

ANALISA KERUSAKAN PIPA EKSPAN PADA KETEL UAP UNIT PENGOLAHAN MINYAK BUMI

Eka Febriyanti

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) – BPPT

Kawasan Puspitek Serpong Tangerang 15314

E - mail : eka.ndut@yahoo.com

Masuk tanggal : 04-07-2012, revisi tanggal : 05-11-2012, diterima untuk diterbitkan tanggal : 19-11-2012

Intisari

ANALISA KERUSAKAN PIPA EKSPAN PADA KETEL UAP UNIT PENGOLAHAN MINYAK BUMI. Tulisan ini membahas tentang kombinasi antara serangan lelah dan korosi sebagai faktor penyebab kebocoran pipa ekspansi dari ketel uap dan memberi solusi pencegahan pada kasus yang sama pada masa yang akan datang. Pemeriksaan pada pipa radiant section dari ketel uap menggunakan metode pengamatan visual, fraktografi, struktur mikro, uji kekerasan, analisa komposisi kimia, pemeriksaan SEM (*scanning electron microscope*), serta uji komposisi produk korosi dengan EDS (*energy dispersive spectroscopy*). Hasil metalografi memperlihatkan retak transgranular merambat dari diameter luar ke permukaan dalam. Analisa produk korosi dengan EDS juga mengkonfirmasi bahwa produk korosi berupa besi oksida terdapat pada permukaan luar pipa ekspansi yang diteliti. Korosi terjadi karena proses pembakaran yang tidak sempurna dalam sistem ketel uap, sementara kelelahan pada material pipa (*fatigue*) muncul akibat perpaduan antara siklus beban (*vibration load*) dan dinamika temperatur. Sehingga disimpulkan bahwa penyebab kerusakan adalah kombinasi antara serangan *fatigue* dan proses korosi yang muncul pada diameter luar pipa ekspansi dari ketel uap.

Kata kunci : Ketel uap, Pipa ekspansi, Retak, Lelah, Korosi

Abstract

FAILURE ANALYSIS OF TUBE EXPAND IN OIL PROCESSING UNIT BOILER SYSTEM. This paper discussed about combinations between fatigue and corrosion as a factor that cause expand tube leaking of boiler, and give solution to prevent similar case in future. Examinations are carried out such as visual and macrography, metallography, hardness testing, chemical composition analysis, SEM (*scanning electron microscope*) and EDS (*energy dispersive spectroscopy*). Microstructure examination shows transgranular cracks propagated from outside into inside diameter. Additional data obtained from EDS analysis confirm the presence of iron oxide as a corrosion product on the surface of expand tube. Corrosion was occurred due to imperfect firing process on boiler system, while fatigue failure was initiated by cyclic of loading and temperature. This study concluded that the failure occurred due to fatigue failure and corrosion on the expand pipe of boiler system.

Keywords : Boiler, Tube expand, Crack, Fatigue, Corrosion

PENDAHULUAN

Pada unit pengolahan minyak, peran ketel uap (*boiler*) sangat penting dalam rangkaian proses produksi. Kerusakan yang terjadi pada ketel uap dapat menyebabkan seluruh rangkaian produksi terhenti, akibatnya kerugian yang diderita akan cukup besar.

Salah satu komponen pipa dari ketel uap (*boiler*) mengalami indikasi rusak dan bocor di area *radiant section* pada posisi

ekspansi. Kemudian pipa-pipa tersebut diteliti dan dianalisa di laboratorium analisa kerusakan untuk dicari penyebab kerusakan yang telah terjadi pada pipa radiant section tersebut.

Pipa *radiant section* pada posisi ekspansi merupakan bagian dari sistem ketel uap yang digunakan untuk transportasi cairan minyak bumi. Pada umumnya selama pengoperasian pipa ekspansi terkena beban mekanis berupa

vibrasi secara berulang dan temperatur thermal.

Umumnya pipa *radiant section* untuk ketel uap (*boiler*) menggunakan material ASTM A 192 [1-2]. Komposisi kimia dan sifat mekanik material pipa radiant section sesuai standar ASTM A 192 ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Komposisi kimia material standard ASTM A 192^[1-3]

Unsur	% berat (wt %)
C	0,06-0,18
Mn	0,27-0,63
P	Max. 0,035
S	Max. 0,035
Si	Max. 0,25

Tabel 2. Kekuatan tarik material standard ASTM A 192^[1-3]

Tensile strength, min. [MPa]	325
Yield strength, min. [MPa]	180
Elongation in 2 in. Atau 50 mm, min.	35
Kekerasan (Hardness Number-HB)	Maks. 37

