kimia material dasar pipa *baffle* diuji menggunakan alat *optical emission spectrometer*, sedangkan permukaan daerah yang mengalami kerusakan diamati menggunakan alat *scanning electron microscopy* (SEM) dan analisis komposisi produk korosi pada permukaan luar pipa *baffle* dengan metode *energy dispersive spectroscopy* (EDS).

Pemeriksaan visual dilakukan untuk mengidentifikasi lokasi kerusakan, bentuk kerusakan, dan untuk menentukan daerah awal penyebab kerusakan dan kebocoran material pipa *baffle*. Metode ini dilakukan dengan memeriksa kondisi dan kontur

daerah yang berlubang secara akurat lalu didokumentasikan dengan kamera digital. Bersamaan dengan pemeriksaan visual, juga dilakukan pemeriksaan fraktografi menggunakan mikroskop stereo. Tujuan pemeriksaan yaitu untuk mengidentifikasi awal kerusakan di permukaan daerah yang berlubang dan rusak lalu diekspos pada perbesaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan pemeriksaan visual.

Pemeriksaan metalografi dilakukan untuk memeriksa kemungkinan adanya *void* mikro, retak mikro, ataupun cacat mikro lainnya yang mungkin ada dan berpengaruh sebagai penyebab kerusakan dan kebocoran pipa saat proses dilakukan.

Pengujian kekerasan terhadap pipa *baffle* dilakukan di sekeliling daerah rusak untuk mengetahui kemungkinan terjadinya perubahan nilai kekerasan yang menyebabkan terjadinya rusak ataupun bocor pada pipa. Metode yang digunakan yaitu metode indentasi *macro hardness vickers* dengan beban 5 kgf yang mengacu pada ASTM E 92.

Pemeriksaan komposisi kimia dengan OES dilakukan untuk konfirmasi kesesuaian komposisi kimia material dasar pipa *baffle* terhadap standard material pipa pada ASTM A 192. Selain itu, pengujian juga dilakukan untuk evaluasi kemungkinan terjadinya degradasi material. Pemeriksaan komposisi kimia mengacu pada standard ASTM E 415-99a tahun 2008.

Analisis SEM dilakukan pada permukaan diameter luar pipa yang rusak dan berlubang untuk memeriksa bentuk lubang yang mengakibatkan bocor lebih detail lagi dan menemukan bukti lain yang mungkin ada yang berperan sebagai awal kerusakan.

Analisa produk korosi menggunakan metode EDS (*energy dispersive spectroscopy*) untuk memeriksa adanya ion agresif/ion korosif yang mungkin berperan pada kerusakan selanjutnya.

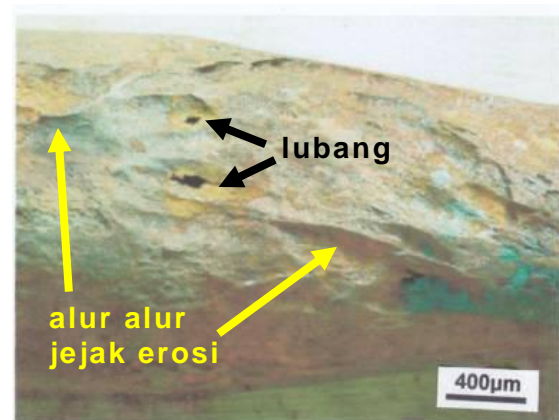
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemeriksaan Visual dan Fraktografi

Pemeriksaan secara visual dan fraktografi pada permukaan pipa *heat exchanger* di posisi *baffle* menunjukkan kerusakan berupa lubang yang mengakibatkan pipa bocor, seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dengan tanda bidang segi empat.



