

ANALISIS KERUSAKAN PIPA BAJA HP- MODIFIED UNTUK PADA INDUSTRI MIGAS

Ilham Hatta

Ahli Peneliti Utama Bidang Material B2TKS-BPPT
Komp. PUSPIPEK V.D-16 Setu, Tangerang Selatan 15310 BANTEN
Email: bataraquru57@yahoo.co.id

Naskah diterima 1 Agustus 2013; direvisi 20 Agustus 2013; disetujui terbit 29 Agustus 2013

Abstract

Steel pipes in the hydrogen plant of an oil and gas refinery burst after they were in operation for about 5 years. Eight out of 144 pipes on the west side of the plant burst, while there was no one burst out of 144 pipes on the east side. The pipe material was of high alloy steel HP-modified type. A metallurgical approach was used to analyze the failure in which macro-fractography, metallography, chemical composition, and hardness test methods were employed. The analysis showed that the pipes failed due to excessive local heat and very fast cooling.

Keyword : *hp-modified, failure analysis, hydrogen plant, oil and gas*

FAILURE ANALYSIS STEEL PIPES HP- MODIFIED IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

Abstrak

Pipa baja *hydrogen plant* yang terdapat pada unit pengolahan minyak dan gas meledak / pecah setelah dioperasikan selama kurang lebih 5 tahun. Pada saat ledakan terjadi ada 8 batang pipa *hydrogen plant* mengalami kerusakan dari 144 batang pipa yang terpasang pada sisi barat. Sedangkan pada sisi timur juga terdapat 144 batang pipa, hanya saja tidak satupun yang mengalami kerusakan pada saat terjadi ledakan. Pipa yang terpasang pada *hydrogen plant* terbuat dari baja paduan tinggi tipe HP-Modified. Berdasarkan pendekatan ilmu bahan, maka metode analisis kerusakan yang digunakan, adalah makro fraktografi, metalografi, komposisi kimia dan uji kekerasan. Hasil analisis menunjukkan bahwa pipa tersebut rusak akibat faktor panas setempat yang berlebihan dan adanya pengaruh pendinginan yang sangat cepat.

Kata kunci : hp-modifikasi, analisis kerusakan, pabrik hidrogen, minyak & gas

1. PENDAHULUAN

Hydrogen plant merupakan suatu unit peralatan yang memproduksi gas hydrogen (H_2) pada tekanan dan suhu tinggi. Suhu operasinya berkisar antara $800^{\circ}C$ hingga $1000^{\circ}C$. Pipa yang digunakan terbuat dari jenis material "Heat Resisting" grade HF, HK-40, HP modified atau HP micro-alloy dengan proses produksi melalui sentrifugal casting. Pada saat pemasangan komponen *hydrogen plant*, pipa merupakan salah satu komponen yang terpasang dengan jumlah yang cukup banyak dan dalam waktu yang bersamaan antara satu dengan yang lainnya. Jumlahnya

tergantung pada produsen pemasok *hydrogen plant* tersebut^[1].

Pada *hydrogen plant* ini jumlah pipa yang terpasang untuk satu unitnya sebanyak 288 batang pipa yang terbagi dalam dua sisi, yaitu 144 batang pipa pada sisi timur dan 144 batang pipa disisi barat, dan pipanya terpasang tegak (Row I dan II). Dalam mendisain suatu pipa yang beroperasi pada suhu tinggi ($0,4 \div 0,5$ kali titik cair dalam derajat kelvin), umur disainnya adalah 100.000 jam^[2,3] (11,4 tahun) dan tentunya harus dioperasikan dalam kondisi aman, akan tetapi pada kenyataannya banyak pipa dari *hydrogen plant* yang meledak sebelum umur disainnya

tercapai, sehingga mengakibatkan kerugian dan kecelakaan yang cukup besar.