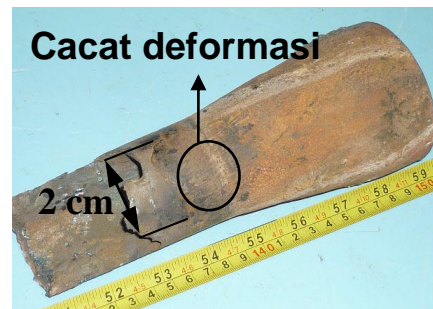
Tujuan penelitian masalah kegagalan pipa radiant section antara lain yaitu :

- Mengidentifikasi penyebab kerusakan dan kebocoran pipa radiant section sehingga dapat dilakukan langkah-langkah penanggulangan selanjutnya untuk mencegah terjadinya pengulangan kerusakan yang sejenis.
- Membandingkan karakteristik material pipa radiant section di posisi ekspand yang diperiksa di laboratorium uji dengan spesifikasi standard material yang diinginkan.

METODOLOGI PENELITIAN

1. Bahan dan Metode

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah adalah pipa *radiant section* di posisi ekspand yang mengalami kerusakan dan kebocoran. Posisi yang diambil untuk penelitian ada 2 yaitu no.65 (Gambar 1) dan no.66 (Gambar 2).



Gambar 1. Pipa No.65 yang mengalami retak sepanjang 2 cm dan cacat deformasi akibat beban tarik-ekspand



Gambar 2. Pipa No. 66 yang mengalami retak

Spesifikasi, data dan kondisi operasi pipa radiant section ditunjukkan pada Tabel 3 - 5.

Tabel 3. Spesifikasi material pipa uji

Jenis Pipa	<i>Furnace Pipe</i>
Lokasi Pipa	<i>Radiant Section</i>
Material Pipa Ekspand	ASTM A 192
Tebal Pipa, [mm]	4

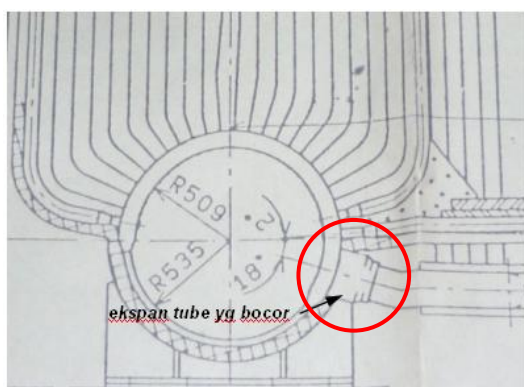
Tabel 4. Data operasional material pipa uji

Tekanan steam, [kg/cm ²]	64,5
Tekanan desain, [bar]	77
Temp. Steam di outlet superheater, [°C]	470

Tabel 5. Kondisi operasi ketel uap

Flow feed water, [ton/jam]	125
Flow steam, [ton/jam]	125

Gambar 3 menunjukkan posisi pipa radiant section yang mengalami kerusakan.



Gambar 3. Gambar skema pipa radiant section di posisi ekspand yang mengalami kerusakan dan kebocoran

2. Pengujian

Setelah dilakukan proses pemotongan pada pipa radiant section di posisi ekspand yang mengalami kerusakan dilanjutkan ke tahapan selanjutnya yaitu pengujian.

Pengujian yang dilakukan meliputi pemeriksaan visual pada daerah yang retak, pemeriksaan makrografi, pemeriksaan struktur mikro, pengujian kekerasan, analisis komposisi kimia material pipa, pemeriksaan dengan scanning electron microscopy (SEM), serta uji komposisi produk korosi dengan metode energy dispersive spectroscopy (EDS).

Pemeriksaan visual dilakukan untuk mengidentifikasi lokasi kerusakan, bentuk kerusakan, dan untuk menentukan daerah

awal penyebab rusak yang nantinya dipilih untuk pemeriksaan lebih mendalam. Metode ini dilakukan dengan memeriksa kondisi dan kontur daerah yang rusak secara akurat lalu didokumentasikan dengan kamera digital.

Bersamaan dengan pemeriksaan visual, pemeriksaan makrografi menggunakan mikroskop stereo untuk mengidentifikasi awal kerusakan di permukaan daerah bocor atau retak sehingga area tersebut dapat diekspos pada perbesaran yang lebih tinggi dibandingkan pemeriksaan visual, sehingga informasi lebih jelas dapat diperoleh dari hasil pemeriksaan makrografi. Pemeriksaan makrografi dilakukan dengan perbesaran 12 x. Pemeriksaan makrografi mengacu pada standard ASTM E 340-00.

