

PEMAHAMAN CIRI-CIRI PERMUKAAN PATAHAN DAN STRUKTUR MIKRO BAHAN UNTUK MENGUNGKAP PENYEBAB KEGAGALAN PADA PIPA *SUPERHEATER*[#]

Agus Suprpto^{*}

ABSTRAK

Hampir setiap tenaga ahli teknik selalu ingin menghindari kegagalan suatu komponen/pipa yang dapat mengakibatkan kemacetan dalam industri, yang mana bisa menimbulkan kerugian-kerugian yang tidak diinginkan, contohnya biaya perbaikan dan penggantian komponen membengkak, hilangnya waktu kerja, apabila kegagalannya fatal bisa menimbulkan bencana bahkan memakan korban luka-luka/meninggal dan kerusakan gedung. Oleh karena itu tenaga ahli teknik harus memahami ciri-ciri permukaan patahan dan struktur mikro bahan untuk mengungkap penyebab kegagalan pipa. Dengan diketahui penyebabnya diharapkan tidak terulang lagi kegagalan pada tempat yang sama. Kegagalan pipa *superheater* diawali oleh *creep*, diikuti *thermal fatigue* dan *stress corrosion cracking* dan akhirnya oleh *local overheating*.

ABSTRACT

Failure is an unplanned occurrence which every engineer wants to avoid. Failure of component can lead to discontinue in industry operation. Serious failure can cause accidents resulting in injuries or deaths, or property damage and involve losses having serious economic consequences. The common approach can soon become costly in purchasing of replacement parts, repair cost, and downtime. Therefore, studies of the fracture surface and microstructure features are important to identify the causes of failure. Understanding the causes of failure which can lead to correction of the problem and preventive of recurrence of the failure. The failure of superheater tube was initiated by creep, followed by thermal fatigue and stress corrosion cracking, and finally local overheating.

PENDAHULUAN

Fractography adalah ilmu yang mempelajari ciri-ciri permukaan patahan untuk memberikan informasi yang diperlukan dalam mengidentifikasi model kegagalan. Informasi tersebut umumnya diperoleh dengan pengamatan secara visual dan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Ciri-ciri permukaan patahan sering menunjukkan awal retakan dan arah penjalaran retakan.

Metallography digunakan untuk menentukan apakah komponen/pipa mendapat perlakuan panas yang tepat atau pipa tersebut mengalami panas berlebihan selama beroperasi. Peranan *metallography* dan *fractography* adalah sangat penting dalam menganalisa kegagalan untuk membantu mengungkap penyebab kegagalan.

Pengamatan suatu variasi mekanisme patahan skala mikro pada pipa *superheater* yang telah gagal semacam *crazing cracks*, *grain boundary voids*, *intergranular cracks*, *multi-branch crack tips*.

TUJUAN

Tujuan dari makalah ini menjelaskan ciri-ciri permukaan patahan dan struktur mikro yang berkaitan dengan penyebab kegagalan pada studi kasus pipa *superheater*. Kegagalan tersebut hasil kombinasi dari *thermal fatigue*, *stress corrosion cracking* dan *stress rupture*.

[#]Dipresentasikan pada *PIPING TECHNOLOGY SEMINAR 2000, 1-2 November 2000 Widyaloka Convention Hall Universitas Brawijaya Malang*

^{*}Dr. Ir. Agus Suprpto, MSc, Dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang

METODOLOGI

Sampel penelitian ini adalah pipa *superheater* yang digunakan di pabrik kertas yang telah beroperasi selama 10 tahun, yang mana bahan bakar yang dipakai adalah oli. Bahan pipa adalah SA 213 dengan diameter luar 51 mm dan ketebalan dinding 3,2 mm. Adapun temperatur uapnya adalah 330°C serta tekanan operasinya 45 bar.

Pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Sedangkan *fractography* menggunakan pengamatan secara visual dan SEM.

HASIL DAN ANALISA

Fractography

Berdasarkan hasil studi kasus pada pipa *superheater* untuk pabrik kertas menunjukkan bahwa pengamatan secara visual pada permukaan pipa *superheater* menunjukkan adanya *crazing* yang disebabkan oleh *thermal fatigue* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1. *Thermal fatigue* disebabkan oleh tegangan thermal siklik. Nampaknya tegangan thermal siklik tersebut menyebabkan terjadinya awal retakan pada permukaan luar pipa yang berhadapan langsung dengan gas hasil pembakaran (*fireside surface*). Retak *thermal fatigue* tersebut dapat terjadi oleh tegangan yang disebabkan penarikan kembali pada saat ekspansi ketika ada variasi temperatur dalam sistem. Menurut Van Tonder dan Van Rooyen (1985), retak *thermal* ini sering disebut dengan *heat checking* atau *craze cracking*. *Thermal fatigue* dapat juga terjadi karena siklik dari *oxid* pada *grain boundaries* (batas butir), yaitu pembentukan, patah dan terjadi pembentukan kembali (Metal Handbook, 1975). Gambar 1 menunjukkan pembentukan *oxid* hasil reaksi antara unsur gas pembakaran dan baja pada permukaan luar pipa (*fireside surface*).

