



PROSIDING HASIL PENELITIAN 2011 UPN "Veteran" Jakarta



**LEMBAGA PENELITIAN DAN PEMBERDAYAAN MASYARAKAT
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAKARTA**

Jl. R.S. Fatmawati, Pondok Labu Jakarta Selatan 12450

Telepon / Faks. 021 7656971 Ext. 235

e-mail: lppm@upnvj.ac.id

DAFTAR ISI

Kajian Penggunaan Turbocharger Terhadap Performa Mesin Diesel Muhamad As'adi, Sulistiono, dan Sigit Pradana	1 - 8
Analisis Kekuatan Tarik Pada Daerah Las Hasil Pengelasan SMAW (Shielding Metal Arc Welding) Menggunakan Elektroda E6010 Budhi Martana, Yuhani Djaya, dan Frederikus Konrad	9 - 18
Pengembangan Kelembagaan Klaster Industri Kecil Penyulingan Minyak Atsiri Halim Mahfud, Budhi Martana, dan Nurfajrah	19 - 38
Pengujian Alat Injeksi CNG Terhadap Emisi Gas Buang Pada Mesin Diesel Berbahan Bakar Ganda (CNG-Solar) Saut Siagian, Yuhani Djaya, dan Sugeng Prayitno	39 - 48
✓ Analisis Kegagalan Material Pipa Air Super Boiler Kapasitas Maksimum Uap 500 Kg M. Galbi Bethalembah, Marsudi, dan Ishak A.	49 - 56 ✓
Prototipe Rancangan Kapal Tipe Pendarat 200 GRT Sebagai Sarana Penyeberangan Antar Pulau Di Daerah Terpencil Kepulauan Indonesia Iswadi Nur, Bambang Sudjasta, dan Amir Marasabessy	57 - 64
Evaluasi Implementasi Undang-Undang No.80 Tahun 1957 Tentang Ratifikasi Konvensi ILO No.100 Mengenai Pengupahan yang Sama Bagi Buruh Pria, dan Wanita untuk Pekerjaan yang Sama Nilainya. Erni Agustina, Djamhari Hamza, dan Reni Dwi Purnomowati	65 - 74
Penyelesaian Sengketa Antara Konsumen, dan Pelaku Usaha Menurut Undang-Undang No.8 Tahun 1999 Tentang Perlindungan Konsumen Suherman, dan Srie Pudjiati	75 - 84
Analisis Pengelolaan Modal Kerja Perusahaan Manufaktur di Bursa Efek Indonesia Wahyudi, Yoko Tristiarto, dan Renny Husniati	85 - 92
Analisis Faktor-Faktor yang Memotivasi Lulusan D-III Melanjutkan Studi S-1 di Fakultas Ekonomi UPN "Veteran" Jakarta Jubaedah, Jenji Gunaedi Argo, dan Marlina Tanjung	93 - 102
Analisis kebutuhan komunikasi Pembinaan, berdasarkan karakteristik UMKM Depok Rini Riyantini	103-108

ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL PIPA AIR SUPER BOILER KAPASITAS MAKSIMUM UAP 500 Kg

M. Galbi Bethalembah¹, Marsudi, dan Ishak A.

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik UPN "Veteran" Jakarta

Jl. R.S. Fatmawati Pondok Labu Jakarta Selatan – 12450

Telp. 021 7656971 Ext. 195

Abstract

This research is subjected to reveal the Root cause of the failure on one of particular water boiler pipe that is in its diameter enlargement followed by local crack after it is used for 5 years or 10 years from its design. The result of the specimen test toward the chemical composition and the hardness of pipe materials shows that there is a percentage decrease of the titrates alloy's elements. The decrease is the significant causes to reduce hardness and the binding power among metal element and its alloy. Mechanically it will decrease tensile strength and become high corrosion rate. More over, the data taken from micro structure photograph indicates that there is recrystalization. It means that Short term Overheating has occurred while item bounds that mark initial cracking is just its implication. At last, through the Energy dispersive x ray Analysis test, it indicates that there are so many elements which dissolved and taken into water filler boiler which may cause the corrosion and the crust formation which may cause locally overheating. It is clearly indicated that there was service fault which can be avoided by undertaking Scheduled discard Task in order to have long lasting design.

