

KARAKTERISASI PIPA BAJA KARBON RENDAH DALAM PENDEKATAN ANALISA KEGAGALAN

LOW CARBON STEEL PIPE CHARACTERIZATION IN FAILURE ANALYSIS APPROACH

Mawardi Silaban

Balai Besar Teknologi Energi (B2TE), BPPT
Kawasan PUSPIPTEK, Setu, Tangerang Selatan, Banten, 15314
E-mail : silaban90210@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini dilakukan terhadap material pipa baja karbon rendah yang digunakan pada ketel uap setelah dioperasikan sekitar satu tahun. Selanjutnya dilakukan karakterisasi terhadap benda uji pipa gagal dan pipa yang baru dengan tujuan untuk mengidentifikasi sejauh mana perubahan yang terjadi pada komposisi, dimensi, kekerasan dan struktur mikro dengan cara membandingkan keduanya. Dari uji *metalographi*, *Scanning Electron Microscope* (SEM), analisa mikro dengan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), struktur mikro awal adalah ferit-perlit. Pada suhu tinggi terjadi proses oksidasi, sehingga struktur mikro bahan berubah dari bentuk ferit-perlit menjadi struktur ferit dengan diameter butir yang membesar. Kegagalan pipa ketel uap diawali dengan terbentuknya lapisan deposit yang menempel pada permukaan dalam, yang mengakibatkan proses pindah panas ke air terganggu. Pada keadaan seperti ini suhu pipa akan semakin meningkat seiring dengan laju pembentukan deposit. Dan pada suhu diatas 540°C terjadi proses dekomposisi fasa perlit menjadi ferit + spheroidal carbides. Pada proses ini akan menyebabkan kekuatan pipa menjadi berkurang (baja menjadi lunak), sehingga pada tekanan uap sekitar 2 bar akan dapat menyebabkan terjadinya deformasi sehingga mengakibatkan pipa menjadi menggelembung.

Kata kunci : pipa ketel uap, struktur mikro, deposit, menggelembung, diameter butir

Abstract

This research was carried out on low carbon steel pipe materials used in the boiler after about a year to operate . Further characterization of the test specimen failed pipe and the new pipe with the aim to identify the extent to which changes in the composition , dimensions , hardness and microstructure by comparing the two. Of test metalographi , Scanning Electron Microscope (SEM) , micro analysis by Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) , the initial microstructure is ferrite - pearlite . At high temperature oxidation process occurs , so that the microstructure of the material changes from ferrite - pearlite forms into a structure ferrite grain diameter enlarged . Boiler pipe failure begins with the formation of the deposit layer attached to the inner surface , which results in the process of heat transfer to the water disturbed . In these circumstances the temperature of the pipe will increase along with the rate of deposit formation . At temperatures above 540°C occur decomposition into ferrite + pearlite phase spheroidal carbides . In this process will lead to the strength of the pipe to be reduced (steel becomes soft) , so that the vapor pressure of approximately 2 bar will cause deformation resulting in the pipe becomes bulging .

Keywords : steam boiler tube, micro structure, scale, bulging, grain diameter

Diterima (received) : 14 Oktober 2014, Direvisi (reviewed) : 30 Oktober 2014,
Disetujui (accepted) : 18 November 2014

PENDAHULUAN

Ketel uap banyak dipakai pada pekerjaan industri seperti pada pabrik-pabrik proses pengolahan minyak bumi dan gas, pabrik gula, kelapa sawit, juga industri makanan dan minuman sampai kerumah sakit ketel uap ini masih dipergunakan, atau dengan kata lain pemakaian ketel uap ini cukup luas meliputi industri besar, menengah maupun kecil. Ketel uap merupakan kesatuan alat-alat yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap pada tekanan dan temperatur tertentu. Untuk mengubah air menjadi uap dibutuhkan sejumlah kalor. Kalor yang diperlukan diambil dari gas hasil pembakaran atau gas asap (*flue gas*). Karena temperatur gas asap lebih tinggi dari pada temperatur air/uap, maka ada perpindahan kalor dari gas asap ke air/uap.

