

ANALISA KEGAGALAN PIPA *HEAT EXCHANGER*

Hermawan Judawisastra, Arif Basuki, Mardjono Siswosuwarno

Program Studi Teknik Material, Kelompok Keahlian Ilmu dan Teknik Material,
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Ganesa 10, Bandung 40132, Indonesia
Tlp/Fax: 022-2508144, e-mail: hermawan.judawisastra@material.itb.ac.id

ABSTRAK

Sebuah heat exchanger pada sistem Melamine Crystalliser mengalami kerusakan akibat kebocoran pada pipa-pipa vertikal di dalamnya. Pada pipa tersebut terjadi pula penipisan setempat yang mencapai 60% dari tebal pipa. Material pipa adalah Stainless Steel 304L yang dilas. Pada saat alat ini bekerja, di dalam pipa Stainless Steel 304L mengalir melamine slurry sedangkan bagian luar pipa dialiri air pendingin. Analisis kegagalan (Failure Analysis) dilakukan untuk mencari penyebab kegagalan, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan agar masalah serupa dapat dihindarkan.

Langkah-langkah pemeriksaan meliputi penggunaan Dye Penetrant, pengamatan visual makroskopik dan mikroskopik, serta konfirmasi hasil pengamatan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) dan Energy Dispersion Spectroscopy (EDS). Rekomendasi untuk mencegah kegagalan yang sama terulang kembali diperkuat dengan percobaan solution treatment pada spesimen.

Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa kebocoran terjadi akibat retakan yang merambat dari dinding luar pipa dan menembus ke dalam dinding pipa. Pertumbuhan retakan terjadi di sepanjang batas butir yang disebabkan oleh intergranular corrosion yang merupakan akibat dari sensitisasi pada material pipa yang didukung oleh lingkungan korosif dari bagian luar pipa. Hasil pemeriksaan kadar kromium menggunakan SEM-EDS menunjukkan bahwa kadar berat kromium pada batas butir menurun menjadi 5% dibandingkan dengan 18% pada butir sekitarnya. Pemeriksaan metallografi memperlihatkan pula bahwa proses penipisan hanya terjadi pada bagian dalam dinding pipa, ditandai dengan lubang-lubang kecil akibat erosion corrosion yang disebabkan oleh terjadinya aliran turbulen dalam pipa. Lokasi penipisan setempat sesuai dengan daerah dimana aliran turbulen biasa terjadi.

Kata Kunci: analisis kegagalan, pipa, stainless steel, sensitisasi

1. Pendahuluan

Heat exchanger merupakan alat untuk mentransfer energi panas antara dua atau lebih zat (berbentuk fluida padat) yang memiliki temperatur berbeda, di mana biasanya kedua zat tidak bersentuhan secara langsung [1]. Penggunaan *heat exchanger* sangat luas, meliputi penggunaan dalam rumah tangga seperti pendingin ruangan dan lemari es, maupun dalam industri seperti industri kimia dan pertambangan. Berbagai kegagalan *heat exchanger* dalam industri telah terjadi dengan kasus yang bervariasi. [2, 3, 4, 5]. Kegagalan yang terjadi adalah sesuatu yang harus dihindari dan sudah seharusnya diantisipasi dalam desain awal, operasi serta pemeliharannya. Pada makalah ini akan dibahas analisa kegagalan (*failure analysis*) dengan modus kerusakan lain yang diakibatkan oleh kebocoran pada suatu bagian

pipa sistem *Heat Exchanger*.

Pipa *heat exchanger* yang mengalami kerusakan merupakan bagian vertikal dari sistem pendingin Melamine Crystalliser dalam proses produksi melamin. Bagian dalam pipa mengalirkan melamine slurry, sementara bagian luar pipa mengalami kontak langsung dengan air pendingin. Selain kebocoran, dari hasil pemeriksaan ultrasonik diperoleh data bahwa terjadi penipisan setempat yang mencapai 60% pada pipa tersebut. Sebagian besar penipisan ini terjadi pada daerah dekat lubang masuk pipa (200-300 mm dari lubang masuk).