Key words: *Root cause, Failure, Overheating*

PENDAHULUAN

Suatu Ketel uap (*Boiler*) yang digunakan sebagai sumber tenaga atau untuk kebutuhan Industri menuntut kebutuhan kuantitas dan kualitas uap yang sesuai, olehnya ketel uap dirancang sedemikian rupa dengan berbagai macam sistem proses pemanasan, yang salah satunya menggunakan pipa yang berisi air sebagai wadah penyalur panas (*heat transfer*) untuk diteruskan ke sejumlah air yang berada di dalamnya. Dengan demikian di dalam Pipa-pipa air tersebut uap akan terbentuk secara terus menerus selama periode operasi yang secara bersamaan berfungsi sebagai media heat transfer yang berasal dari *burner* yang berada di sekitar dinding luar pipa.

Atas dasar pertimbangan fungsi yang mengacu pada hukum perpindahan panas, maka pipa-pipa air tersebut dibuat berbelok-belok agar dapat menghasilkan jumlah air yang diperlukan yang sebanding dengan uap yang dihasilkan namun pada belokan tersebut tentu akan mengalami ancaman kegagalan kegagalan berupa: *stress fatigue failure, thermal fatigue failure, overheated failure dan Corrosion failure* yang disebabkan oleh perubahan temperatur fluida didalam pipa dan akibat dari burner di luar pipa termasuk juga oleh pengendapan unsur unsur lain yang lolos dari sistem perlakuan air yang akan terikut bersama air masuk ke dalam boiler.

Material pipa air yang diteliti mengalami deformasi plastis berupa pembesaran diameter dari diameter semula sepanjang beberapa centimeter dari panjang keseluruhan pipa dan disertai pula adanya retak pada daerah yang berdekatan dengan daerah deformasinya. Kegagalan ini belum seyogyanya terjadi sebab baru dioperasikan sekitar lima tahun dari umur desain sekitar sepuluh tahun.

Secara teoritis kegagalan material ini disebabkan oleh sejumlah faktor kesalahan (*fault factors*) atau gabungan dari beberapa faktor-faktor tersebut yang saling memperkuat terjadinya

¹ Kontak Person : **M. Galbi Bethalembah**
Jurusan Teknik Mesin, FT UPNV Jakarta
Telp. 021 7656971

kegagalan baik secara individual maupun gabungan dari sejumlah kesalahan-kesalahan itu. Hal tersebut hanya dapat diketahui melalui analisis dari pengujian-pengujian *chemical composition test*, *Mechanical properties test*, *Metallography test*, *Fracturegraphy test* dan *X-ray test*. Tahapan maupun ragam pengujian yang dilakukan sangat tergantung kepada hasil pengujian yang diinginkan.

Kegagalan Material

Secara umum sebab-sebab kegagalan/kerusakan material ketika dioperasikan pada suatu sistem dapat disebabkan baik secara sendiri maupun secara bersama yaitu dikarenakan oleh *material fault*, *design fault*, *fabrication fault* dan *service fault*, berupa kerusakan mekanis (akibat gaya, tekanan, fatigue dan lain lain), akibat panas/perubahan panas yang berulang ulang dan akibat korosi.

Untuk menelusuri penyebab kerusakan/kegagalan dapat dilakukan dengan pendekatan pertanyaan secara berturutan yang dimulai dengan apa yang gagal, kapan terjadi kegagalan, di mana letak keagalannya, bagaimana bentuk keagalannya, mengapa/kenapa bisa terjadi kegagalan yang demikian, sehingga akar penyebabnya (*root cause*) dapat diketahui. Untuk menjawab pertanyaan "apa yang gagal (fungsi apa yang gagal)" dapat dilakukan dengan metoda *fault tree analysis*/*Fish bone analysis*, sedangkan bagaimana kerusakannya dilakukan melalui investigasi (pengujian) yang hasilnya kemudian diisolasi yang mungkin masih akan menyisakan "sejumlah kemungkinan" dan "pertanyaan mengapa" hanya dapat diketahui melalui verifikasi (diperbandingkan dengan standard), pengujian, simulasi dan evaluasi.