Untuk menghindari hal tersebut, maka sumber penyebab kerusakan harus ditemukan sedini mungkin, dan bahkan dikatakan terlambat apabila telah ditemukan salah satu dari pipa dalam kondisi cacat atau rusak^[3,4]. Oleh karena itu untuk mengantisipasi hal tersebut, maka perhatian industriawan yang bergerak dalam bidang perminyakan atau petrokimia, keamanan dan kelayakan operasi terhadap suatu peralatan atau komponen, berkembang kearah tinjauan terhadap umur operasi, sebab yang telah beroperasi pada suhu tinggi, kondisinya sudah mengalami perubahan secara perlahan-lahan, sehingga terjadi pengurangan / fraksi umur terhadap umur disainnya. Untuk mengoptimalkan umur operasi pipa pada *hydrogen plant*, tentunya tatacara pengoperasian peralatan tersebut harus sesuai dengan *standard operational procedure (SOP)*. Tatacara ini harus dilaksanakan sebaik-baiknya, dan tentunya dengan dukungan alat kontrol suhu, tekanan dan gaya yang benar dan akurat^[1].

Pada makalah ini disajikan suatu hasil penelitian dan pengujian terhadap suatu permasalahan pipa *hydrogen plant* yang mengalami kerusakan berupa *crack*, *bursting* dan bahkan ada yang putus setelah beroperasi selama 5 tahun dan telah mengalami 11 kali start-stop atau emergency stop (gambar 1). Jumlah pipa yang rusak sebanyak 8 batang dari 288 batang pipa yang terpasang. Semua pipa yang mengalami kerusakan terletak pada sisi barat (*row II*). Tujuan yang dicapai dari hasil penelitian ini diharapkan memberikan masukan kepada pemilik pipa dan peralatan *hydrogen plant* untuk mengetahui penyebab kerusakan pipa, agar nantinya berhati-hati dalam mengoperasikan peralatan tersebut dan hasil penelitian ini diharapkan juga bermanfaat untuk mencegah terjadinya kerusakan pada tahap berikutnya.

Hydrogen plant berfungsi untuk memproduksi gas hidrogen melalui proses *steam/ hydrocarbon* (gas alam) didalam pipa *hydrogen plant* dengan katalis nikel-alumina pada suhu mulai 538 °C sampai dengan 846 °C. Katalis berfungsi untuk menyerap panas (endotermis) yang diterima oleh pipa selama proses produksi terjadi.

Sumber panas yang dialami oleh pipa *hydrogen plant* berasal dari gas buang (*waste gas*) dengan suhu operasi berkisar antara 800°C hingga 1000°C. Pipa *hydrogen plant* merupakan suatu komponen yang terpasang tegak lurus pada *header* dengan jumlah 144 batang untuk masing-masing sisi (*row*). Pada sisi timur mulai dari nomor 1 sampai nomor 144, sedangkan pada sisi barat mulai dari nomor 145 sampai dengan nomor 288 unit. Didalam proses produksi pipa *reformer*

secara terus menerus mengalami pemanasan dan tekanan yang sesuai dengan *standard operational procedures (SOP)*, dan berdasarkan disain pipa yang beroperasi pada suhu tinggi umurnya berkisar 100.000 jam (11,4 tahun). Penyebab kerusakan pada pipa *reformer* yang dapat memperpendek umur pipa adalah^[1] :

Seringnya *start-stop*, sebab pada saat di stop kemungkinan yang dapat dialami oleh pipa *hydrogen plant*, adalah laju pendinginan yang sangat cepat, sehingga merubah bentuk dan karakter strukturmikro dari material pipa dari liat menjadi keras dan getas, ini dapat terjadi, apabila jendela yang terdapat pada *hydrogen plant* cepat-cepat dibuka dan tidak memperhitungkan arah dan kencangnya angin yang berhembus, karena pada umumnya kilang pengolahan minyak dan gas serta industri petrokimia berada tidak jauh dari garis pantai. Pada saat di *start* kemungkinan yang dapat dialami oleh pipa tersebut adalah tekanan akibat gaya turbulensi aliran uap/gas yang mengalir, sehingga mengakibatkan adanya cacat awal (*initial crack*) pada bagian sisi dalam.