Pipa yang mengalami kegagalan telah beroperasi selama delapan tahun, dan mulai mengalami kebocoran pada tahun ke-4 hingga tahun ke-6 masa operasi. Diketahui bahwa pipa terbuat dari material Stainless



Steel 304L yang dilas. Air pendingin yang dipergunakan telah diperlakukan secara kimiawi dengan menggunakan bahan-bahan *Phosphoric acid*, *zinc oxide*, dan *Calcium Hypochlorite*. Sistem *heat-exchanger* ini dioperasikan dalam batas temperatur yang aman dan sesuai dengan spesifikasi (kurang dari 200°C).

Analisa kegagalan dilakukan untuk mencari penyebab kegagalan, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan agar masalah serupa dapat dihindarkan.

2. Metodologi

Dalam bagian makalah ini dibahas langkah-langkah analisis untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan: “*what happened?*”, “*how it happened?*” dan “*why it happened?*”.

Langkah pertama yang dilakukan merupakan pemeriksaan dengan menggunakan *Dye Penetrant* untuk menentukan letak retak dan kebocoran pipa.

Pemeriksaan lebih lanjut meliputi pemeriksaan visual, makroskopik dan mikroskopik yang dilakukan untuk mengevaluasi bentuk dan modus kerusakan yang terjadi.

Unuk memperkuat hasil pemeriksaan, dilakukan konfirmasi dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* dan *Energy Dispersion Spectroscopy (EDS)*.

Rekomendasi untuk mencegah kegagalan yang sama teurlang kembali diambil berdasarkan analisa hasil pemeriksaan. Sebagai verifikasi rekomendasi tersebut, dilakukan *Solution Heat Treatment* [6, 7] pada sampel pipa di temperatur 1100°C.

3. Data dan Analisis

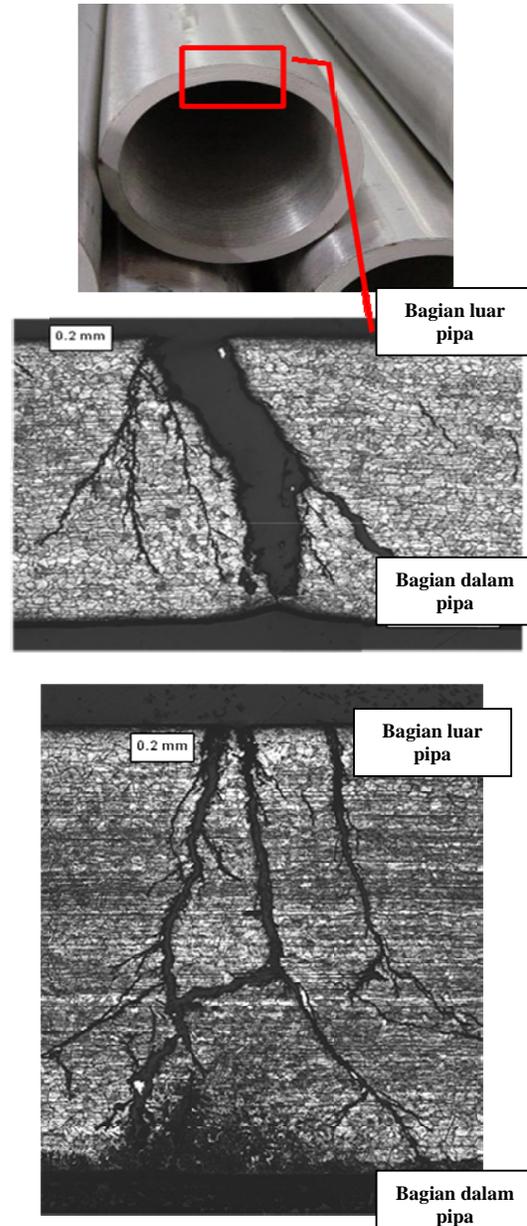
Pemeriksaan dan analisis kebocoran pipa

Hasil pemeriksaan menggunakan *Dye Penetrant* menunjukkan bahwa letak retakan tidak berada pada atau sekitar daerah pengelasan (Gambar 1).