Dengan metode uji pembebanan aksial atau pengujian tarik pada material dapat menentukan umur pakai (*life time*) material tersebut. Dari pengujian tarik pada material diperoleh kekuatan tarik ijin bahan, sehingga dari hasil pengujian tersebut dapat dibuat diagram S-N. Berdasarkan pada diagram S-N yang terbentuk dan beban kerja pada material, maka umur pakai material dapat ditentukan.

Sifat mekanik adalah sifat yang menyatakan kemampuan suatu bahan untuk menerima beban atau gaya tanpa mengalami kegagalan. Bila suatu bahan mempunyai sifat mekanik yang baik akan mampu menahan beban dan temperatur tinggi, tetapi karena terjadi dalam waktu lama akan merubah sifat material.

Untuk mengukur sifat logam tersebut perlu dilakukan pengujian. Pengujian dilakukan terhadap sampel bahan (*specimen*) yang dipersiapkan menjadi benda uji (*test pieces*) dengan bentuk dan ukuran standar. Demikian juga prosedur pengujian dilakukan sesuai standar, baru kemudian hasil pengukuran pada benda uji dapat dianalisis dan disimpulkan mengenai perubahan sifat mekanis bahan uji yang akan mengantarkan kepada akar penyebabnya.

Penurunan kualitas material dapat disebabkan oleh berbagai faktor, di antaranya adalah lamanya pemakaian, kondisi lingkungan, pembebanan dan sebagainya. Umur bahan ditentukan oleh kemampuan bahan menerima beban yang berulang-ulang sampai mengalami kegagalan. Apabila material mengalami pembebanan yang berulang dalam jangka waktu tertentu akan mengalami kelelahan karena sifat mekanik bahan menurun. Kekuatan lelah (*fatigue strength*) biasanya dinyatakan dalam diagram S-N, yaitu suatu pernyataan tentang kekuatan (S) ini selalu diikuti dengan pernyataan tentang jumlah siklus (N) yang berkaitan.

Kegagalan lelah selalu dimulai dari ketidak-mulusan setempat seperti sebuah takikan, heterogenitas lokal, retak atau bidang pemusatan tegangan lainnya. Bila tegangan yang terjadi pada ketidak-mulusan tersebut melampaui batas elastis, maka terjadi tegangan plastis. Karena terjadinya tegangan plastis yang berulang-ulang tersebut dapat menyebabkan kepatahan akibat kelelahan.

Berikut ini adalah beberapa faktor yang mempengaruhi batas ketahanan suatu material, yaitu: (1) komposisi kimia; sifat fisik dan sifat mekanis bahan, (2) metode pembuatan; perlakuan panas (*heat treatment*), kondisi permukaan, (3) lingkungan, (4) suhu yang terjadi, korosi, keadaan tegangan dan down time, dan (5) ukuran (dimensi) benda, bentuk benda, umur operasi dan kecepatan pembebanan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimaksudkan adalah untuk mengetahui penyebab-penyebab kegagalan material pipa air "SUPER BOILER" KAPASITAS MAKSIMUM uap 500 kg/jam pada daerah kegagalan akibat pemakaian yang masih dalam rentang umur desainnya dengan tujuan agar dapat dilakukan langkah-langkah antisipatif untuk kelancaran operasi sistem ketel uap secara keseluruhan agar dapat beroperasi sesuai dengan performa yang diharapkan dan dapat mencapai umur desainnya.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen terhadap spesimen material yang gagal atau rusak dan mengacu pada pendekatan yang direkomendasikan oleh salah satu atau gabungan dari *American Standard for Testing and materials (ASTM)*, *American Standard Mechanical Engineers (ASME)*, atau *standard* lainnya yang terdiri dari pengujian komposisi kimia Material pipa air yang rusak dibandingkan dengan *material standard*, pengujian kekerasan, pengujian metallography untuk mengetahui perubahan struktur kristal dan uji EDAX (*energy dispersive X-Ray Analysis Spectroscopy*) yaitu uji unsur unsur endapan/kerak /korosi yang melekat atau bereaksi dengan material yang rusak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Komposisi