Kontrol suhu dan gaya (*counter weight*) pada pipa *reformer* yang kurang akurat, bila alat pengontrol suhu kurang akurat, artinya didalam *firebox* atau *heater reformer* terjadi suhu yang tidak seragam, dan hal ini tergantung dari disain *heater* yang ada, disamping itu *thermocouple* yang ada pada *heater* tidak selalu tepat mewakili suhu yang terbaca pada ruang kontrol atau yang dialami pada pipa tersebut, maka dapat terjadi *over heating* pada titik-titik atau lokasi tertentu dari pipa yang ada pada *hydrogen plant*. *Over heating* ini mempercepat terjadinya *creep* model *globular cavities* dan mempercepat penjarangan retak yang telah terjadi sebelumnya, serta menimbulkan oksidasi dan serangan korosi suhu tinggi (*intergranular high temperature corrosion*). Sedangkan bila alat pengontrol gaya (*counter weight*) kurang akurat, maka dapat mempercepat terjadinya kerusakan *creep* model *wedge cavities*, dan perpaduan antara suhu tinggi dan gaya yang kurang akurat mengakibatkan terjadi pembengkokan yang tidak beraturan dengan sangat cepat pada pipa tersebut.

Pengaruh lingkungan pada pipa *hydrogen plant* yang sangat korosif dapat memperpendek umur, biasanya ini terjadi bila material yang akan dimasukkan kedalam pipa tidak terkontrol dengan baik, akan tetapi juga karena pengaruh suhu tinggi, sehingga unsur-unsur yang mempercepat terjadinya korosi seperti Cl (*chlor*), H (*hydrogen*), O (*oksigen*), dan S (*sulfur*) dapat dengan mudah masuk kedalam celah strukturmikro dan merusak bentuk serta karakter strukturmikro. Biasanya pada suhu tinggi bentuk kerusakan yang sering terjadi akibat pengaruh lingkungan, suhu dan

waktu adalah : *carburization, Decarburization, hydrogen embrittlement*, oksidasi, dan lain-lain.

2. BAHAN DAN METODE

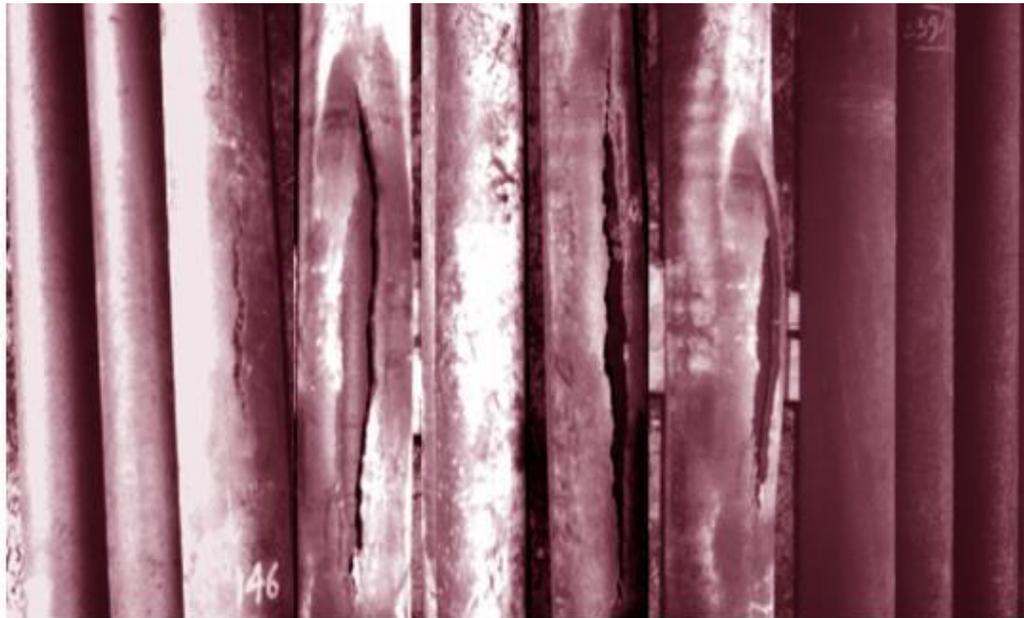
Pada penelitian ini yang menjadi obyek analisis adalah salahsatu pipa *hydrogen plant* dari 8 pipa yang telah meledak/pecah saat dioperasikan. Pipa tersebut telah beroperasi selama 5 tahun. Adapun data teknis dari pipa tersebut adalah :