Pemeriksaan metalografi menggunakan mikroskop optik dilakukan untuk memeriksa awal rusak lebih detail dan sekeliling daerah rusak yang berhubungan dengan struktur mikro dan perubahannya selama proses pengoperasian. Sebagai tambahan, pemeriksaan metalografi dilakukan untuk memeriksa kemungkinan adanya microvoid, retak mikro, ataupun cacat mikro lainnya yang mungkin ada dan berpengaruh sebagai penyebab kerusakan dan kebocoran pipa. Hasilnya lalu didokumentasikan dengan kamera digital. Persiapan benda uji metalografi mengacu pada standard ASTM E 3-01 yang meliputi beberapa tahapan antara lain :

1. Pemotongan benda uji metalografi berupa material tube no.65 dan tube no.66 menggunakan gerinda tangan makita
2. Proses pembentukan/pencetakan sampel uji menggunakan bubuk technovit atau acryfix yang dicampur dengan cairan pengeras dengan perbandingan tertentu, dimana campuran cairan tersebut menjadi keras perlu waktu ± 1 jam.
3. Proses grinding / pengampelasan menggunakan mesin grinding tangan Struers dan kertas ampelas silicon karbida (SiC) dengan berbagai kekasaran, yaitu kombinasi dari 80,120,

220, 360, 500, 600, 800, 1000, dan 1200 mesh.

4. Proses pencucian menggunakan alkohol 95 % kemudian dikeringkan dengan peralatan pengering (*hair dryer*).
5. Proses polishing/pemolesan sampel uji pipa memanfaatkan diamond bentuk pasta.
6. Selanjutnya dilakukan proses mikroetsa sampel uji pipa yang mengacu pada standard ASTM E 407-01 dimana larutan yang digunakan adalah Nital 2%.

Pengujian kekerasan dari pipa *radiant section* dilakukan di sekeliling daerah rusak untuk mengetahui kemungkinan terjadinya perubahan nilai kekerasan yang mungkin menyebabkan rusak ataupun untuk menemukan adanya bukti *work hardening* akibat deformasi. Metode yang digunakan yaitu metode indentasi *vickers microhardness* mengacu pada ASTM E 92. Beban yang digunakan adalah 5 kgf dengan menggunakan indentor intan. Metode Vickers menggunakan alat yang disebut *vickers microhardness* tester kemudian hasil yang didapat diukur dengan mikroskop dan dihitung dengan menggunakan tabel nilai kekerasan Vickers Hardness Number (VHN).

Analisis komposisi kimia terhadap pipa *radiant section* menggunakan alat *optical emission spectrometry (OES)*. Pemeriksaan dilakukan untuk membandingkan komposisi kimia material dasar terhadap material standard pipa yaitu ASTM A 192. Selain itu, pengujian juga digunakan untuk mengevaluasi terjadinya kemungkinan degradasi material. Pemeriksaan komposisi kimia mengacu pada standard ASTM E 415-99a.

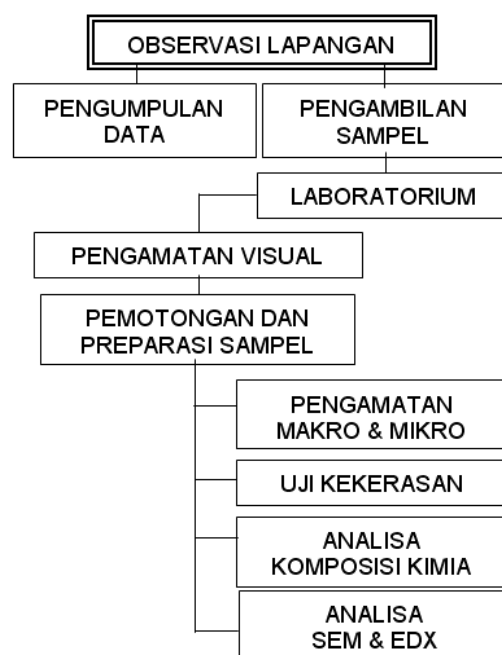
Preparasi terhadap sampel uji komposisi kimia pada material pipa dengan cara melakukan grinding dan mengamplas dengan kekasaran 40 CCW.

Analisis SEM dilakukan pada permukaan daerah rusak untuk memeriksa bentuk kebocoran lebih detail lagi dan untuk menemukan bukti lain yang

mungkin ada dan berperan pada awal kerusakan.