Klasifikasi baja ditentukan berdasarkan pada unsur karbon yang terkandung dalam suatu material yang dapat dibedakan menjadi tiga. Pertama baja karbon rendah atau sering disebut baja ringan/lunak (*mild steel*) merupakan baja dengan kandungan karbon kurang dari 0,3%. Kedua baja karbon sedang yaitu baja yang memiliki kandungan karbon antara 0,3-0,6%. Ketiga baja karbon tinggi, yaitu baja dengan kandungan karbon 0,6–1,5%. Komposisi kimia pada baja sangat mempengaruhi sifat-sifat baja seperti keuletan, kekerasan, kekuatan dan lain sebagainya. Uji komposisi dilakukan pada 2 spesimen, yaitu pada pipa air ketel uap yang baru (sesuai *standard*) dan pipa air ketel uap yang mengalami kerusakan (*scale*), dari pengujian tersebut didapat komposisi unsur-unsur kimia (dalam %).

Tabel. 1. Uji komposisi kimia pipa air pada kondisi baru dan rusak.

NO	NAMA UNSUR	KOMPOSISI PIPA AIR	
		BARU	RUSAK
1	C	0,248	0,107
2	Si	0,267	0,115
3	S	<0,005	<0,005
4	P	<0,005	<0,005
5	Mn	0,417	0,425
6	Ni	0,025	0,050
7	Cr	0,027	0,030
8	Mo	0,007	0,007
9	Ti	0,002	0,004
10	Cu	0,020	0,014
11	Nb	<0,003	0,005
12	V	0,003	0,005
13	Al	0,010	0,032
14	Fe	98,9	99,1

Hasil dari pengujian komposisi kimia pada pipa air yang baru dan spesimen pipa air yang rusak dapat dilihat pada Tabel 1. Pada uji komposisi kimia dapat diketahui bahwa kadar karbon dalam pipa air ketel uap yang baru sebesar 0,248% sehingga termasuk dalam baja karbon rendah, sedangkan unsur karbon pipa air ketel uap yang rusak (*scale*) sebesar 0,107%, nilai ini menunjukkan adanya pengurangan kadar karbon pada pipa air ketel uap yang menyebabkan menurunnya tingkat kekerasan pada pipa. Selain itu juga karbon berfungsi sebagai zat pengikat sehingga dengan

menurunnya kadar karbon, maka menurun pula daya rekat antar unsur logam yang lain. Selain terjadinya penurunan kadar karbon, terjadi pula penurunan kadar unsur silicon (Si) sebesar 0,152% dan kadar unsur tembaga (Cu) sebesar 0,006%. Penurunan kadar silicon akan menyebabkan berkurangnya kekuatan tarik pada pipa air ketel uap dan meningkatnya korosi akibat penurunan kadar tembaga. Dari tabel di atas terlihat pula adanya peningkatan unsur-unsur lainnya antara lain, Mangan (Mn), Nikel (Ni), Crom (Cr), Titanium (Ti), Niobium (Nb), Vanadium (V), Aluminium (Al), dan Ferrous (Fe).

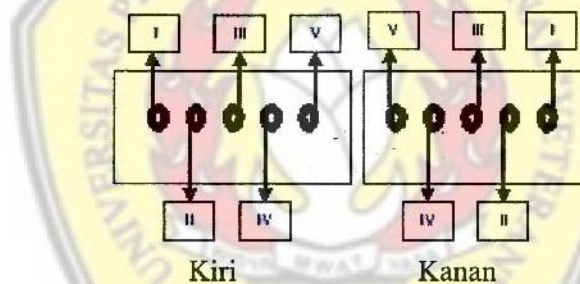
Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Rocwell (HRB) pada beban $F_0=10$ kgf, $F_1=90$ kgf, $F=100$ kgf dan $E=130$ kgf. Tiap spesimen uji dilakukan 5 kali pengujian spesimen menuju ke sisi yang mengalami kerusakan pada pipa bekas dengan jarak antar titik kira-kira 300 mm (0,3mm).