Material Pipa : *Cast tube 25 Cr-35 Ni Nb*
Dimensi : 101,6 I/D with 10,92 MSW (*after machining internally*)
Design Pressure & Temp : 26,3 kg/cm² & 974°C
Hardness/Tensile Strength : HV 180 / 440 Mpa
0,2% YS-Limit/ : 220 MPa

Chemical Composition : 0,4%C, 1,5%Si, 1,5%Mn, 25%Cr, 35%Ni, & 1,5% Nb

Metode yang digunakan untuk menganalisis penyebab kerusakan pada pipa *hydrogen plant* meliputi :

- Pemeriksaan makro-fraktografi, yaitu pengambilan foto makro dengan menggunakan mikroskop optik *metalloplan* hingga perbesaran maksimal 50 kali. Pemeriksaan ini dilakukan untuk melihat awal retakan dan penjalaran retak yang terjadi pada pipa hasil potongan melintang.
- Pemeriksaan Metalografi, yaitu pengambilan gambar struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik perbesaran 100 kali. Pemeriksaan ini dilakukan untuk melihat bentuk struktur mikro material pipa dan jenis patahan yang terjadi pada pipa tersebut.
- Pemetaan distribusi produk korosi pada daerah patahan/retakan dengan menggunakan Electron Probe X-ray Micro Analysis (EPMA). Pemetaan ini dilakukan untuk melihat distribusi unsur yang terdapat pada daerah retakan pipa yang mengalami kerusakan.
- Pemeriksaan komposisi kimia dengan menggunakan *optical emmisien spectrometer*, dilakukan untuk menentukan prosentase berat unsur yang terdapat material pipa tersebut.
- Uji kekerasan dilakukan untuk menentukan kekerasan pipa yang telah mengalami kerusakan dengan metode *Hardness Vicker's* (HV).



Gambar 1. Bentuk retakan yang terjadi pada pipa baja *HP-Modified* yang terletak pada sisi barat *hydrogen plant*.

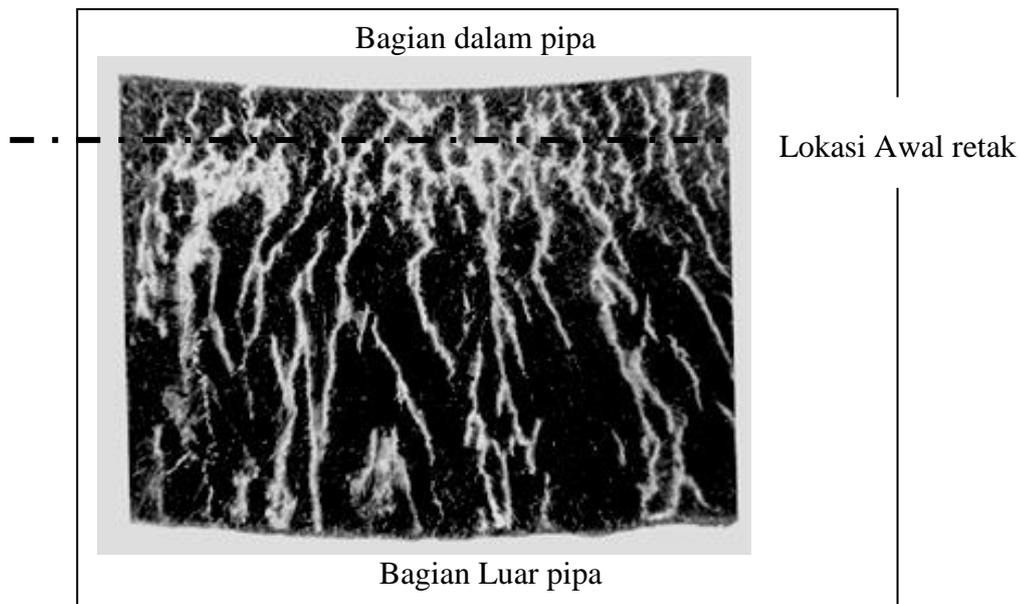
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Makro Fraktografi