Metallography

Salah satu sisi dari pusat permukaan patahan pada pipa *superheater* menunjukkan struktur mikro *martensit* dan *bainit* (Gambar 2). Struktur mikro ini menunjukkan bahwa temperatur logam mencapai 860°C di atas temperatur transformasi (723°C). Bukti tersebut menunjukkan bahwa *rupture* disebabkan oleh *local overheating*, hal ini dikarenakan panas yang diterima pipa *superheater* tidak seragam. Oleh karena itu, salah satu penyebab kegagalan kemungkinan pengaturan kondisi pengapian tidak tepat atau hasil *start-up* terlalu cepat. Untuk daerah yang tidak mengalami *rupture*, jaraknya sekitar 380 mm dari daerah *rupture*. Struktur mikronya terdiri dari penyebaran karbid yang merata dalam matrik *ferit*, hal ini menunjukkan bahwa waktu *overheating* di bawah temperatur transformasi (723°C) lama sekali sehingga menyebabkan terjadinya *spheroidization* karbid dalam matrik *ferit* (Gambar 3). Perubahan struktur mikro ini cenderung menurunkan kekuatan pipa *superheater*. Jika *overheating* tersebut berkelanjutan terus dapat membentuk *microvoid* pada batas butir (*grain boundary*) sebagai hasil dari *grain boundary sliding*. Selanjutnya *microvoid* tersebut tumbuh dan bertemu dengan *void* lainnya sehingga terjadi *intergranular cracking* (Metal Handbook, 1975). Menurut Wulpi (1985), pada umumnya laju *creep* yang rendah, waktu *rupture* yang lebih lama atau temperatur yang lebih tinggi mendukung terjadinya *intergranular fracture*. Ciri-ciri tersebut di atas adalah ciri *intergranular creep* sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2 dan 3. Dalam studi kasus ini tidak nampak *intergranular creep* bertipe *wedge*. Hal ini berbeda sedikit dibandingkan dengan pengujian *creep-thermal fatigue* yang dilakukan oleh Jamaliah dan Agus (1999) pada pipa *superheater* yang diuji pada temperatur maksimum 550°C dan temperatur minimum 420°C pada tegangan konstan 33.33 kg/mm². Hasilnya menunjukkan *phenomena* pembentukan awal retakan (*crack*) dapat dideteksi dengan mudah dengan menggunakan SEM (Gambar 4 dan 5). Awal retakan tersebut bertipe *cavity dan wedge intergranular*. Awal retakan bertipe *wedge intergranular* ini disebabkan oleh *grain boundary sliding* yang diblok pada *triple point* sehingga membentuk pemusatan tegangan,

phenomena ini ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan pada Gambar 5 menunjukkan bahwa pengintian retakan bertipe *cavity* disebabkan oleh adanya partikel pada *grain boundary*.

Stress corrosion cracking (SCC) pada permukaan pipa disebabkan oleh kombinasi kegiatan korosi dan tegangan tarik. Dalam penampang berskala mikro, ujung retakan menunjukkan bercabang banyak (*multi-branch*) pada permukaan pipa (Gambar 6). Menurut Colangelo dan Heiser (1974), *Stress Corrosion Cracking* umumnya dimulai pada permukaan sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 7. Ciri-ciri berskala mikro ini adalah karakteristik *Stress Corrosion Cracking* (Wulpi, 1985).