Tabel 2. Data rata-rata kekerasan specimen uji kekerasan Rockwell

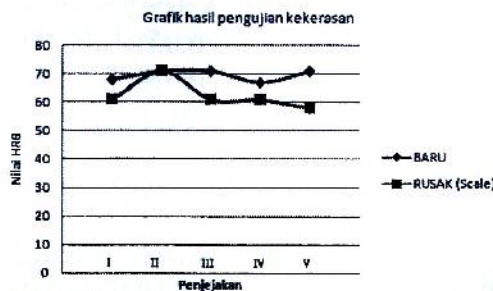
KODE SAMPEL	PENJEJAKAN					RATA-RATA HRB
	I	II	III	IV	V	
BARU	68	71	71	67	71	± 69,6
RUSAK	61	71	61	61	58	± 62,4

Data dari tabel tersebut kemudian dibuat grafik untuk menunjukkan hubungan antara perbedaan pipa yang baru dengan pipa yang rusak terhadap nilai kekerasan yang dihasilkan dan grafik nilai kekerasan benda uji dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 1. Titik penjejakan pada spesimen yang baru (kanan) dan rusak (kiri)

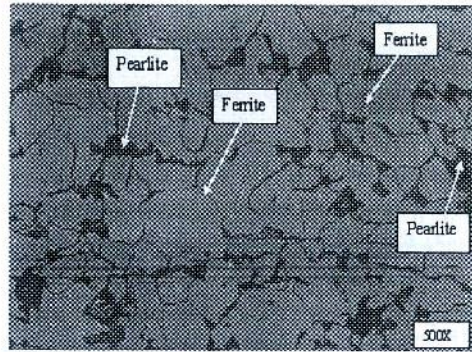
Dari gambar 2, menunjukkan bahwa bahan material pada spesimen pipa air ketel uap yang baru memiliki nilai kekerasan Rocwell (HRB) lebih tinggi dibandingkan nilai HRB pada pipa air ketel uap yang rusak dan dapat dirata-rata nilai HRB pipa ketel yang baru sebesar 69,6 HRB. Sedangkan nilai kekerasan HRB rata-rata pada pipa rusak sebesar 62,4 HRB. Nilai kekerasan HRB mengalami penurunan sebesar 10,35 % dari nilai kekerasan pada pipa yang baru yaitu sebesar 7,2 HRB.



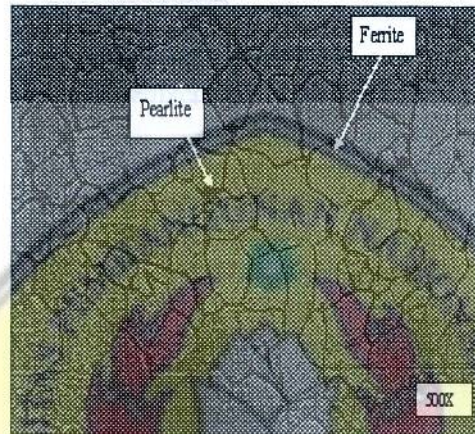
Gambar 2. Grafik hasil pengujian nilai HRB pipa air ketel uap terhadap posisi penjejakan pada pengujian Rockwell

Foto Struktur Mikro

Struktur mikro logam dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop logam yaitu gambar 3 dan gambar 4. Strukturnya dengan menggunakan foto mikro yang sudah diperbesar hingga 500X perbesaran.