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

Metode pengujian dan pemeriksaan terhadap pipa *radiant section* di posisi ekspand secara jelas dapat dilihat pada diagram alir yang ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Flowsheet (lembar alir) pemeriksaan dan pengujian terhadap pipa ekspand yang mengalami kerusakan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemeriksaan Visual dan Makrografi

Pemeriksaan secara visual dan makrografi pada permukaan pipa ketel uap *radiant section* di posisi ekspand no. 65 memperlihatkan adanya retak sepanjang 2 cm (Gambar 5).

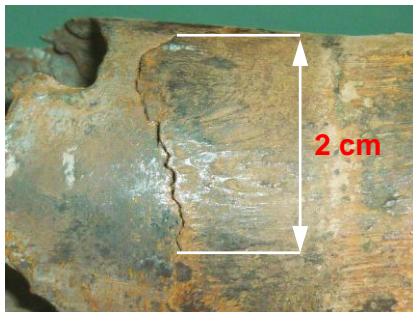
Retak yang terjadi dalam bentuk *circumferential* (melingkar) tersebut diindikasikan akibat beban tarik - *ekspand* ketika proses *plugging* (Gambar 6). Pada

permukaan patahan pipa tersebut dapat dilihat bahwa alur patah diawali dari diameter luar (Gambar 7).

Pemeriksaan visual dan makrografi pada permukaan luar pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no. 66 memperlihatkan retak dalam arah *circumferential* (melingkar), arah *horizontal*, dan arah 45° terhadap sumbu pipa (Gambar 8-9).



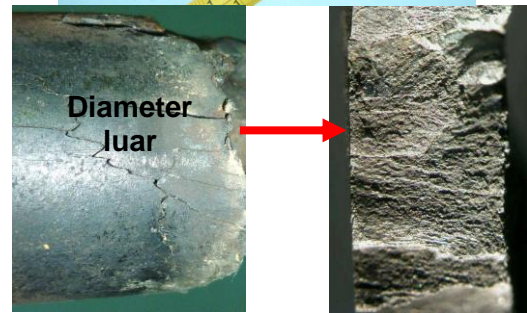
Gambar 5. Pipa *radiant section* di posisi ekspand No.65 yang retak



Gambar 6. Foto makro mengalami retak dalam bentuk *circumferential* (melingkar)



Gambar 7. Alur patah pipa *radiant section* di posisi ekspand no. 65 diawali dari diameter luar



Gambar 8. Pipa *radiant section* di posisi ekspand no. 66 mengalami kerusakan



Gambar 9. Perbesaran dari Gambar 8

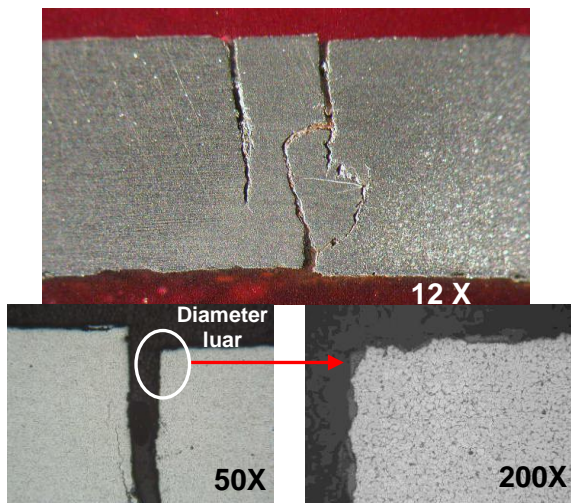
Pemeriksaan Struktur mikro

Pemeriksaan struktur mikro yang dilakukan terhadap pipa *radiant section* di posisi ekspand no. 65 memperlihatkan adanya retak yang merambat dari diameter luar ke permukaan dalam (Gambar 10). Retak merambat dalam bentuk retak pada batas butir (*intergranular*) yang berisikan produk korosi yang diindikasikan berasal dari debu bahan bakar (Gambar 11).

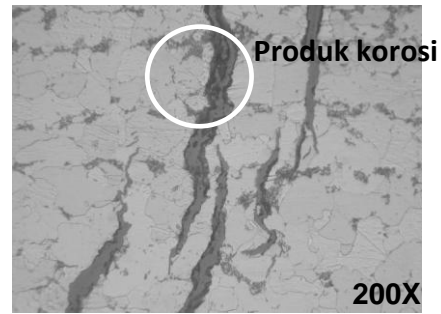
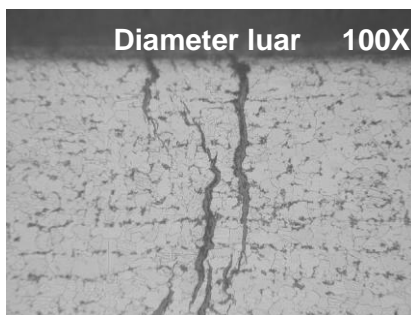
Adanya produk korosi diperkuat dengan bukti hasil pemeriksaan analisa EDS pada Tabel 10.