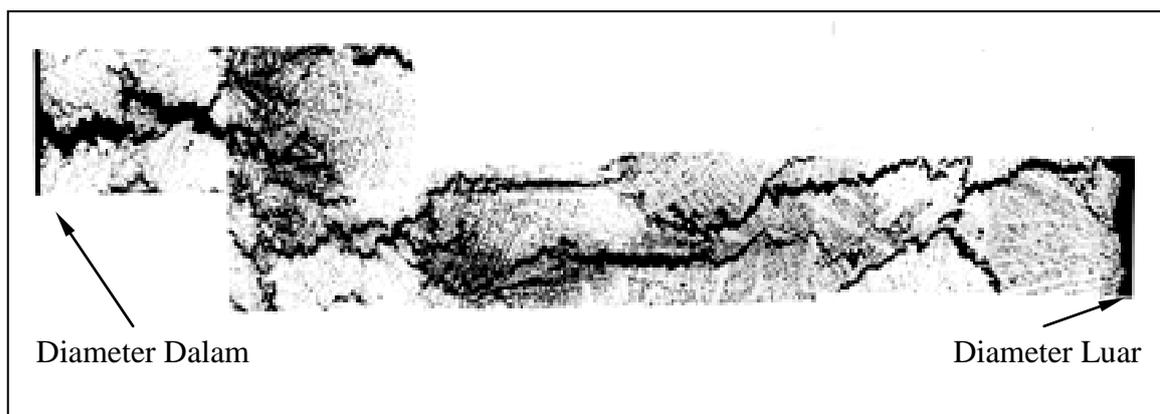
Pipa *hydrogen plant* yang mengalami kerusakan secara visual hasil potongan melintang nampak adanya retak kesegala arah (gambar 2) yang berawal dari ketebalan $\frac{1}{4}$ dari diameter dalam pipa (sekitar 3 mm) , kemudian menjalar ke arah diameter dalam dan diameter luar. Hasil makro fraktografi ini nampak setelah diperbesar sampai 5 kali dan dietsa dengan aqua regia. Selanjutnya untuk melihat bentuk retakan dengan jelas maka

potongan tersebut diperbesar hingga 25x dan diberi cairan etsa *aqua regia* (gambar 3).

Secara visual patahan pipa memperlihatkan bentuk patahan yang rapuh (Brittle Fracture), hal ini nampak pada arah ketebalan pipa yang tidak banyak berubah atau tidak terjadi deformasi. bentuk retakan yang terjadi pada butiran strukturmikro adalah retakan intergranular, yang menandakan bahwa material pipa rusak setelah mengalami perapuhan yang kemungkinan diakibatkan oleh laju pendinginan yang sangat cepat ($>50^{\circ}\text{C}/\text{jam}$), dan adanya faktor *creep void* akibat suhu tinggi yang berkepanjangan saat dioperasikan^[5,6,7].



Gambar 2. Hasil Makro-fraktografi potongan melintang pipa yang mengalami kerusakan, nampak penjaran retak (warna putih) berpusat pada $\frac{1}{4}$ dari bagian dalam pipa, perbesaran 5 X.



Gambar 3. Bentuk strukturmikro penjaran retak yang terjadi pada pipa *hydrogen plant*, nampak retak menjalar dari arah diameter dalam menuju ke arah luar pipa. Matriks butiran austenit terpisah atau retak pada batas butir (*intergranular*) yang tidak beraturan, perbesaran 25 X, etsa : Aqua regia.