Gambar 1. Hasil pemeriksaan dengan menggunakan Dye Penetrant untuk menentukan lokasi kebocoran

Selanjutnya dilakukan pemeriksaan visual mikroskopik pada daerah retakan yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa retak berawal dari dinding luar pipa yang merambat dan menembus kedalam dinding pipa.

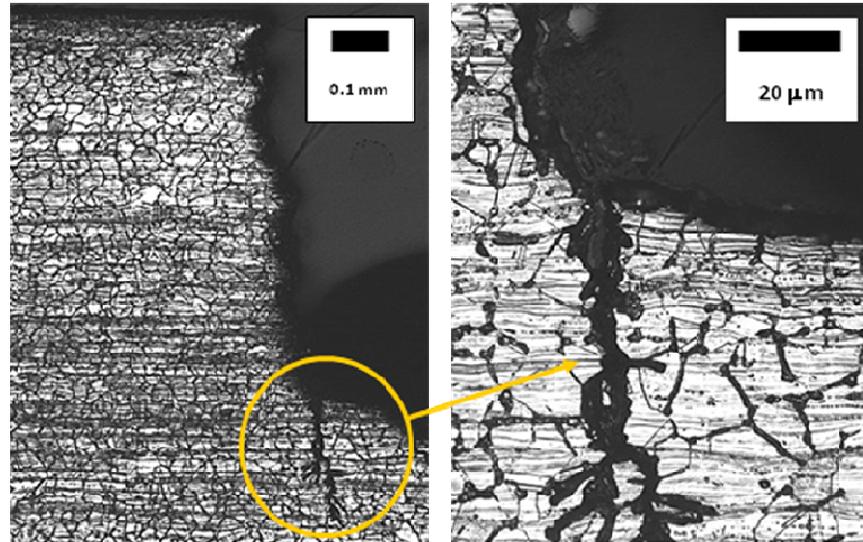


Gambar 2. Proses dan bentuk retakan pada pipa; retak berawal dari dinding luar

Penyelidikan lebih lanjut pada daerah retakan ditunjukkan pada Gambar 3. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa awal serta pertumbuhan retakan hanya terjadi di sepanjang batas butir yang berbentuk khas.



Fenomena “penyerangan” pada batas butir seperti ini disebabkan oleh suatu jenis korosi yang disebut sebagai *intergranular corrosion*.



Gambar 3: Struktur mikro daerah retakan menunjukkan bahwa retakan merambat melalui batas butir

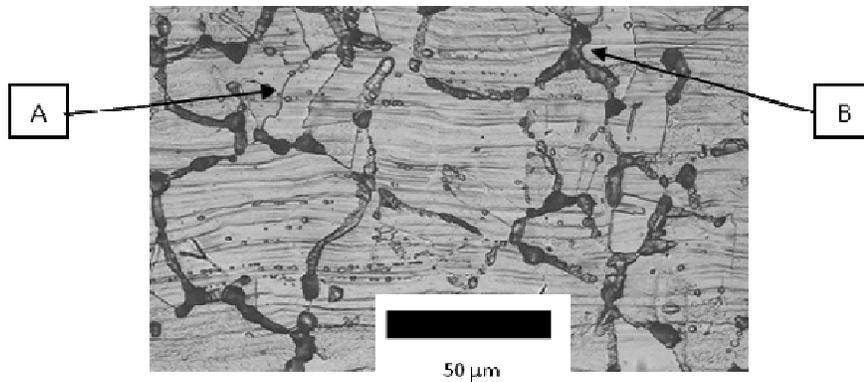
Stainless Steel 304L pada suhu rendah memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, namun pada suhu tinggi (antara 450°C – 850°C) rentan terhadap sensitisasi, yaitu presipitasi karbida yang kaya kromium di sekitar batas butir, yang berakibat berkurangnya kadar kromium pada daerah tersebut [7]. Selanjutnya apabila terpapar pada lingkungan yang korosif, batas butir ini akan lebih mudah terserang korosi sehingga *intergranular corrosion*.