Bila bahan bakar di campur dengan oksigen pada temperatur di atas harga tertentu (temperatur nyala) maka akan terjadi reaksi pembakaran. Pembakaran yang terjadi menghasilkan gas temperatur tinggi. Karena oksigen murni harganya mahal dan udara sekeliling mengandung oksigen dengan kadar cukup tinggi (21 % mole atau 23 % massa) maka untuk pembakaran digunakan udara dan bukan oksigen murni. Bila H₂O cair di ubah menjadi H₂O uap pada tekanan yang sama (pada ketel uap) maka tingkat energi H₂O uap lebih besar dari pada H₂O cair. Untuk mencapai hal tersebut ditambahkan sejumlah kalor.

Dengan semakin luasnya penggunaan ketel uap seperti dijelaskan diatas, salah satu ketel produk baru jenis ketel uap MINI (*Multi Inter-steps Cros Non Intersection*) telah diprosuksi dan di uji coba di Balai Besar Teknologi Energi, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, dimana pipa-pipa saling bersilangan tanpa adanya pertemuan susunan. Pipa-pipa yang saling bersilangan tersebut dimaksudkan untuk mencapai kemampuan (performansi) yang selalu baik pada saat digunakan dengan bahan bakar apapun juga, misalnya minyak tanah, kayu, batok kelapa ataupun batu bara. Ketel uap jenis ini telah dipakai di industri tempe/tahu. Keuntungan yang dapat diperoleh dengan penggunaan ketel uap MINI tersebut yakni selain harga yang relatif lebih murah juga dapat melakukan penghematan bahan bakar hingga 50 – 60% dibandingkan dengan menggunakan ketel uap lain di industri tempe/ tahu.

Selain harga yang terjangkau, kehandalan dari suatu produk merupakan hal yang sangat penting untuk dipertimbangkan. Untuk itu upaya menghindarkan setiap

kegagalan atau kerusakan yang mungkin terjadi harus senantiasa ditingkatkan. Secara umum faktor penyebab kegagalan pipa ketel uap sangat bervariasi mulai dari korosi lokal sampai merata, oksidasi serta *overheating*.

Guna menjamin layanan purna jual produksi ketel uap, serta untuk pengembangan desain maka setiap keluhan dari pemakai akan segera di respons. Berdasarkan data yang diperoleh dilapangan, salah satu dari ketel uap yang diproduksi yang digunakan oleh industri tahu/tempe mengalami kerusakan pada bagian pipa-pipa penghasil uap. Untuk mengetahui penyebab kerusakan tersebut serta informasi lain yang dianggap perlu guna pengembangan desain maka penelitian ini sangat penting untuk dilakukan dengan pendekatan ilmu material (material science).

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui penyebab terjadinya kerusakan pada pipa penghasil uap yang terdapat pada ketel uap MINI melalui pemeriksaan terhadap perubahan kekerasan dan struktur mikro material pipanya.

BAHAN DAN METODE

Data Teknis Lapangan

Spesimen uji yang digunakan untuk penelitian ini terdiri dari : salah satu pipa ketel uap yang mengalami kerusakan (pipa gagal) dan pipa baru dari jenis yang sama yaitu material menurut ASTM adalah A-120. Data teknis ketel uap : kapasitas : 100– 120 kg uap/jam, tekanan uap (keluar): 1,5 kg/cm² abs, temperatur uap (keluar) 120^oC, diameter luar pipa (OD): 34 mm, dan tebal: 3,4 mm. Media pada sisi luar pipa adalah gas bakar/api dan sisi dalam : air + uap.

Pipa ketel uap MINI yang digunakan adalah pipa dengan sambungan las yang memiliki struktur mikro yang tidak seragam karena adanya daerah yang terpengaruh panas akibat proses pengelasan. Menurut standard ASTM untuk pipa A-120 terdiri dari 2 jenis yaitu pipa tanpa sambungan (seamless tube) dan pipa dengan sambungan las. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini adalah material pipa yang baru A-120 sebanyak 6(enam) potong dengan ukuran panjang masing-masing sekitar 6 cm seperti terlihat pada Gambar 1, yang dipanaskan di dalam tungku, dan pipa yang baru 1 (satu) potong dengan ukuran panjang sekitar 8 cm.