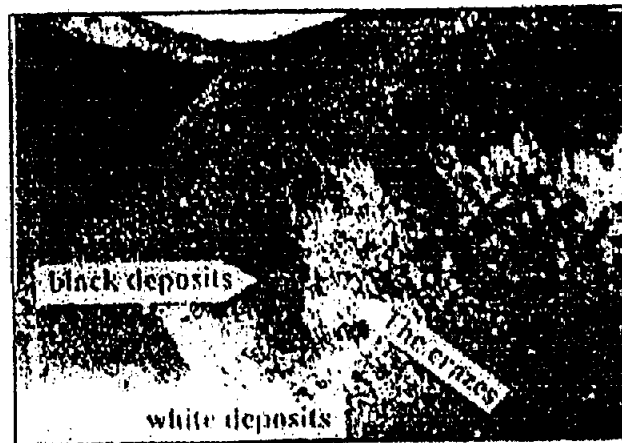
Kegagalan pipa *superheater* ini meliputi kombinasi dari *thermal fatigue*, *stress corrosion cracking* dan *stress rupture*.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisa pada studi kasus ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Kegagalan pipa *superheater* diawali oleh *creep*, diikuti *thermal fatigue* dan *stress corrosion cracking* dan akhirnya oleh *local overheating*.
2. Pembentukan retakan dimulai dari pengintian dan pertumbuhan *void* serta pertemuan antar *voids* pada *triple point* dan *grain boundaries*.
3. Terjadinya *spheroidization* karbid dalam matrik ferit.

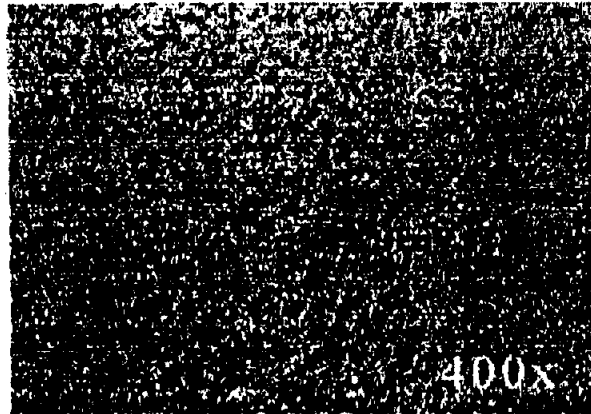
LAMPIRAN GAMBAR



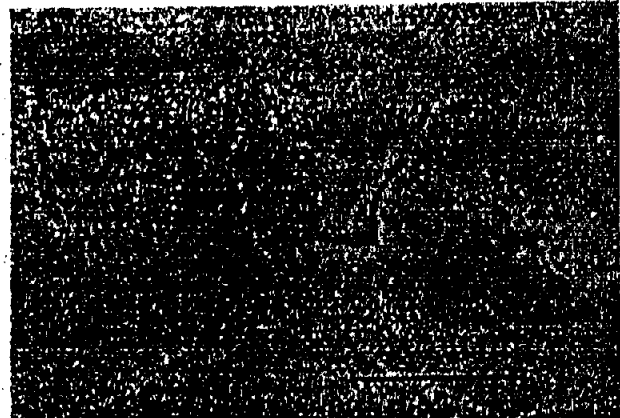
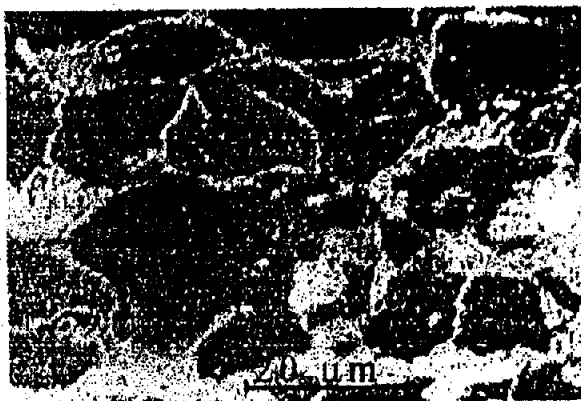
Gambar 1. Deposit dan crazes pada permukaan pipa *superheater*



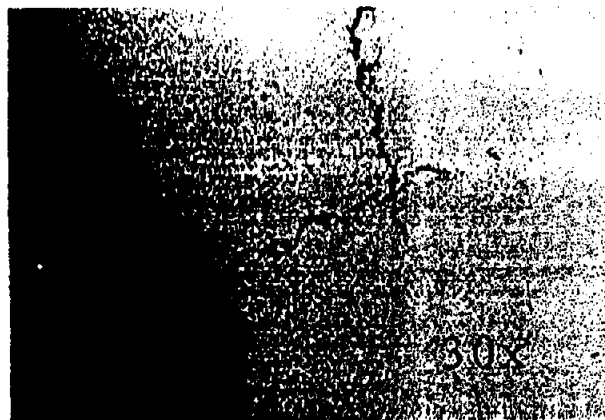
Gambar 2. Scanning electron micrographs, cavity intergranular crack dan grain boundary voids pada permukaan luar pipa *superheater*, yang mana strukturmikro terdiri dari *martensite* dan *bainite*