Gambar 4 menunjukkan struktur batas butir material pipa. Daerah yang terkorosi terjadi di sekitar batas butir jenis B sedangkan batas butir yang normal adalah batas butir jenis A. Penebalan batas butir jenis B menyebabkan terjadinya penurunan kadar kromium dan mengakibatkan berkurangnya ketahanan korosi pada daerah tersebut.

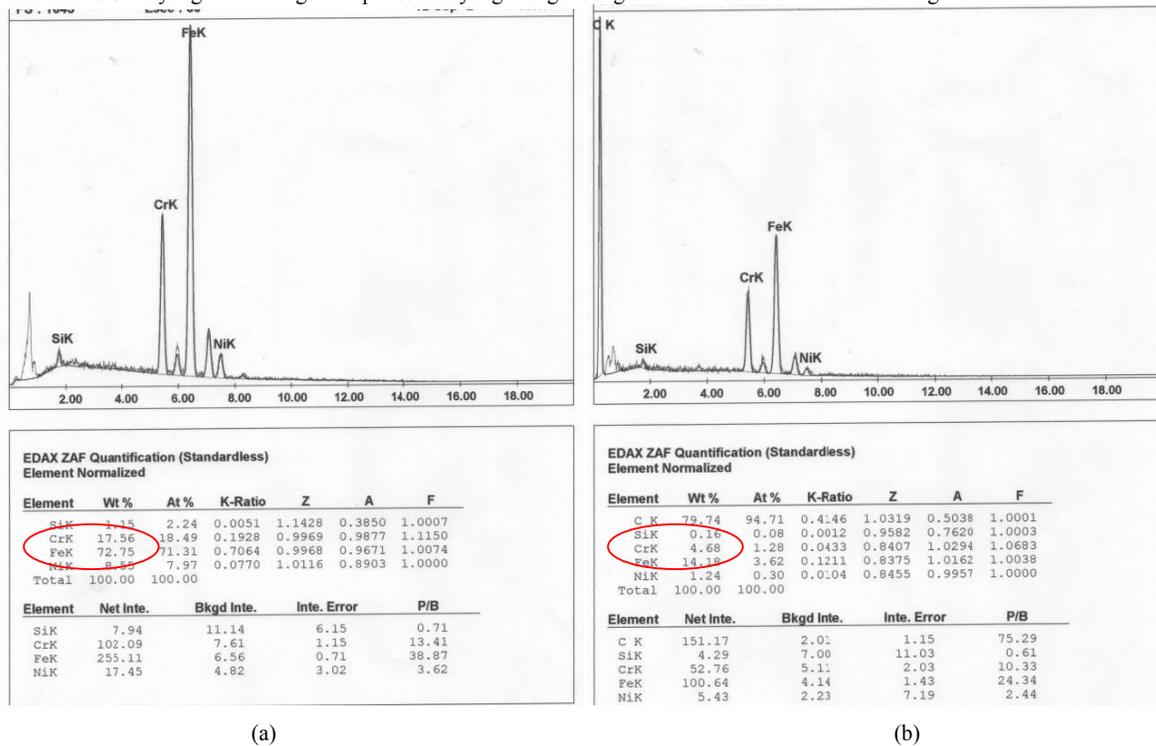
Terjadinya kondisi seperti ini pada batas butir material pipa didukung oleh mengalirnya air pendingin yang mengandung *Calcium Hypochlorite* pada bagian dinding luar pipa. Dilihat dari temperatur kerja *heat exchanger* ini, seharusnya material Stainless Steel 304L memiliki ketahanan yang baik terhadap bahan korosif tersebut [8]. Namun adanya sensitisasi mengakibatkan proses *intergranular corrosion* dapat terjadi dengan mudah.