Material uji lainnya adalah pipa gagal (rusak) dengan panjang sekitar 40 cm, dan

dari bagian pipa tersebut kemudian dipotong sekitar 4 cm pada daerah yang mengalami perubahan bentuk seperti pada Gambar 2.



Gambar 1
Benda uji pipa baru



Gambar 2
Pipa yang gagal

Proses Perlakuan Panas

Tujuan perlakuan panas yang dimaksudkan disini adalah untuk mengetahui pengaruh temperatur pemanasan terhadap perubahan yang terjadi pada material, ditinjau dari sifat kekerasan dan struktur mikro. Temperatur pemanasan di dalam tungku untuk masing-masing benda uji adalah 140, 200, 300, 400, 550 dan 700 °C. Perubahan sifat yang terjadi pada proses perlakuan panas disebabkan oleh terjadinya perubahan struktur mikro logam tersebut selama proses pemanasan dan pendinginan. Perubahan struktur mikro ini sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia dari logam atau paduannya, serta jenis proses laku panas yang dialaminya.

Prosedur Pelaksanaan

Untuk proses perlakuan panas, 6 (enam) buah spesimen uji pipa baru masing-masing dipanaskan pada suhu yang berbeda yaitu 140, 200, 300, 400, 550, dan 700 °C di dalam tungku pemanas. Temperatur awal sama dengan temperatur sekelilingnya 28°C. Proses pemanasan berlangsung hingga mencapai temperatur yang diinginkan, dan pada temperatur ini

suhunya dipertahankan selama 24 jam. Proses pendinginan berlangsung di dalam tungku yakni dengan cara mematikan tungku hingga temperaturnya mencapai temperatur sekelilingnya. Pengerjaan ini dilakukan di B2TE, BPPT.

Karakterisasi

Karakterisasi dilakukan terhadap pipa baru dan pipa gagal (bekas pakai), untuk melihat struktur mikro serta mengidentifikasi fasa awal material baru dan sejauh mana perubahan yang terjadi setelah proses pemanasan, mencakup : uji komposisi, pengukuran dimensi, uji kekerasan, dan uji metalographi.

Beberapa alat uji yang digunakan antara lain: Emision Spectrometer merek Metorex, Dial Caliper buatan Mitutoya, Vickers Hardness merek Frank Fino Test, Tungku Pemanas merek Fisher Scientific, Metalloplane Microscope serta alat analisa mikro SEM dan EDS.

Untuk benda uji pipa gagal, pengukuran kekerasan dilakukan pada bagian pipa yang menggelembung (*bulging*) dan pada bagian yang tidak menggelembung yaitu sekitar 30 cm dari lokasi menggelembung. Selain dengan cara pengukuran kekerasan potongan melintang, untuk benda uji pipa gagal di ukur juga kekerasan pada bagian potongan memanjangnya.

Pemeriksaan metalographi (pengamatan struktur mikro) bertujuan untuk mengetahui perbedaan struktur matrik pipa A-120 yang baru, pipa hasil perlakuan panas dan pipa gagal.

Untuk benda uji yang mengalami perlakuan panas dan pipa baru, titik-titik pemotretan dilakukan pada daerah WM, HAZ, BM dari potongan melintang.

Untuk benda uji pipa gagal, titik-titik pemotretan dilakukan seperti pada lokasi yang menggelembung dan pada bagian yang tidak menggelembung yaitu sekitar 30 cm dari lokasi tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi

Uji Komposisi

Hasil uji komposisi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1.
Komposisi Kimia Pipa Baru dan Pipa Gagal

Posisi	Kekerasan (HV)
WM	115
HAZ	110
BM	98
Rata-rata	107.7

Perbandingan komposisi kedua pipa, tidak menunjukkan perubahan yang berarti atau dapat dikatakan sama, karena masih sesuai dengan standard ASTM untuk material A-120. Porsentase maksimum yang dipersyaratkan C = 0,20 % ; Mn = 1,20 %; Si = 0,10 %; P = 0,045 % dan S = 0,045 %.