Pada pemeriksaan struktur mikro pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no.66 juga memperlihatkan adanya bentuk serangan retak batas butir (Gambar 12-15). Pada daerah retak tersebut juga berisikan produk korosi yang diindikasikan berasal dari debu bahan bakar (Gambar 11 dan 15). Bahkan struktur mikronya pun telah mengalami deformasi akibat beban tarik-ekspand (Gambar 14-15).

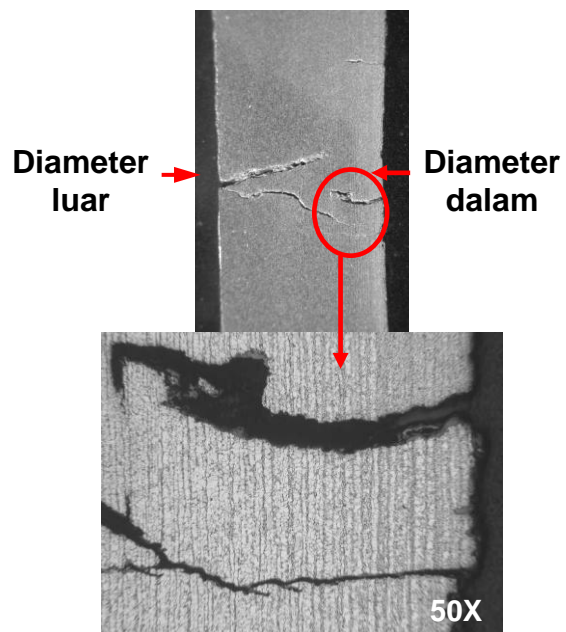
Secara umum struktur mikro pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no. 65 dan 66 terdiri dari ferit (daerah terang) dan perlit (daerah gelap) yang masing-masing dapat dilihat pada Gambar 10-11 dan Gambar 13-15.



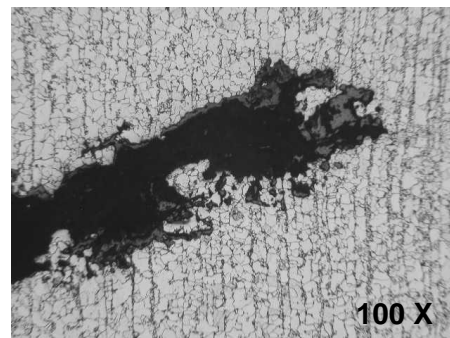
Gambar 10. Struktur mikro pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no.65 memperlihatkan adanya retak dari diameter luar. Etsa : Nital 2%.

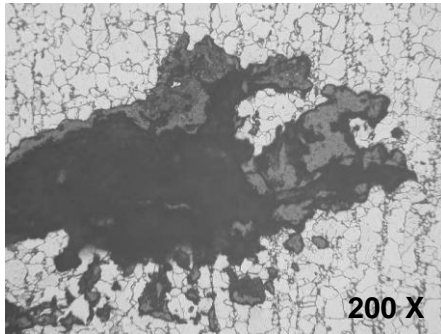


Gambar 11. Bentuk retakan berupa retak *intergranular* / retak batas butir dan terdapat pula produk korosi di dalam retak tersebut. Struktur mikro berupa ferit (daerah terang) dan perlit (daerah gelap). Etsa Nital 2%.

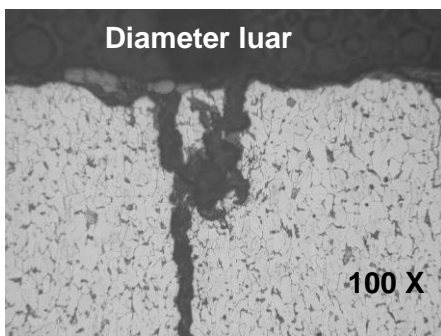


Gambar 12. Foto mikro potongan memanjang pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no.66. Etsa Nital 2 %