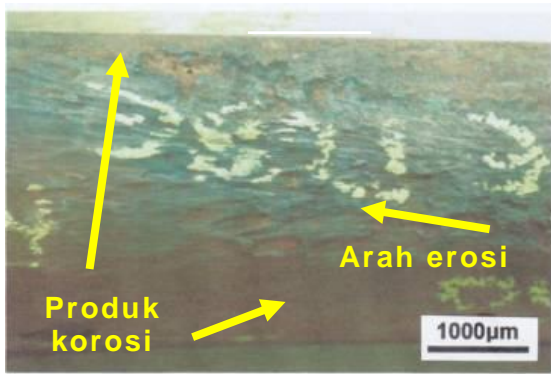
Gambar 4. Permukaan pipa *baffle* menunjukkan adanya lubang



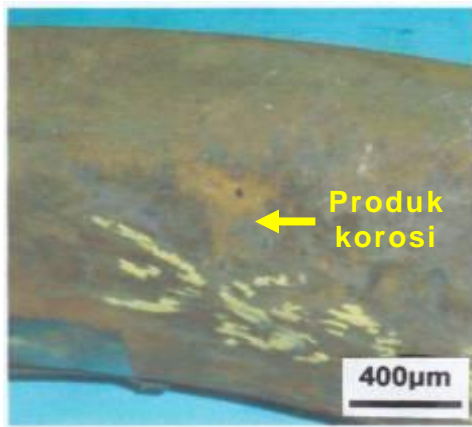
Gambar 5. Lubang dan jejak erosi pada pipa *baffle* di lokasi 1



Gambar 6. Jejak erosi pada permukaan pipa *baffle* pada lokasi 1



Gambar 7. Produk korosi dan arah alur erosi pada permukaan pipa *baffle* pada lokasi 2



Gambar 8. Foto permukaan pipa *baffle* pada lokasi 2

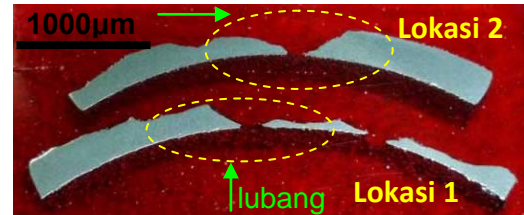
Selain itu, pada permukaan luar pipa *baffle* di lokasi pemeriksaan 1 terdapat jejak proses erosi yang pernah berlangsung di daerah tersebut, ditunjukkan dengan adanya alur alur dengan sudut tajam dan permukaan yang terkikis ke arah memanjang sesuai dengan aliran fluida (Gambar 5, 6 dan 7).

Selain jejak erosi, pada permukaan pipa juga ditemukan bukti serangan korosi berupa produk korosi berwarna coklat yang merata hampir diseluruh permukaan pipa di sekitar lubang (Gambar 7 dan 8).

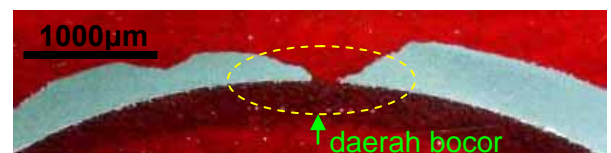
Dari pengamatan pada penampang melintang permukaan di bagian yang terkikis paling dalam menunjukkan adanya penipisan yang cukup signifikan pada bagian disekitar lubang dari diameter luar (OD) menuju diameter dalam (ID). Penipisan tersebut nampak jelas terjadi

akibat erosi dari permukaan diameter luar seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

Tebal pipa *baffle* menipis hingga mencapai ketebalan akhir sekitar 2 ~ 2,5 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Penampang melintang pipa *baffle* yang bocor (lokasi 1 dan lokasi 2)



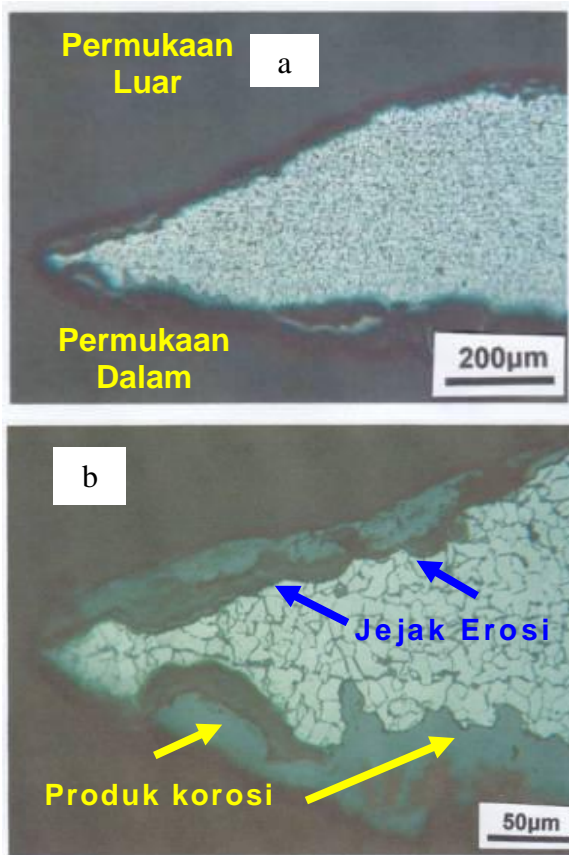
Gambar 10. Penampang melintang pipa *baffle* pada lokasi 2 terlihat adanya penipisan dari bagian luar