Pengukuran Dimensi.

Tabel 2.
Dimensi Pipa Bekas Pakai dan Ketebalan Deposit.

Lokasi (derajat)	Dia.luar (mm)	Tebal Pipa (mm)	Tebal deposit (mm)
0	34.35	3.4	5.6
45	35.05	3.35	5.5
90	35.25	3.25	5.45
135	34.95	3.4	5.6
Rata-rata	34.90	3.39	5.54

Tabel 3.
Dimensi Pipa Gagal dan Tebal Deposit di Jarak 30 cm dari *Bulging*

Lokasi (derajat)	Dia.luar (mm)	Tebal Pipa (mm)	Tebal deposit (mm)
0	33.25	3.35	2.85
45	33.15	3.3	2.7
90	33.5	3.45	2.8
135	34	3.4	2.6
Rata-rata	33.38	3.38	2.74

Tabel 4.
Kekerasan Pipa Gagal Pada Potongan Melintang

No	Element (%)										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	Nb	S	P	Fe
P.Baru	0,12	0,12	0,36	0,0027	0,018	0,0004	0,030	0,0025	0,015	0,028	99,52
P.Gagal	0,063	0,039	0,24	<0,0027	<0,018	0,035	0,026	0,0036	0,0096	0,040	99,64

Dari Tabel tersebut di atas dapat dilihat bahwa pada dasarnya kekerasan pipa pada keadaan normal (tanpa perlakuan panas) pada daerah WM (Weld Metal), HAZ (Heat Affected Zone) dan BM (Base Metal)

Data teknis pipa yang baru memiliki diameter luar 34,0 mm, diameter dalam 27,2 mm dan tebal pipa 3,4 mm.

Dari Tabel.3 menunjukkan bahwa diameter luar pipa telah mengalami perbesaran, hal ini juga dapat dilihat pada Gambar 2, dan perbesaran yang terjadi adalah (34,90 – 34,0 = 0,90 mm). Tebal pipa mengalami penipisan (3,40 – 3,39 = 0,01 mm), dan *scale* (deposit) yang terbentuk menempel pada dinding dengan ketebalan rata-rata 5,54 mm.

Pada lokasi 30 cm dari *bulging* disepanjang pipa, ukuran diameter pipa luar mengalami penipisan sebesar (34,0 – 33,48 = 0,52 mm), demikian juga halnya tebal pipa berkurang sebesar (3,40 – 3,38 = 0,02 mm), dan deposit yang terbentuk menempel pada dinding dengan ketebalan rata-rata 2,74 mm (Tabel 3).

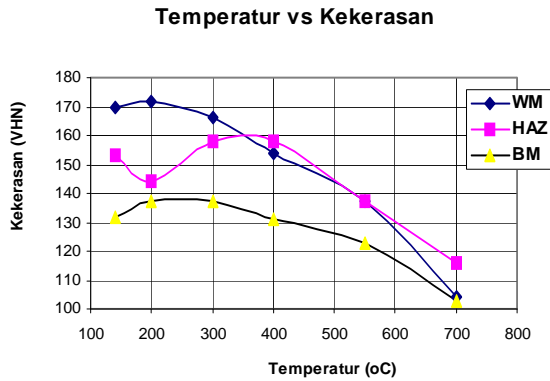
Dari kedua Tabel tersebut di atas terlihat bahwa tebal deposit yang terbentuk di sepanjang pipa memberikan hasil yang sangat berbeda. Hal tersebut dimungkinkan terjadi oleh karena pemasangan pipa didalam ketel uap pada posisi miring–vertikal, sehingga laju pembentukan endapan deposit pada bagian bawah akan lebih cepat dari pada lokasi 30 cm ke bagian atasnya

Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan metode Vickers (HVN). Hasil yang di dapat untuk benda uji yang tidak mengalami perlakuan panas ditunjukkan pada Tabel 4.

adalah berbeda. Demikian juga halnya pada pipa yang mengalami perlakuan panas, dimana angka kekerasan yang paling besar terdapat pada daerah lasan (WM), dan angka kekerasan paling rendah terdapat

pada metal dasarnya (BM). Dengan semakin meningkatnya suhu maka angka kekerasannya akan semakin menurun, dan penurunan angka kekerasan yang signifikan terjadi pada temperatur 550 dan 700 °C, seperti pada Gambar 3.