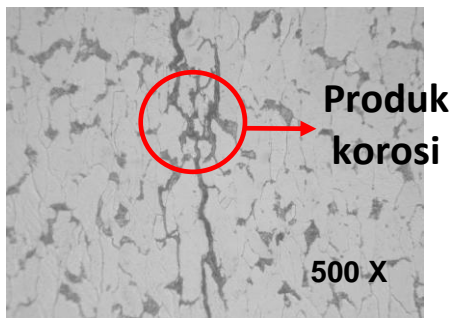




Gambar 13. Struktur mikro akhir retak (lihat lingkaran gambar 10) berupa ferit (daerah terang) dan perlit (daerah gelap) serta produk korosi. Etsa : nital 2%



Gambar 14. Struktur mikro pipa *radiant section* di posisi ekspand no. 66 terdiri dari ferit (daerah terang) dan perlit (daerah gelap) dengan jenis retak *intergranular* (retak batas butir). Etsa: nital 2%



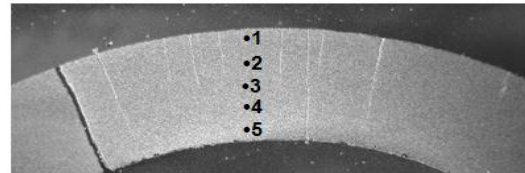
Gambar 15. Perbesaran dari Gambar 14. Etsa: nital 2%

Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dari pipa *radiant section* dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat kekerasannya.

Dari hasil pengujian kekerasan pada kedua sampel menunjukkan bahwa rata-rata nilai kekerasan material potongan melingkar pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no.65 dan potongan memanjang

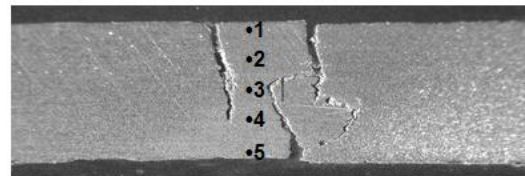
pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no. 66 masing-masing sebesar 206 VHN dan 201 VHN (Tabel 6 dan Tabel 7). Kekerasan kedua pipa tersebut melebihi nilai kekerasan standard ASTM A 192 yaitu maksimal 144 VHN.



Gambar 16. Sampel uji kekerasan pipa *radiant section* No. 65

Tabel 6. Hasil pengujian kekerasan pipa *radiant section* di posisi ekspand no.65

No.	Harga Kekerasan (VHN)
<i>Pipa Radiant Section</i> No.65	
1	209
2	210
3	210
4	200
5	211
Rata-rata (VHN)	206



Gambar 17. Sampel uji kekerasan pipa *radiant section* No. 66

Tabel 7. Hasil pengujian kekerasan pipa *radiant section* di posisi ekspand No.66

No.	Harga Kekerasan (VHN)
<i>Pipa Radiant Section</i> No.66	
1	203
2	204
3	201
4	201
5	192
Rata-rata (VHN)	201

Analisa Komposisi Kimia

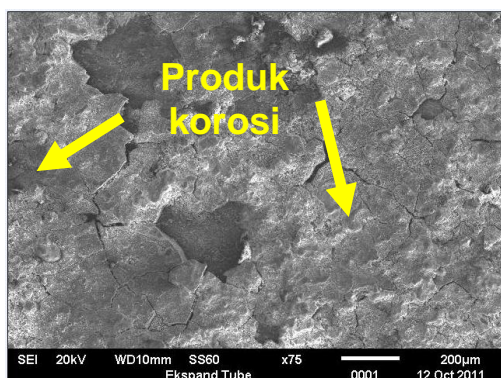
Hasil pengujian komposisi kimia material pipa *radiant section* dapat dilihat pada Tabel 8. Dari hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa material pipa ekspand sesuai dengan material standard ASTM A 192.

Tabel 8. Komposisi kimia material pipa *radiant section* hasil pengujian dengan OES

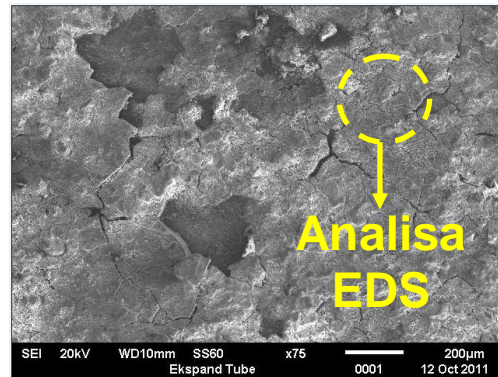
Unsur	% berat	Unsur	% berat
Fe	Sisa	Cu	0,116
C	0,094	W	0,003
Si	0,171	Sn	0,001
Mn	0,518	Al	0,007
Ni	0,081	Pb	0,024
Cr	0,156	Nb	0,001
Mo	0,027	S	0,0027
V	0,00095	P	0,0094

Analisa SEM

Hasil pemeriksaan dengan SEM dan EDS pada permukaan luar pipa *radiant section* di posisi ekspand yang bocor, dapat dilihat pada Gambar 18 dan Tabel 9. Tampak di permukaan luar pipa terdapat produk korosi berupa debu. Pada pipa *radiant section* di posisi ekspand yang bocor yang bocor terdeteksi unsur-unsur seperti karbon (C), silikon (Si), sulfur (S), kalium (K), dan kalsium (Ca) yang diindikasikan dari bahan bakar.