Untuk memperkuat pendapat di atas, telah dilakukan pemeriksaan kadar kromium pada batas butir dan daerah butir sekitarnya dengan menggunakan SEM-EDS (Gambar 5). Pemeriksaan dengan SEM menunjukkan hasil yang sesuai serta menunjang hasil pemeriksaan struktur mikro. Dapat dilihat bahwa kadar berat kromium pada batas butir hanya 5%, dibandingkan dengan 18% pada butir sekitarnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.





Gambar 4. Gambar rinci dari struktur batas butir yang menunjukkan sensitisasi pada material pipa; A adalah batas butir yang normal; B adalah batas butir yang telah mengalami penebalan yang mengandung karbida kromium dan daerah dengan kadar kromium rendah



Gambar 5. Hasil SEM-EDS (a) Pada daerah butir normal; (b) Pada daerah batas butir yang mengalami penebalan

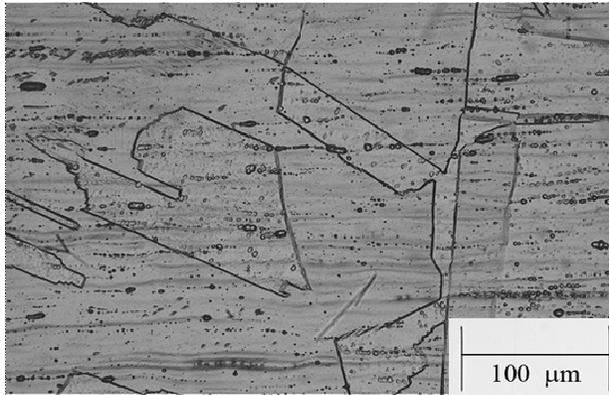
Berdasarkan analisis data mengenai penyebab kegagalan pipa, dapat disimpulkan bahwa sensitisasi telah terjadi pada pipa sebelum manufaktur *heat exchanger*. Untuk mencegah kegagalan yang sama terulang kembali, rekomendasi yang dapat diberikan adalah dengan melakukan *solution treatment* pada pipa terpasang atau pada pipa cadangan sebelum perbaikan *heat exchange*. *Solution treatment* dapat dilakukan pada

temperature 1050°C – 1150°C yang kemudian dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*quenching*) pada temperature kamar [7].

Konfirmasi hasil *solution treatment* terhadap spesimen ex pipa *heat exchanger* memperlihatkan batas butir yang mengalami penebalan akibat presipitasi karbida menjadi normal kembali. Metalografi hasil



solution treatment ditunjukkan pada Gambar 7 di mana tidak terlihat lagi adanya penebalan batas butir.

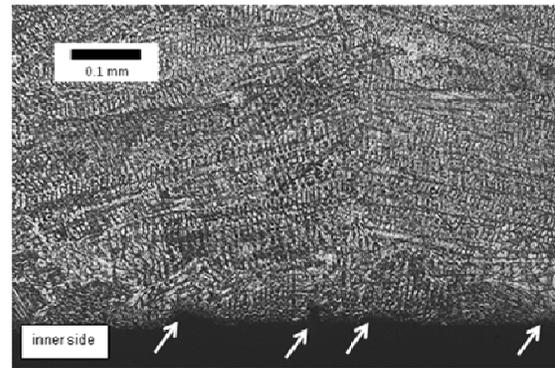


Gambar 7. Struktur mikro pipa setelah dilakukan solution treatment

Pemeriksaan dan analisis penipisan pipa

Hasil pengamatan metalografi pada dinding pipa yang mengalami penipisan setempat diperlihatkan pada Gambar 6. Pada daerah tersebut terlihat adanya lubang-lubang kecil yang secara teratur terdapat pada bagian dalam pipa dimana penipisan terjadi. Lubang lubang kecil ini tidak terdapat pada bagian pipa yang normal. Hal ini menunjukkan bahwa proses penipisan hanya terjadi pada bagian dalam dinding pipa, dan penipisan ini tidak berhubungan dengan kebocoran pipa.