Gambar 3.
Grafik Hubungan Kekerasan Terhadap Kenaikan Suhu

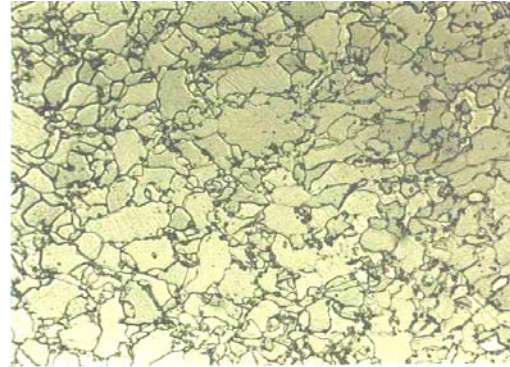
Berdasarkan hasil pengukuran nilai kekerasan cenderung lebih rendah pada permukaan luar.

Uji Metalografi.

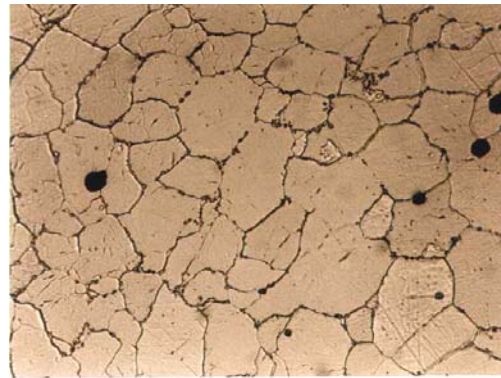
Hasil photo metalographi untuk pipa baru, pipa yang mengalami perlakuan panas dan pipa gagal dapat dilihat pada Gambar 4, 5 dan Gambar 6.



Gambar 4.
Photo Struktur Mikro Pipa Baru pembesaran 500 x dan dietsa nital 2 %.



Gambar 5.
Photo Struktur Mikro Pipa Dengan Perlakuan Panas T 700 °C Pembesaran 500 x dan dietsa nital 2 %.



Gambar 6.
Photo struktur mikro pipa bekas pakai Pembesaran 500 x dan dietsa nital 2 %.

Dari photo struktur mikro diatas, terlihat bahwa secara keseluruhan untuk daerah WM, HAZ dan BM memberikan hasil yang berbeda-beda untuk setiap benda uji .

Dari photo struktur mikro pipa baru Gambar 4, berdasarkan⁷⁾ adalah ferit (terang) dan perlit (hitam), dimana fasa perlit dalam fraksi kecil pada matriks ferit. Hal yang sama juga terlihat pada pipa baru yang mengalami perlakuan panas. Pada Gambar 5, telah terjadi perbedaan struktur mikronya, yaitu adanya pembulatan karbida. Menurut²⁾ Karbida sferoidit merupakan dispersi dari partikel yang bulat dalam matriks ferit, dan dapat menurunkan kekuatan baja (baja menjadi lunak).

Pada Gambar 6 terlihat bahwa ukuran butir lebih besar bila dibandingkan dengan pipa baru ataupun pipa baru yang mengalami perlakuan panas, dalam hal ini struktur mikro pipa yang pada awalnya adalah ferit-perlit telah berubah menjadi butiran ferit yang membesar. Menurut⁷⁾ dari peristiwa pertumbuhan butir seperti diameter butir menjadi bertambah besar sehingga secara total mengurangi jumlah batas butir.