Pemeriksaan Struktur Mikro

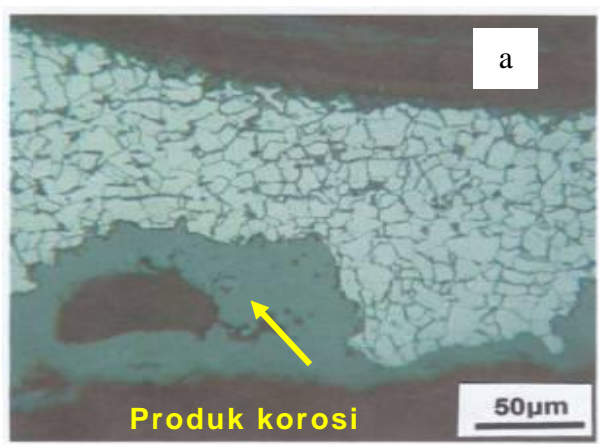
Pemeriksaan struktur mikro dilakukan terhadap penampang melintang *pipa baffle* pada daerah sekitar lubang (lokasi 1 dan 2). Secara umum struktur mikro dari pipa *baffle* terdiri dari campuran fasa ferit (terang) dan perlit (gelap) seperti ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12. Dari kedua gambar tersebut tidak ditemukan adanya bukti terjadinya pertumbuhan butir, spheroidisasi perlit, ataupun cacat mikro lainnya. Pada pemeriksaan struktur mikro di bagian sekitar lubang pada lokasi 1 terlihat jelas adanya jejak erosi ditandai dengan terpotongnya butir akibat pengikisan dari permukaan diameter luar pipa (Gambar 11(b) dan 12(b)), selain itu juga terlihat adanya produk korosi yang menutupi permukaan pipa (Gambar 11(a) dan 12 (a)). Hal ini menunjukkan bahwa pada permukaan luar pipa pernah terjadi mekanisme penipisan erosi dan korosi.

Gejala penipisan dan korosi juga ditemukan di lokasi 2 permukaan luar pipa *baffle* terbukti dengan adanya jejak erosi

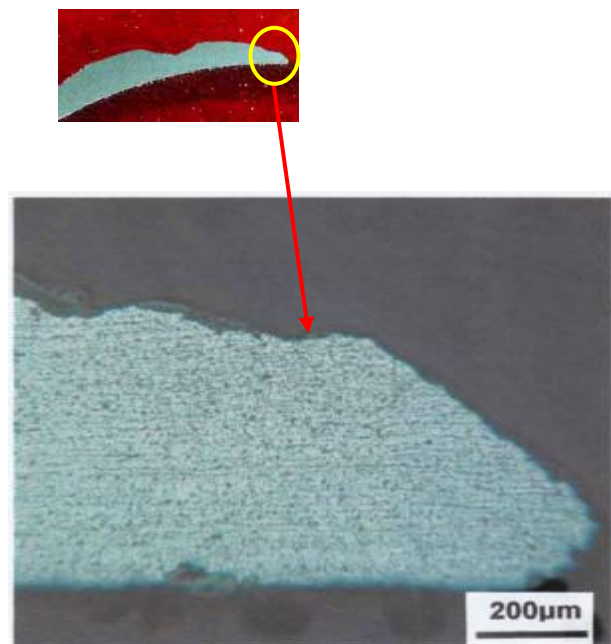
dan produk korosi yang terdapat pada permukaan luar dari gambar struktur mikro yang di tampilkan pada Gambar 13(a) dan (b).