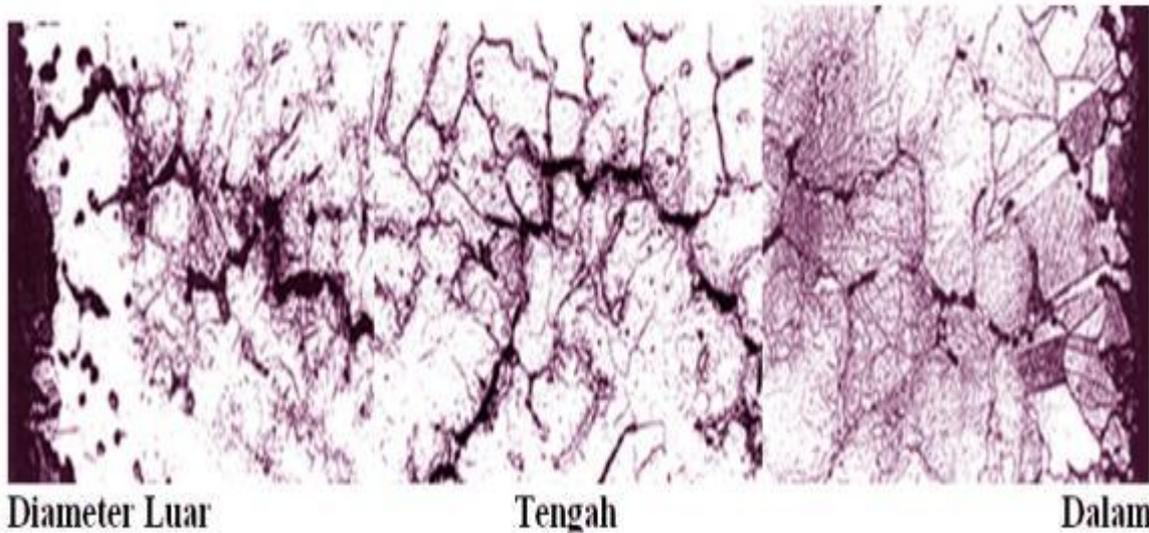
3.2. Analisis Mikro Struktur

Hasil metalografi yang dilakukan pada potongan pipa yang telah rusak, disajikan pada gambar 3, 4 dan 5, gambar tersebut adalah hasil potongan melintang pipa yang telah mengalami kerusakan. Pada gambar 3, nampak bentuk retakan menjalar dari arah diameter dalam menuju ke arah luar tube. Pada sisi diameter dalam, lebar retakan lebih besar dibandingkan dengan sisi diameter luar dan bentuk patahan merupakan bentuk *intergranular fracture* dengan penjaralan retak sepanjang batas butir.

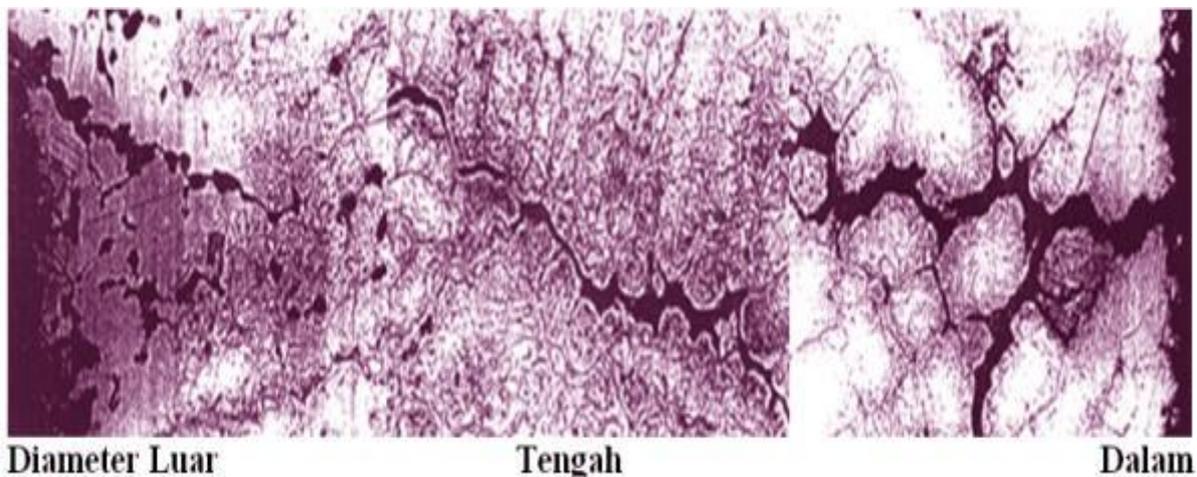
Karbida yang biasanya nampak pada butiran autenit HP *Modified* tidak nampak lagi, Akibat adanya pengaruh panas yang berlebihan, maka

karbida tersebut bergeser ke batas butir dan menimbulkan retak intergranular^[7].