Gambar 18. Foto hasil SEM permukaan luar pipa *radiant section* di posisi *ekspand*.



Gambar 19. Permukaan luar pipa ekspand yang dianalisa EDS

Tabel 9. Komposisi produk korosi permukaan luar pipa *radiant section*

Produk korosi pipa luar <i>radiant section</i>			
Unsur	% berat	Unsur	% berat
C	19,39	K	0,12
O	52,29	Ca	0,26
Al	3,25	Ti	1,77
Si	1,15	V	0,33
P	0,37	Fe	19,78
S	0,40	Ni	0,89

PEMBAHASAN

Material yang digunakan untuk pipa *radiant section* adalah baja karbon rendah yang mempunyai struktur mikro ferit (daerah terang) dan perlit (daerah gelap) [1-3]. Hasil pemeriksaan metalografi pada pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no. 65 memperlihatkan adanya retak *intergranular* yang merambat dari diameter luar ke permukaan dalam (Gambar 10). Selain itu, juga terlihat adanya produk korosi yang diindikasikan berasal dari debu bahan bakar pada retak tersebut (Gambar 11).

Fenomena yang sama juga terjadi pada pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no.66 (Gambar 12 -15). Bahkan struktur mikro nya pun telah mengalami deformasi akibat beban tarik-*ekspand* (Gambar 14-15). Dari gambar tersebut jelas terlihat

bahwa butiran ferit memipih akibat beban tarik-ekspand.

Hasil pengujian kekerasan terhadap material pipa *radiant section* di posisi ekspand no. 65 dan pipa *ekspand* no. 66 masing-masing berkisar antara 200 VHN s/d 211 VHN (Tabel 6) dan 192 VHN s/d 204 VHN (Tabel 7). Hasil uji kekerasan tersebut menunjukkan bahwa nilai kekerasan kedua sampel material melebihi standard ASTM A 192 yang diperbolehkan yaitu maksimal 144 VHN^[1-3]. Hal ini diperjelas dengan adanya deformasi pada kedua struktur mikro pipa *radiant section* akibat beban tarik-*ekspand* ketika proses *plugging* pada masing-masing pipa (Gambar 12 dan 14-15).

Komposisi kimia dari material pipa *radiant section* dapat dilihat pada Tabel 8. Dari hasil uji tersebut memperlihatkan bahwa material pipa *radiant section* memenuhi spesifikasi standard ASTM A 192 (Tabel 1).

Dalam pengoperasiannya material pipa *radiant section* mengalami siklus beban atau tegangan berupa beban mekanis oleh getaran vibrasi dan siklus temperatur. Kedua beban tersebut menghasilkan kerusakan lelah (*fatigue*)^[4,5]. Tipe kerusakan ini dibuktikan dengan retak batas butir yang merambat dari diameter luar ke permukaan dalam pipa *radiant section*.

Ditambah dengan unsur-unsur korosif seperti unsur karbon (C), oksigen (O), kalium (K), sulfur (S), magnesium (Mg), silikon (Si), dan aluminium (Al) menyebabkan material pipa *radiant section* mengalami serangan korosi. Hal ini diperjelas dengan pemeriksaan struktur mikro terhadap kedua pipa *radiant section* yang memperlihatkan adanya produk korosi di butiran ferit pada struktur mikronya (Gambar 11, 15). Elemen-elemen pada produk korosi tersebut diindikasikan berasal dari debu bahan bakar.

Dari hasil pemeriksaan EDS produk korosi mengandung elemen karbon (C) sebesar 19,39%. Unsur karbon yang cukup

tinggi tersebut diindikasikan berasal dari debu bahan bakar akibat proses pembakaran yang tidak sempurna. Sedangkan dengan ditemukannya unsur kalium (K) dan sulfur (S) pada produk korosi menunjukkan bahwa apabila kedua unsur tersebut bersenyawa dan membentuk senyawa potassium pyrosulfate ($K_2S_2O_7$) maka nantinya akan menghasilkan deposit yang bersifat korosif pada permukaan luar^[5-6].