Gambar 11. Mikrostruktur pipa *baffle* di daerah dekat lubang di lokasi 1. Terlihat adanya produk korosi dan butir yang terpotong. Etsa Nital 2%



Gambar 12. Perbesaran penampang melintang pipa *baffle* (di lokasi 2). Etsa Nital 2%



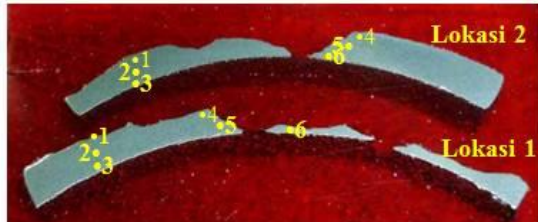
Gambar 13.a. Struktur mikro penampang melintang pipa *baffle* pada lokasi 2. Etsa Nital 2%



Gambar 13. (a) Struktur mikro penampang melintang pipa *baffle* pada lokasi 2. (b) Perbesaran dari (a), terlihat adanya butir yang terpotong akibat erosi. Etsa Nital 2%

Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dari pipa *baffle* dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat kekerasannya. Pengujian kekerasan menggunakan *macro hardness vickers* dengan beban 5 kgf.



Gambar 14. Lokasi titik uji kekerasan pipa *baffle*

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan pipa *baffle* di lokasi 1 dan lokasi 2

No.	Kekerasan (VHN) (Lokasi 1)	Kekerasan (VHN) (Lokasi 2)
1	148	169
2	159	167
3	154	160
4	155	161
5	152	153
6	150	161
Rata-rata (VHN)	153	161

Dari hasil pengujian kekerasan pada kedua lokasi menunjukkan bahwa rata-rata nilai kekerasan potongan melintang material pipa *baffle* di lokasi 1 dan lokasi 2 masing-masing sebesar 153 VHN dan 161 VHN yang dapat dilihat pada Tabel 2. Kekerasan kedua pipa tersebut mendekati nilai kekerasan standard ASTM A 192 yaitu maksimal 144 VHN^[3-4].

Analisis Komposisi Kimia

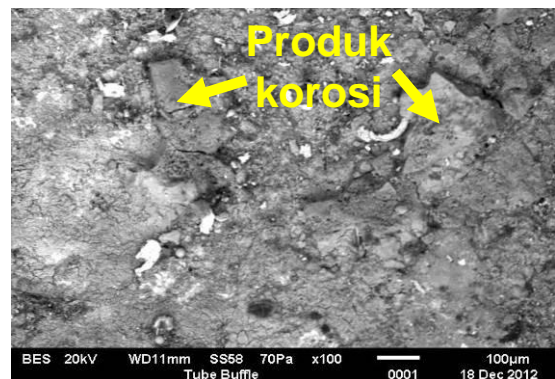
Dari analisis komposisi kimia material pipa *baffle* dapat dilihat di Tabel 3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material pipa *baffle* sesuai dengan material standard ASTM A 192^[3-4].

Tabel 3. Komposisi kimia material uji pipa *baffle*

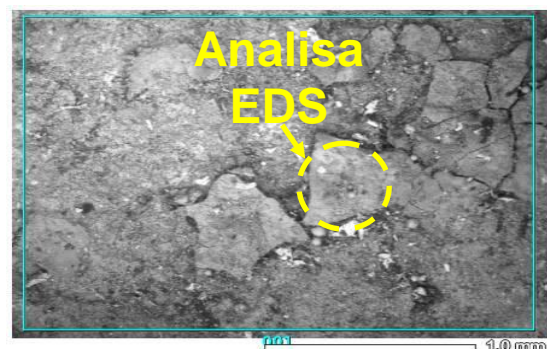
Pipa <i>Baffle</i>		Standard ASTM A 192 ^[4]	
Unsur	%berat	Unsur	% berat
C	0,14	C	0,06-0,18
Si	0,20	Si	0,25 maks.
Mn	0,48	Mn	0,27-0,63
S	0,025	S	0,035 maks.
P	0,023	P	0,035 maks.