Gambar 3. Struktur mikro sampel uji pipa boiler yang baru

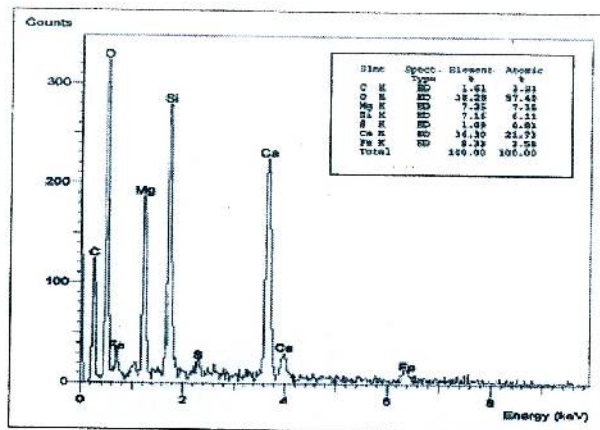


Gambar 4. Struktur mikro sampel uji pipa boiler yang rusak

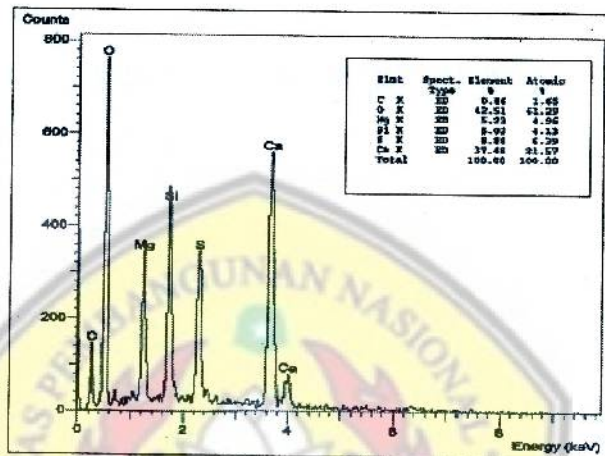
Pada foto struktur mikro untuk pipa air ketel uap seperti pada gambar 3 dan 4, terlihat bahwa struktur yang terbentuk adalah *ferrite* (berwarna terang) dan *pearlite* berwarna (gelap atau hitam). Struktur *ferrite* tampak lebih dominan dari pada struktur *pearlite*, hal ini menunjukkan bahwa bahan pipa air ketel uap merupakan baja karbon rendah. Terlihat pula perbedaan stuktur *pearlite* antara material pipa air ketel uap yang baru dan yang rusak. Pipa air yang baru stuktur *pearlite* nya lebih banyak dibandingkan pipa air ketel uap yang rusak, hal ini menunjukkan bahwa adanya penurunan unsur penguat pada pipa air ketel uap yang rusak.

Uji Energy Dispersive X-ray Analysis Scale

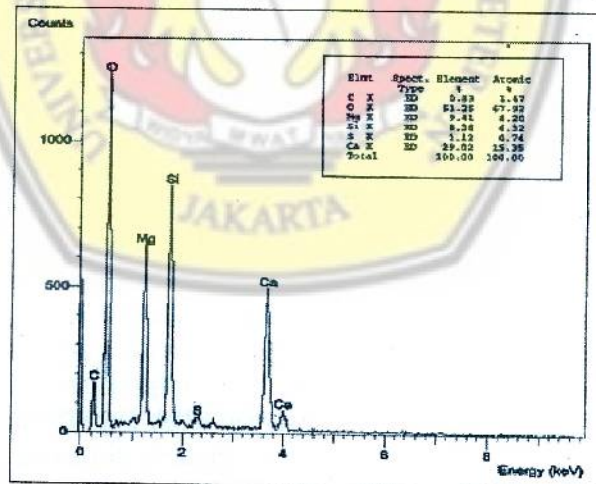
Pengukuran dengan *Energy Dispersive X-ray Analysis* (EDAX) pada bagian kerak/scale terdiri dari ketiga *sample* dan hasilnya dapat kita lihat pada gambar di bawah ini. Pada ketiga grafik (Gambar 5, 6 dan 7) menunjukkan bahwa adanya unsur-unsur pada air pengisi ketel yang dapat menyebabkan endapan kerak/scale. Unsur-unsur tersebut antara lain : Oksigen (O), Calsium (Ca), Magnesium (Mg), Silikon (Si), Sulfur (S), Carbon (C), serta Besi (Fe).