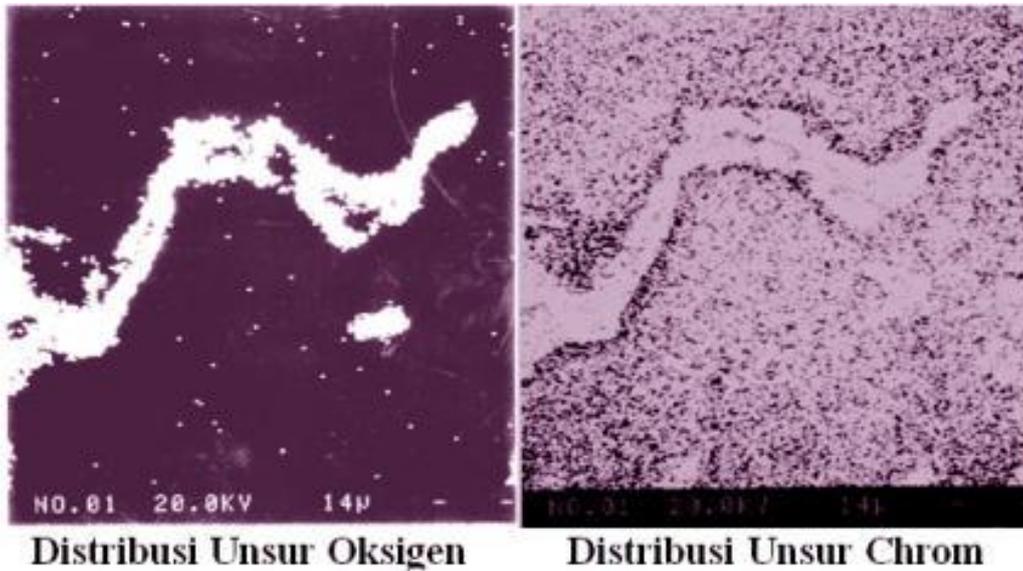
Gambar 4, sisi diameter dalam pipa bentuk struktur mikronya mengalami perubahan dari bentuk struktur austenit menjadi austenit *twin*, dan *creep void* yang nampak pada batas butir merupakan retak mikro, sedangkan pada sisi tengah bentuk retakannya nampak dengan jelas dan sisi diameter luar selain nampak dengan jelas adanya retak juga terjadi korosi akibat suhu tinggi. Gambar 5, merupakan bentuk struktur mikro pada lokasi yang lain dari pipa. Gambar ini nampak bahwa pada sisi diameter dalam terjadi retakan *inter-granular* yang cukup besar, sedangkan pada sisi tengah juga telah terjadi retakan, dan sisi diameter luar selain nampak dengan jelas adanya retak juga terjadi korosi akibat suhu tinggi.



Gambar 4. Bentuk struktur mikro pipa *hydrogen plant* potongan melintang, nampak makro *crack intergranular creep void* disemua bagian pipa, perbesaran 100x dengan etsa aqua regia.



Gambar 5. Bentuk struktur mikro pipa *hydrogen plant* potongan melintang, nampak makro *crack intergranular creep void* disemua bagian pipa, perbesaran 100x dengan etsa aqua regia.