Analisis SEM dan EDS

Hasil pemeriksaan dengan SEM dan EDS pada permukaan luar pipa di posisi *baffle* yang bocor dapat dilihat pada Gambar 15 dan Tabel 4. Dari hasil analisis SEM menunjukkan bahwa di permukaan luar pipa *baffle* terdapat produk korosi. Pemeriksaan pada pipa *baffle* disekitar lubang terdeteksi unsur-unsur seperti karbon (C), silikon (Si), unsur korosif/agresif seperti sulfur (S), serta kalsium (Ca) yang diindikasikan dari fluida yang mengalir di luar pipa.



Gambar 15. Foto hasil SEM permukaan luar pipa *baffle* menunjukkan bukti adanya produk korosi



Gambar 16. Lokasi titik pemeriksaan dengan EDS

Tabel 4. Komposisi produk korosi dipermukaan luar pipa *baffle* mengacu pada Gambar 16

Unsur	% berat	Unsur	% berat
C	42,10	Ca	0,38
O	35,87	Cr	0,16
Al	1,04	Fe	19,33
Si	0,76		
S	0,37		

Dari data pemeriksaan pada material pipa membuktikan bahwa material yang digunakan pada pipa *baffle* adalah baja karbon rendah yang mempunyai mikrostruktur ferit dan perlit, dan mempunyai komposisi kimia yang sesuai dengan spesifikasi standar yang di gunakan yaitu ASTM A192^[1-3] jadi kerusakan bukan disebabkan oleh kesalahan material. Selain itu, dari seluruh hasil pemeriksaan pada pipa *baffle* tidak ditemukan adanya kerusakan karena indikasi *overheating* seperti pertumbuhan butir, dekarburisasi, atau spheroidisasi perlit.

Dari hasil pengujian kekerasan terhadap material pipa *baffle* di lokasi 1 dan lokasi 2 masing-masing berkisar antara 148 VHN s/d 159 VHN dan 153 VHN s/d 169 VHN. Hasil uji kekerasan pada kedua lokasi tersebut menunjukkan bahwa nilai kekerasan material pada pipa *baffle* yang diteliti masih mendekati spesifikasi standar ASTM A 192 yaitu maksimal 144 VHN^[4]. Jadi tidak mengalami banyak perubahan akibat pengaruh panas ketika beroperasi. Fakta yang diperoleh dari hasil uji kekerasan ini menunjukkan bahwa kerusakan bukan diakibatkan oleh perubahan nilai kekerasan material pipa.

Hasil pemeriksaan visual dan makrografi menunjukkan adanya jejak erosi dengan arah yang sama pada permukaan serta terjadi penipisan dinding di permukaan luar pipa *baffle* (Gambar 5-7). Bukti ini diperkuat dengan hasil pemeriksaan pada penampang melintang di daerah sekitar lubang yang menunjukkan penipisan dari luar tersebut (Gambar 9 dan 10). Selain itu bukti adanya erosi juga

diperoleh dari pemeriksaan struktur mikro dengan adanya butir-butir yang terpotong akibat pengikisan secara mekanis^[5] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11(b), 12(b) dan 13(b). Hal ini dapat disimpulkan bahwa telah terjadi erosi selama pipa tersebut beroperasi.

Dari hasil seluruh pemeriksaan juga ditemukan bukti-bukti telah terjadi mekanisme korosi pada daerah sekitar lubang. Bukti-bukti tersebut dapat dilihat pada hasil pemeriksaan visual dan makrografi dengan ditemukannya lapisan berwarna coklat (Gambar 7 dan 8). Bukti produk korosi juga dapat dilihat dari hasil pemeriksaan metalografi (Gambar 11(b), 12(a), 12(b), dan 13(b)), pemeriksaan SEM (Gambar 15) serta hasil pemeriksaan EDS (Tabel 4) dengan bukti adanya unsur korosif/agresif seperti unsur sulfur (ion S²⁻) sebesar 0,37 wt %.

Hasil pemeriksaan EDS juga menunjukkan adanya kandungan elemen karbon (C) sebesar 42,10 % pada produk korosi. Unsur karbon yang cukup tinggi tersebut diindikasikan berasal dari fluida yang mengalir di luar pipa. Dengan bukti tersebut dapat disimpulkan bahwa fluida yang mengalir di luar pipa *baffle* berpotensi membawa partikel keras yang dapat mengikis permukaan pipa. Karena pipa *baffle* letaknya dekat dengan *baffle* dimana terjadi perubahan aliran fluida, dan kemungkinan terjadi juga turbulensi, maka proses pengikisan atau erosi lebih besar dibanding di lokasi lain.