Gambar 5. Grafik Pengujian EDAX pada sampel I



Gambar 6. Grafik Pengujian EDAX pada sampel II

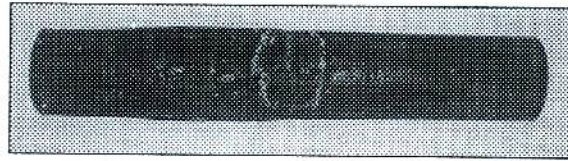


Gambar 7. Grafik Pengujian EDAX pada sampel III

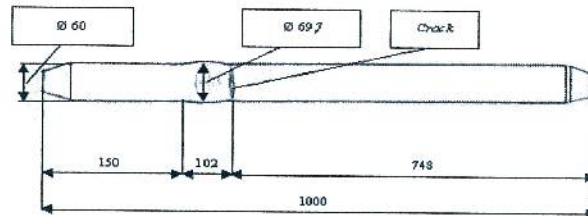
Pembahasan

Kerusakan obyek penelitian pipa air pada ketel uap Super boiler kapasitas 500kg/jam ini merupakan kerusakan yang umum terjadi pada ketel uap, antara lain: korosi pada dinding pipa akibat kandungan oksigen yang tinggi, pengelembungan pipa air hingga pecah akibat dari *Long Term Overheating* pada suhu berkisar antara 450°C-700°C dan *Short term Overheating* yaitu pada suhu di atas 700°C. Pada pipa air boiler ini kerusakan antara lain disebabkan oleh endapan kerak/*scale* pada dinding pipa bagian dalam hingga pipa mengalami kenaikan temperatur hingga

di atas suhu operasinya, adanya pengelembungan dari diameter awal pipa air sebesar 60 mm menjadi 69,7 mm sepanjang kurang lebih 102 mm disertai penipisan dinding pipa sebesar 0,7 mm yaitu dari tebal awal pipa air 4 mm menjadi 3,3 mm, dan terjadi setelah operasi 5 tahun. (Gambar 8, dan 9).

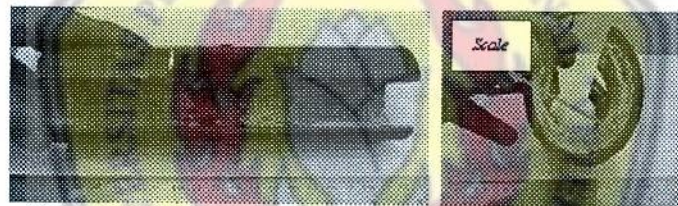


Gambar 8. Bagian Pipa Yang Gagal



Gambar 9. Dimensi dan Lokasi Bagian Pipa Yang Gagal

Dugaan sementara bahwa telah terjadi perubahan temperatur seiring dengan peningkatan *scale level* panas yang tinggi (*higher continue heat rate*). Proses perpindahan panas yang semakin terhambat menyebabkan *overheating* pada pipa dan akibat “tekanan dalam” menjadikan pipa menggelembung dan retak (Crack). (Gambar 10).



Gambar 10. Kerak yang Menempel pada Pipa Air Ketel Uap yang Dianalisis

Hasil uji *Energy Dispersive X-ray Analysis* (EDAX) menunjukkan bahwa begitu banyak unsur-unsur pembentuk kerak yang terlarut/terbawa oleh air pengisi ketel, di antaranya: (1) Oksigen; dapat menyebabkan korosi pada pipa air ketel uap dan unsur oksigen dapat diatasi dengan pemasangan alat oksidizer sebagai *external water treatment*. (2) Calsium; atau kapur adalah faktor yang paling dominan pembentuk kerak/*sacle*. Ada 3 jenis unsur kalsium yaitu kalsium sulfat, kalsium karbonat dan kalsium phospat, ketiga jenis kalsium tersebut memiliki kecenderungan untuk mengendap dan menempel pada dinding pipa hingga akhirnya mengeras (kerak). Kerak Ca tersebut dapat dilarutkan dengan pemberian larutan asam, dan (3) Magnesium (Mg), Sulfur (S), Besi (Fe), Carbon (C) dan Silica (Si) akan mengendap setelah berinteraksi dengan unsur lain seperti Ca dan O.

Banyaknya unsur-unsur yang mengendap pada bagian dinding pipa menunjukkan bahwa penanganan air ketel sangat buruk yang diperparah dengan kurangnya tindakan pembersihan yang ditunjukkan oleh ketebalan penumpukan lapisan kerak yang menempel pada bagian permukaan dalam pipa.