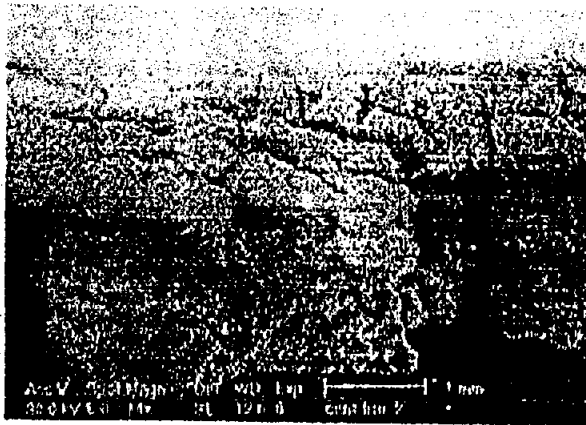
Gambar 3. *Optical micrograph*, strukturmikro karbid dalam matrik *ferite* pada daerah yang tidak mengalami *rupture* sekitar 380 mm dari daerah *rupture*



Gambar 4 dan 5. *Scanning electron micrographs*, awal retak bertipe *cavity* dan *wedge Intergranular* (sumber : Jamaliah Idris dan Agus Suprpto, 1999)



Gambar 6. Ujung retakan bercabang banyak pada permukaan pipa *superheater*



Gambar 7. Scanning electron micrographs, multiple cracks pada pusat permukaan Patahan pipa superheater

DAFTAR PUSTAKA

- Van Tonder J.A. and Van Rooyen G.T.(1985).” Preferential HAZ Cracking of Weldments Subjected to Thermal Fatigue.”, *Fracture and Fracture Mechanics, case studies*, Tait R.B. and Garrett G.G.(Eds). UK: Pergamon Press. 147
- Metals Handbook. (1975).”Failure Analysis and Prevention.” Vol. 10. 8th ed. USA: ASM. 340-341, 526, 529
- Wulpi. D.J.(1985).” Understanding How Component Fail.” USA : American Society for Metals.
- Jamaliah Idris and Agus Suprapto (1999).”Crack Mechanism in Creep-Thermal Fatigue of Low Alloy Steel Superheater Tube.” 8th Scientific Conference of The Electron Microscopy Society of Malaysia, Pahang Darul Makmur, Dec. 2-4
- Colangelo V.J. & Heiser F.A. (1974). “ Analysis of Metallurgical Failures.” USA : John Wiley & Sons, Inc. 200.

TANYA JAWAB

Mudjiono

Pada waktu *super heater* itu menggunakan oli bekas atau oli baru, setahu saya itu dengan menggunakan residu kemudian pengamatan dilakukan untuk strukturnya menggunakan SEM, itu diamati dimana SEMnya, karena saya sering kesulitan mencari fasilitas SEM itu, kemudian komposisi kimia deposit itu diamati atau tidak. Saya juga sering kesulitan untuk menentukan jenis strukturnya, itu *bainite* atau apa, karena *bainite* itu antara *martensite* dan *perlite*, bagaimana cara menentukan bahwa itu adalah *bainite*.

Luhur Wibowo dari PT Kaltim Methanol Industri

Penyebab *stress corrosion cracking* dan *fatigue corrosion* itu mengapa pada ciri-cirinya untuk *corrosion cracking* mengujung yang akhirnya dia menyebar, kemudian untuk *fatigue corrosion* itu tumpul, fenomenanya itu seperti apa.

Soepardjono dari Untag Surabaya

Pertama, dari kajian tadi apakah bisa ditambahkan penjelasan tentang perubahan fase, kenapa fase nya bisa sampai berubah seperti itu, kalau kita melihat diagram Fe_3C , pada berbagai suhu itu ada fase-fasenya meskipun komposisinya sama. Mungkin itu ada kaitannya yang bisa dijelaskan oleh bapak. Kedua, kenapa bapak mengambil pipa yang umurnya 10 tahun, barangkali itu merupakan masalah yang pantas untuk diteliti kalau merupakan ramalan umur *super heater* itu 20 atau 15 tahun, tapi kalau yang diteliti itu umurnya 10 tahun ya percuma karena memang sudah waktunya rusak.