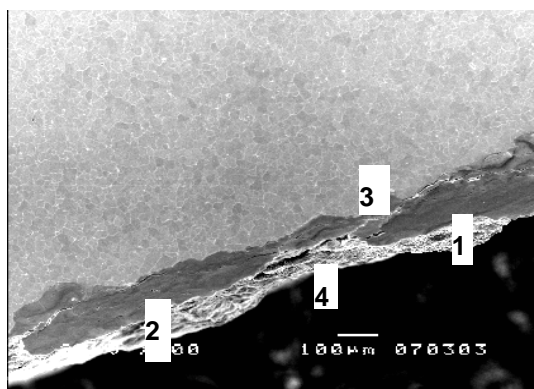
Berkurangnya jumlah batas butir tersebut secara total juga akan mengurangi energi batas butir. Semakin besar diameter butir akan semakin kecil energi total batas butir. Dengan demikian apabila diameter butir semakin besar akan semakin kecil energi yang dibutuhkan untuk mendeformasikan bahan tersebut. Tingkat kekerasan dari suatu bahan diukur dari katahanan bahan terhadap deformasi plastis.

Dari gambar 6, telah terbentuk lapisan oksidasi pada suhu tinggi. Menurut⁸⁾, pada saat oksidasi besi di udara pada suhu tinggi, maka akan terjadi pertumbuhan lapisan *scale* (deposit), dan pada suhu diatas 570 °C rangkaian lapisan oksidasi di dalam deposit akan menjadi FeO, Fe₂O₃, dan Fe₃O₄, dengan FeO selanjutnya ke metal.

Perbesaran butiran merupakan akibat pengaruh suhu tinggi yang terperangkap pada permukaan pipa ketel uap. Kenaikan suhu tersebut terjadi akibat adanya kotoran atau kerak yang menempel pada permukaan pipa bagian dalam^{7,8)}. Kerak yang menempel akan mengganggu daya hantar panas dan menyebabkan terjadi pemanasan lokal, akibatnya panas yang mengalir dari ruang bakar terhambat dipermukaan pipa dan terjadi proses difusi pada permukaan pipa tersebut, sehingga energi panas banyak terbuang dan terjadi perbesaran butir.

Analisa Mikro Dengan SEM Dan EDS

Lokasi untuk identifikasi struktur mikro pipa bekas pakai bagian diameter luar dan hasil analisa mikro dengan EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7
Hasil Analisa EDS Diameter Luar Pipa Gagal

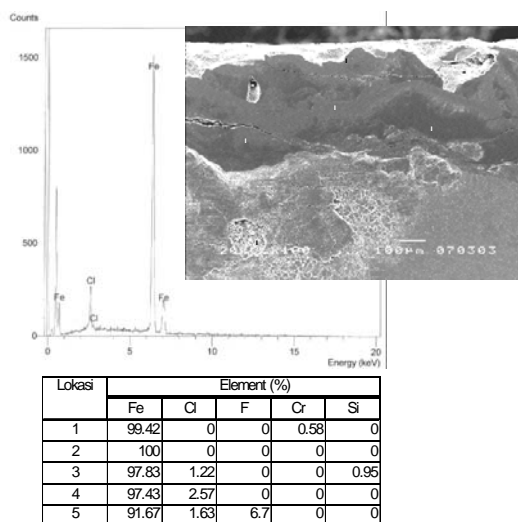
Data hasil analisa mikro (Tabel 5), pada lokasi 1 (Gambar 7), hanya terdapat unsur Fe (94,76 %) dan Cl (5,24 %) dan nilai persentase unsur Fe sangat tinggi bila dibandingkan unsur Cl. Hal yang sama juga terjadi pada lokasi 2 dimana unsur Fe (97,04 %) dan Cl (2,96 %) . Pada lokasi 3 yang terdapat hanya unsur Fe (100 %) saja. Sedangkan pada titik 4 terdapat unsur Co (57,89 %) dan (Al.42,11 %)

Tabel 5.
Kandungan Unsur pada Titik Pemotretan

Lokasi	Elemen (%)			
	Fe	Cl	Co	Al
1	94.76	5.24	0	0
2	97.04	2.96	0	0
3	100	0	0	0
4	0	0	57.89	42.11

Lokasi untuk identifikasi struktur mikro pipa gagal bagian diameter dalam dan hasil analisa mikro dengan EDS , dapat dilihat pada Gambar 8.