Fenomena serangan yang terjadi pada pipa *radiant section* karena perpaduan antara siklus beban berupa getaran yang ditambah dengan serangan korosi yang diindikasikan berasal dari bahan bakar secara bersamaan selama sistem ketel uap beroperasi. Kedua pembebanan tersebut menimbulkan retak lalu retak merambat sampai material pipa *radiant section* mengalami kebocoran. Serangan ini dikenal dinamakan dengan korosi lelah (*fatigue corrosion*)^[7-8].

KESIMPULAN

Dari penelitian terhadap pipa ekspand yang mengalami kegagalan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- Karakteristik material dari pipa *radiant section* di posisi *ekspand* sesuai dengan standard material ASTM A 192
- Pipa *radiant section* di posisi *ekspand* no. 65 dan no. 66 mengalami kebocoran akibat serangan *fatigue corrosion* (korosi lelah) yang merambat dari diameter luar ke permukaan dalam.
- Kerusakan pipa *radiant section* dikombinasikan oleh perpaduan tegangan dari beban mekanis berupa getaran dan siklus temperatur (dinamika thermal) yang ditambah dengan unsur-unsur *korosif* seperti elemen karbon (C), oksigen (O), kalium (K), sulfur (S), magnesium (Mg), silikon (Si), dan aluminium (Al) yang diindikasikan berasal dari debu bahan bakar selama sistem ketel uap beroperasi hingga menyebabkan

perambatan retak di beberapa lokasi dikenal dengan korosi lelah (*fatigue corrosion*).

SARAN

Untuk menghindari terjadinya fenomena korosi lelah (*fatigue corrosion*) pada pipa ekspand selanjutnya, maka perlu dilakukan tindakan pencegahan antara lain^[9-10] :

- Memeriksa kondisi permukaan luar tube secara periodik dengan pemeriksaan visual maupun dengan metoda NDT seperti Replika Teknik (untuk melihat kondisi struktur mikro), pengukuran nilai kekerasan (dengan Equotip Hardness Tester), pengukuran OD dan ketebalan (dengan UT, dll).
- Melakukan mechanical cleaning pada permukaan luar tube agar terbebas dari produk korosi dan kerak (scale).
- Menghindari kesalahan manufaktur yang dapat meningkatkan tegangan sisa selama beroperasi.
- Mengurangi vibrasi / getaran mekanis dan kondisi operasi yang menyebabkan serangan *fatigue*
- Mengubah kondisi operasi yang menyebabkan retak selama pengoperasian seperti *shutdown / start up*

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASM Handbook Committee. 2002. Properties and selection, Ninth Edition, Metal Handbook of ASM, American Society for Metals, Ohio. Vol. 1.
- [2] ASTM standards. 2002., Steel-piping, tubing, fittings, American Standard of Testing Material, Ohio. Vol.01.01.
- [3] DIN-Steel and Iron Standards on Quality, DNA Beuth Verlag GmbH, Berlin. 2010.
- [4] ASM Handbook Committee, Failure Analysis and Prevention. 2011. Ninth Edition, Metal Handbook of ASM, American Society for Metals, Ohio. Vol. 11.
- [5] Thielsch, Helmut. 1986. Defect and Failures in Pressure Vessels and Piping, Robert Krieger Publishing Company, Florida. : p.398-406.
- [6] French, David N. 1993. Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers, John Wiley & Sons, 2nd, p.197-203.
- [7] Mc Namara, J.F., O.Sullivan, Richard A. 1991. „Durability and Failure in Engineering Materials”. *Proceeding of the 5th Irish Fracture Conference*.
- [8] Babcock & Wilcox Power Generation Group. 2006. Reduce Future Boiler Tube Failure, (<http://www.babcock.com/library/pdf/e1013153.pdf>), diakses 31 Januari 2013
- [9] Dillon,C.P. 1986. Corrosion Control in the Chemical Process Industries, McGraw-Hill, New York.
- [10] U.Malik, Anes, dkk, Corrosion of Boilure Tubes Some Case Studies, (<http://www.swcc.gov.sa/files/assets/Research/Technical%20Papers/Corrosion/CORROSION%20OF%20BOILER%20TUBES%20SOME%20CASE%20STUDIES....15.pdf>), diakses 31 Januari 2013.

RIWAYAT PENULIS

Eka Febriyanti, lahir di Jakarta pada tanggal 2 Februari 1986. Menamatkan pendidikan S1 di bidang Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Saat ini bekerja sebagai staff engineer Kajian Material di B2TKS-BPPT.