Jawaban Agus Suprpto

Bahan bakar itu jenisnya banyak, kalau oil standarnya dari Pertamina, cuma masalahnya waktu saya mengamati dari industri itu tidak ada komposisi kimianya. Sebetulnya dari bahan bakar batu bara itu juga bisa, tergantung dari jenis *boilernya*. Kemudian mengenai SEM, memang betul alat ini mahal sekali, \pm pada tahun 1996/1997 sekitar 500 miliar yang kalau digunakan untuk beberapa orang saja akan rugi dan alat ini terkadang sering macet. Yang saya tahu dari berbagai perguruan tinggi yang ada di Indonesia baik di institusi yaitu LIPI, itu sering macet. Kemudian waktu saya ke ITS kebetulan alatnya juga sedang macet. Kemudian saya tanya di LIPI, tapi karena saya membutuhkan tempat *speciment* yang khusus, mereka tidak berani dan akhirnya saya tidak jadi di LIPI. Kemudian di Krakatau Steel ada juga alatnya tetapi *specimentnya* terlalu kecil. Akhirnya di tempat saya sendiri yaitu waktu belajar S_3 di Universitas Teknologi Malaysia di Johor, di situ juga ada dan juga sering macet, kalau mau menggunakan harus antri, hampir 20 orang mahasiswa antri. Kemudian saya disarankan ke NUS dan Nun Yang, tetapi biayanya sangat tinggi. Mengenai komposisi, saya tes pakai EDX, jadi SEM itu ada fasilitas sekaligus EDX (*Energy Deposite X-Ray*) yang menggunakan tingkat energinya untuk mengetahui unsur, langsung menggunakan spot. Dari situ kita tahu, kalau di situ hitam maka kita tembak yang daerah hitam, kita akan tahu komposisinya, dan kalau ingin yang global atau rata-rata maka spotnya dirubah. Di SEM itu ada pilihan, *avarage* atau spot, spot ini juga ada tingkatannya. *Sodium* dan *Panadium* itu berbentuk *Oksit* yang mana *Panadium* itu berbentuk *Pentoksit* (V_2O_5), yang kalau digabung dengan Na_2SO_4 , itu temperatur cairnya sampai $500^\circ C$ yang akan mempercepat proses korosi karena mencair lokal di situ. Kita harus jeli untuk menentukan jenis struktur *bainite*, karena bentuknya yang hampir sama, oleh karena itu kita perlu konfirmasi, bahwa ketangguhan dan kekuatan dibandingkan dengan *martensite* itu beda jauh, kalau *martensite* kekuatannya tinggi dan keras, kalau *bainite* sangat tangguh, jadi kekerasannya agak menurun dibandingkan dengan *martensite*, bentuk-bentuknya ada. Prinsipnya hampir sama dengan *perlite*, hanya

perbedaannya adalah pembentukan awal dari *cementite* ini. Jadi mekanismenya beda tapi unsurnya, *ferite* ini ada. Antara *perlite* dengan *bainite* mendekati sama, sesuai dengan yang saya coba pelajari.

Mengenai *stress corrosion cracking* yaitu ciri-cirinya, di ujung itu ada cabang-cabangnya (menjalar). Saya minta maaf belum bisa menjawab secara memuaskan karena pada saat dia merambat pada ujungnya, hal ini karena apa, sampai saat ini saya belum menyelidiki sampai ke situ, hanya ciri-cirinya yang saya pelajari, kalau *stress corrosion cracking*, dia kebanyakan memang bercabang pada ujungnya, sedangkan *corrosion fatigue* itu ujungnya tumpul, karena ada produk *corrosion* sehingga tidak bisa menyabang. Walaupun di sini ada korosinya juga, tetapi di sini ada kombinasinya. *Stress corrosion cracking* ini beban statis, lingkungan, dan bahan.

Mengenai diagram Fe_3C dan umur 10 tahun, di sini jelas ada perbedaan mengenai diagram Fe_3C , kalau ada unsur tambahan bisa mempengaruhi temperatur kritisnya, bisa turun bisa naik tergantung unsur paduannya, misalnya *Mangan*, ini bisa turun dan kadang-kadang berbahaya jika bertemu dengan *Sulfur* menjadi *Mangan Sulfid* yang temperatur cairnya juga rendah sehingga kena *Hot Spot*. Kemudian di diagram S ini juga mempengaruhi hidung S-nya yang bisa bergeser ke kiri dan ke kanan dan kalau baja paduan rendah, kadang-kadang karbonnya rendah, tapi bisa membentuk *martensite* karena ada unsur paduan yang menggeser hidung kurva tadi sehingga ada kesempatan untuk memotong, kalau terlalu menggeser ke kiri, dia akan memotong dan tidak bisa *martensite* di situ.

Umur di sini adalah studi kasus, kalau studi kasus kita tidak bisa memilih, lain halnya kalau kita eksperimen, kita bisa mensimulasi, baik itu jangka pendek maupun jangka panjang, tergantung pada beban dan temperaturnya. Kalau studi kasus itu susah, ya apa adanya. Biasanya, pada saat kita mengambil data ini, operator tidak melengkapi banyak data.