Dari hasil analisa mikro (Gambar 8), pada lokasi 1 hanya terdapat unsur Fe dan Cr dengan persentase Fe yang cukup besar (99,42 %). Pada lokasi 2 hanya terdapat unsur Fe saja (100 %), sedangkan pada lokasi 3 terdapat unsur Fe (97,83 %), Cl (1,22 %) dan Si (0,95 %). Pada lokasi 4 terdapat unsur Fe (97,43 %) dan Cl (2,57 %) serta pada lokasi 5 terdapat unsur Fe (91,67 %), Cl (1,63 %) dan unsur F 96,7 %).



Gambar 8
Hasil Analisa EDS Diameter Dalam Pipa Gagal

Pembahasan.

Dari hasil pemeriksaan terhadap pipa gagal, terlihat bahwa lapisan kerak yang terbentuk dan menempel pada bagian permukaan diameter dalam cukup tebal yakni rata-rata 5,54 mm (Tabel 2). Dari hasil pengamatan secara visual serta dari pengukuran yang dilakukan, maka diperoleh tebal lapisan kerak paling besar berada pada bagian bawah pipa dengan pemasangan pada posisi miring-vertikal di dalam ketel uap.

Dari teori sistem perpindahan panas ketebalan lapisan kerak (deposit) dan jenis lapisan sangat mempengaruhi terhadap sistem perpindahan panas. Pada lapisan kerak yang semakin tebal, maka panas yang tertahan akan semakin meningkat atau panas yang disalurkan untuk pembentukan uap akan semakin menurun. Banyaknya panas yang tertahan, yang terjadi akibat pembakaran di ruang bakar secara kontinyu dan dalam jangka waktu yang lama akan menyebabkan suhu pipa semakin meningkat.

Berdasarkan data pemakaian, bahwa ketel uap telah dioperasikan sekitar satu tahun maka diperkirakan yang terjadi adalah spheroidisasi karbida ketika berlangsung dekomposisi perlit. Menurut Ref.^{8,9,10} pada saat terjadinya kenaikan temperatur pada material pipa yang dioperasikan pada suhu 540 – 727 °C untuk baja karbon / baja paduan rendah, seringkali terjadi proses pembulatan karbida yang dapat menurunkan kekuatan atau menaikkan tingkat keuletan baja (baja menjadi lunak).

Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa kekerasan akan berkurang dengan semakin meningkatnya temperatur. Dan berdasarkan Tabel 4, kekerasan pipa gagal telah mengalami penurunan yang signifikan.

Suhu yang relatif tinggi menurut ref. 6 sekitar 925 – 1050 °C menyebabkan kemungkinan terjadinya proses difusi pada sisi bagian luar pipa. Pada proses ini, unsur karbon yang terdapat pada lapisan permukaan pipa bagian luar terdifusi keluar meninggalkan ikatannya dengan besi, sehingga butiran ferit menjadi membesar^{7,10}. Hal ini juga dibuktikan bahwa pada hasil analisis komposisi kimia jumlah kandungan unsur karbon mengalami pengurangan (lihat Tabel 5). Menurut persentase karbon menurut Ref.^{8,9} dapat menurunkan kekerasan pipa.

Pada pipa ketel uap bagian luar juga telah terjadi proses oksidasi pada suhu tinggi, hal ini dibuktikan dengan hasil pemeriksaan EDS, dimana ikatan kimia yang terbentuk adalah Fe₂O₃, dengan komposisi

yang cukup besar. (Gambar 7). Aliran air/uap dalam pipa, kadang-kadang membawa unsur ikutan yang selanjutnya membentuk deposit dan menempel pada permukaan dalam pipa, dan dari hasil pemeriksaan terhadap kerak/deposit yang menempel pada pipa, unsur ikutan tersebut adalah Na, Mg, Si, Ca dan Fe (Gambar 8).

Dengan demikian proses terjadinya kerusakan pada pipa ketel uap, dari hasil analisis diketahui bahwa kerusakan diawali dengan terbentuknya lapisan kerak pada permukaan pipa yang selanjutnya diikuti dengan adanya proses kimiawi antara permukaan pipa dengan lapisan kerak yang dipacu oleh pemanasan lokal yang cukup lama selama operasi. Sedangkan pada sisi pipa bagian luar, kerusakan juga diakibatkan oleh proses kimiawi antara gas CO₂ atau O₂ dengan dinding pipa, sehingga bentuk struktur mikro berubah dari butiran ferit-perlit menjadi butiran ferit yang membesar dan lunak.