Permukaan seperti ini dikenal sebagai hasil *erosion corrosion* yang merupakan permasalahan yang sering dialami pada pipa-pipa yang mengalirkan fluida dengan kecepatan tinggi [9]. *Erosion corrosion* pada penelitian ini disebabkan oleh terjadinya aliran turbulen yang mengakibatkan benturan yang kuat dari *melamine slurry* pada dinding dalam pipa. Lokasi penipisan setempat yang hanya 200-300 meter dari lubang masuk pipa sesuai dengan daerah dimana aliran turbulen biasa terjadi. Aliran turbulen dapat terjadi di daerah tersebut karena *melamine slurry* di dalam *heat exchanger* mengalir dari pipa besar (*exchanger head*) masuk ke dalam pipa yang berdiameter lebih kecil.



Gambar 6. Permukaan akibat *erosion corrosion* pada bagian dalam pipa; tanda panah menunjukkan lubang-lubang akibat koroosi erosi

4. Kesimpulan

Dari data dan analisis di atas, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kebocoran pada pipa *heat exchanger* disebabkan oleh retakan yang berasal dari dinding luar (bagian yang berhubungan dengan air pendingin) dan masuk menembus kedalam dinding pipa.
2. Keretakan pipa disebabkan oleh *intergranular corrosion* yang menyerang sepanjang batas butir yang tebal. Bagian tersebut mempunyai ketahanan koroosi yang rendah akibat adanya penurunan kadar kromium.
3. *Intergranular corrosion* ini merupakan akibat dari sensitisasi yang terjadi pada material pipa yang didukung pula oleh lingkungan yang korosif dari bagian luar pipa. Berkenaan dengan hal ini, disarankan untuk melakukan *solution heat treatment* pada material pipa.
4. Adanya penurunan kadar kromium pada batas butir telah ditunjang dengan hasil pemeriksaan SEM-EDS.
5. Penipisan setempat pada daerah dekat lubang masuk pipa merupakan hasil dari *erosion corrosion* yang terjadi karena terbentuknya aliran turbulen dari *melamine slurry* di dalam pipa.

Daftar Pustaka

- [1] Shah, R.K, Sekulić, Dušan P. , Fundamentals of Heat Exchanger Design, John Wiley and Sons, New Jersey (2003)
- [2] Hideo Kobayashia, Teruo Yoshiokab and Tatsumi Takehanac, Failure analysis of BLC heat exchanger, International Journal of Fatigue, Volume 20, Issue 2, March 1998, Pages 155-160.



- [3] A. Usmana and A. Nusair Khan, Failure analysis of heat exchanger tubes, *Engineering Failure Analysis*, Volume 15, Issues 1-2, January-March 2008, Pages 118-128
- [4] Song Hong Jian, Corrosion failure analysis of 304SS heat exchanger tubes in hot potassium carbonate solution, *Corrosion Science and Protection Technology*, Vol. 16, October 2004.
- [5] M. Mansoor, A. Tauqir, Failure analysis of heat exchanger tubes, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 8, 2008, Pages 434-44.
- [6] Xiaofei Yu, Shenhao Chen, and Liang Wang, *Effect of solution treatment conditions on the sensitization of austenitic stainless steel*, *Journal of the Serbian Chemical Society*, Vol. 74 (11), 2009, Pages 1293-1302.
- [7] H.S. Khatak, Baldev Raj, *Corrosion of Austenitic Stainless Steel*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, UK, 2002, Pages 117-138.
- [8] Craig, Bruce D., Anderson, David S, *Handbook of Corrosion Data*, ASM International, Ohio, 1995.
- [9] Pavarthavarthini, “*Corrosion of Austenitic Stainless Steel: Mechanism, Mitigation and Monitoring*”, ed. H. S. Khatak, Alpha Science International Ltd, Pangbourne, 2002, 117-138.