Dari tabel 1 hasil pengujian komposisi kimia terhadap pipa air yang baru dan yang rusak, dan perbandingan keduanya terlihat adanya penurunan kadar Carbon (C) sebesar 0,141% serta kadar Silikon (Si) sebesar 0,152% dan kadar Tembaga (Cu) sebesar 0,006%. Ketiga unsur ini merupakan unsur dominan pada *low karbon steel*. Penurunan ketiga jenis unsur ini mengakibatkan

penurunan kekerasan, kekuatan tarik menyebabkan meningkatnya korosi pada pipa tersebut. Kenaikan persentase kadar unsur-unsur Mangan (Mn), Nikel (Ni), Crom (Cr), Titanium (Ti), Niobium (Nb), Vanadium (V), Alumunium (Al), dan besi (Fe) yang akan berimpikasi pada kenaikan corrosion rate, karena butiran (*grains*) mempunyai *high energy level* maka lebih tahan terhadap serangan korosi, sedangkan batas butir (*low energy level*) terjadi korosi mengikuti lintas batas butir, disebut *intergranular corrosion*. Hasil uji komposisi kimia tersebut juga diperkuat oleh hasil uji kekerasan serta uji metallography (Foto Struktur Mikro).

Hasil pengujian kekerasan menggunakan alat *Rockwell Hardness Testing Machine* pada Tabel 2 dan grafik pada Gambar 2 menunjukkan bahwa adanya penurunan nilai rata-rata kekerasan pada pipa air yang disebabkan karena adanya penurunan unsur karbon pada pipa air. Nilai kekerasan pipa air mengalami penurunan sebesar 10 HRB dari kekerasan pipa awal sebesar 69,6 HRB menjadi 62,4 HRB. Penurunan kadar karbon juga terlihat pada uji Metallography struktur mikro pada Gambar 3 (pipa baru) dan Gambar 4 (pipa rusak). Gambar 3 terlihat adanya struktur *Ferrite + Pearlite* yang menandakan struktur logam baja rendah (*Low Carbon Steel*) dengan struktur Kristal FCC. Gambar 4 dominan terlihat struktur Ferrite dengan Kristal BCC. Selain itu juga terlihat batas-batas butir yang lurus, hal inilah yang mengindikasikan terjadinya *crack/retak*.

SIMPULAN

Jenis kerusakan yang terjadi pada pipa air ketel uap (*boiler tube*) adalah adanya endapan atau kerak yang menempel hingga menyebabkan pipa air secara terus menerus mengalami *long term overheating* serta adanya pemanasan lokal pada suhu tinggi (*Localized Overheating*) yang berlangsung cepat (*short Term*). Kerusakan ini ditandai dengan penurunan kadar Carbon (C), Silicon (Si), dan Tembaga (Cu).

Faktor penyebab penggelembungan dan keretakan pada pipa air ketel uap akibat adanya tekanan uap yang terjadi pada *localized overheating* di mana *ductility* nya semakin meningkat. Hal ini didukung dari hasil pengujian yang dilakukan pada bagian pipa yang belum gagal menunjukkan struktur *Ferrite+Pearlite* dan nilai kekerasannya lebih tinggi, jika dibandingkan dengan bagian pipa yang mengalami penggelembungan serta keretakan yang dominan terdiri dari stuktur *Ferrite* dengan struktur Kristal BCC yang memiliki nilai kekerasan lebih rendah .

Penipisan yang terjadi pada pipa disebabkan karena terjadinya korosi oleh oksigen (*corrosion by oxidation*).

DAFTAR PUSTAKA

- Amanto, Hari. 1999. *Ilmu Bahan*. Jakarta. Penerbit Bumi Angkasa.
- Jokosetyorjo, 2003. *Ketel uap Jakarta*. Penerbit Bumi Angkasa
- K. Denbigh, 1981, *Principles of Chemical Equilibrium*, 2nd ed., Cambridge Press, p133-186
- Palallo, Federick. 1995. *Perlakuan panas logam*. Bandung. Penerbit PPPG Teknologi.
- Soeripto M. 1990. *Air Pengisi Ketel dan Pengelohannya*. Jakarta. Penerbit PT. Pradnya Paramita.
- Supardi, Edith. 1999. *Pengujian Logam*. Bandung. Penerbit Angkasa. Penelitian Institute Teknologi Bandung.
- Suratman, Rochim. 1994. *Panduan proses Perlakuan Panas*. Bandung. Penerbit Lembaga Bandung.
- Surdia T, Saito S. 1992. *Pengetahuan Bahan Teknik*, cetakan ke dua. Jakarta. Penerbit PT Pradnya Paramita