Dengan perubahan struktur mikro seperti diatas dan pada pengoperasiannya pada suhu tinggi akan terbentuk voids pada batas butir (grain boundary) yaitu adanya tegangan yang terjadi yang diakibatkan oleh gerakan yang mengalami hambatan, dimana lama kelamaan voids (cavity) tersebut bergabung membentuk *creep cavitation*².

Dengan proses kerusakan yang terjadi seperti tersebut di atas, dan pada operasi ketel yang menghasilkan uap pada suhu 120 °C, berdasarkan tabel uap pada suhu tersebut tekanan uap yang terjadi di dalam pipa adalah sekitar 2 bar yang dapat menyebabkan pipa menjadi *bulging*. Harga tersebut sangat kecil jika dibandingkan dengan yield strength minimum berdasarkan ASTM untuk jenis material A-120 sebesar 195 N/mm.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis terhadap karakterisasi pipa baja karbon rendah yang digunakan pada ketel uap, bahwa kegagalan dimungkinkan terjadi diawali dengan terbentuknya lapisan deposit yang menempel pada permukaan dalam pipa yang dihasilkan dari air umpan. Deposit yang menempel tersebut menyebabkan proses pindah panas ke air akan semakin berkurang seiring dengan laju pembentukannya. Hal ini akan menyebabkan suhu pipa disekitarnya akan meningkat (*overheating*). Pada suhu yang semakin meningkat tersebut kemudian terjadi proses oksidasi dan diikuti dengan perubahan struktur mikro yaitu terjadinya

proses dekomposisi fasa perlit menjadi ferit + sferoidal carbides. Pada keadaan ini akan menyebabkan kekuatan pipa menjadi menurun (baja menjadi luanak). Sehingga pada tekanan sekitar 2 bar dapat menyebabkan terjadinya deformasi yang mengakibatkan pipa menjadi *bulging*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan di B2TE dan di B2TKS BPPT atas bantuannya pada saat pengujian dilakukan serta kerja sama yang baik yang sudah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Mawardi Silaban. "Fenomena Kegagalan Pada Ketel Uap Akibat Korosi Dan Long Term Overheating". *KOROSI, Vol.20 Nomor 1, p 11-18*. 2011.
2. Metallography and Microstructures, ASM Handbook, Vol. 9, ASM International, Materials Park, Ohio. 2010
3. M. K. Karthikeyan, R. K. Gupta, V. Rajesh, B. R. Ghosh, "Microstructural Investigation on Failure of Internal Drive Shaft", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, December 2007, Volume 7, Issue 6, pp 429-433.
4. Marina Banuta, Isabelle Tarquini, "Fatigue Failure of a Drive Shaft", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, April 2012, Volume 12, 2, pp 139-144.
5. Hucinska Joanna "Influence of sulphur on high temperature degradation of steel structure in the refinery Industry". *Advance In Materials Science* vol. 6 No 1(9). June 2009.
6. Robert D. Port and Harvey M. Hero, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, 2nd Edition Hard Cover, Mc Graw Hill Book Company, Inc, New York, 2011.
7. Malek, M. A. "Power Boiler Design, Inspection, and Repair": ASME Code Simplified. Michigan University. Mc. Graw – Hill, 2005.
8. Metal Handbook Of ASM, "Metallography", Vol 9, Ninth Edition, American Society for Metals, Ohio, 2008.
9. ASM Handbook,"Failure Analysis and Prevention". Vol. 11, Formerly Ninth Edition, Metal Handbook, 2008.
10. Anonim Ahmad, J, dkk,"Failure Investigation on rear water wall tube of boiler". *Engineering Failure Analysis* 16 : 2325-2332, 2009.
11. Bulloch, J.H., Callagy, A.G, Scully, S., Greene, A. "A Failure analysis and remnant life assessment of boiler evaporator tubes in two 250 MW boiler. *Engineering Failure Analysis* 16 : 775-793, 2009.