Setelah proses erosi, permukaan dinding luar pipa *baffle* terbuka lalu bereaksi dengan lingkungan korosif (ion sulfur (S²⁻)) dari fluida yang mengalir di luar pipa sehingga terjadilah fenomena korosi^[6]. Dari bukti-bukti tersebut dapat disimpulkan bahwa kerusakan yang terjadi pada pipa *baffle* dalam penelitian ini disebabkan karena adanya perpaduan antara serangan erosi dengan proses korosi dimana proses erosi lebih dominan dibuktikan dengan ditemukannya jejak erosi yang cukup dalam sedangkan jenis korosi yang terjadi adalah *general*

corrosion yang proses menyerangnya secara merata^[7-8]. Proses erosi-korosi tersebut terjadi karena kombinasi antara abrasi mekanis akibat pergerakan fluida yang mengandung partikel keras dan reaksi korosi. Kecepatan fluida dan kecepatan korosi memiliki hubungan yang berbanding lurus. Apabila kecepatan fluida meningkat maka kecepatan dari proses korosi akan semakin bertambah pula^[9-10]. Sehingga penipisan pipa berlangsung lebih cepat dan akhirnya berlubang dan bocor.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian, analisis, dan pembahasan terhadap pipa *baffle* yang diteliti maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Karakteristik material dari pipa *baffle* sesuai dengan standard material ASTM A 192, sehingga kerusakan bukan disebabkan oleh kesalahan material.
2. Kerusakan pipa *baffle* diakibatkan oleh kombinasi serangan erosi dari abrasi mekanis akibat pergerakan fluida di luar pipa yang mengandung partikel keras dengan proses korosi dari unsur korosif seperti sulfur (S) yang berasal dari fluida yang mengalir di luar pipa selama sistem *heat exchanger* beroperasi.

SARAN

Untuk menghindari terjadinya serangan erosi dan korosi pada pipa *baffle* selanjutnya, maka perlu dilakukan tindakan pencegahan antara lain :

1. Memeriksa secara periodik kondisi permukaan luar pipa secara visual saat *shut down*.
2. Melakukan *mechanical cleaning* pada permukaan luar pipa *baffle* agar terbebas dari produk korosi dan kerak (*scale*).
3. Memeriksa kandungan fluida sesuai dengan spesifikasi serta mengontrol aliran fluida jangan sampai terjadi turbulensi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] “Heat Exchanger”. (<http://rotunds.com/Heat%20Exchanger.html>, diakses 3 Juni 2013)
- [2] “*Baffle* (Heat Transfer)”. ([http://en.wikipedia.org/wiki/Baffle_\(heat_transfer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Baffle_(heat_transfer)), diakses tanggal 3 Juni 2013)
- [3] ASM Handbook Committee. 2002. *Properties and selection*, vol 1, Ninth Edition, Metal Handbook of ASM, Ohio : American Society for Metals.
- [4] ASTM standards, ASTM A 192 : *Seamless Carbon Steel Boiler Tubes for High Pressure Service*, vol.01.01, Steel-piping, tubing, fittings, ASTM.
- [5] Callister, William D Jr. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York : John Wiley and Sons Inc. p. 179.
- [6] Mc Namara, J.F., O.Sullivan, and Richard A. 1991., “Durability and Failure in Engineering Materials”. *Proceeding of the 5th Irish Fracture Conference*.
- [7] Thielsch and Helmut. *Defect and Failures in Pressure Vessels and Piping*, Florida : Robert Krieger Publishing Company, p.398-406.
- [8] French, David N. *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, John Wiley & Sons, p.197-203
- [9] Fontana, Mars G. 1986. *Corrosion Engineering*, McGraw Hill Book Company : 3rd Edition
- [10] ASM Handbook Committee. 2002. *Failure Analysis and Prevention*, vol 11, Ninth Edition, Metal Handbook of ASM, Ohio : American Society for Metals.