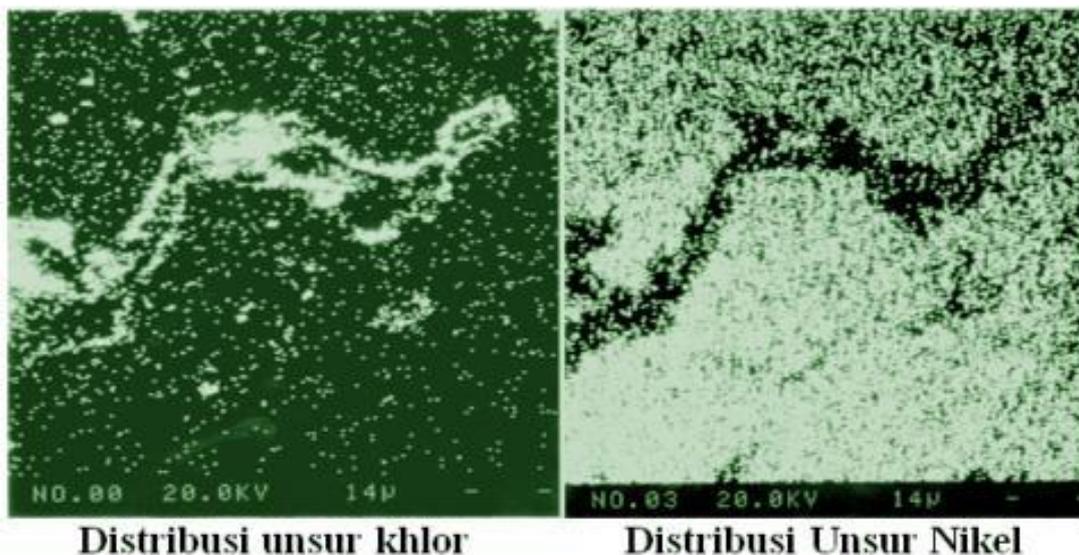


Gambar 6. Pemetaan distribusi produk korosi disekitar retakan, nampak distribusi unsur Oksigen [O] dan Chrom [Cr] dengan menggunakan EPMA.

3.3. Analisis Korosi Pada Daerah Retakan Pipa

Untuk mengidentifikasi ada tidaknya produk korosi atau oksidasi yang terjadi pada daerah retakan pipa, maka digunakan alat EPMA^[8]. Hasil Identifikasi ini disajikan dalam bentuk pemetaan sebaran unsur yang terdapat pada daerah celah retakan dan hasilnya nampak pada gambar 6 dan 7. Pada gambar 6, nampak hasil pemetaan adanya unsur oksigen dan unsur chrom disekitar lokasi retakan, sedangkan pada gambar 7,

ditemukan adanya unsur chlor pada celah retakan dan disekitar retakan juga ditemukan adanya unsur nikel. Pemetaan unsur nikel dan chrom juga dilakukan, hal ini perlu sebab kemungkinan besar adanya pengurangan unsur tersebut akibat oksidasi atau reduksi, sehingga jelas bahwa pada celah retakan juga ditemukan adanya partikel unsur chrom dan nikel walaupun tidak sepadat unsur chlor dan oksigen pada celah retakan tersebut.



Gambar 7. Pemetaan distribusi produk korosi disekitar retakan, nampak distribusi unsur Khlor [Cl] dan Nikel [Ni] dengan menggunakan EPMA.

3.4. Analisis Komposisi Kimia

Analisis komposisi kimia terhadap tube No. 179 dilakukan dengan optical emission spectrometer di B2TKS-BPPT, hasilnya disajikan pada tabel 1.

3.5. Analisis Hasil Uji Kekerasan

Hasil uji kekerasan yang dilakukan pada potongan melintang pipa, disajikan pada tabel 2,

Tabel 1. Hasil Uji Komposisi Kimia Terhadap Pipa Hydrogen Plant

UNSUR	Komposisi Kimia Berdasarkan Standar DIN G-X40 NiCrNb3525 [% berat]	Hasil Uji Sampel [% Berat]
Mo	-	0,13
Ni	35	30,71
Cr	25	23,21
Nb	1,5	1,07
Fe	Bal.	43,98
C	0,4	0,2363
Mn	1,5	0,13054
Si	1,5	0,41706

Tabel 2. Hasil Uji Kekerasan Terhadap Pipa Hydrogen Plant

Nomor Lokasi Pengujian	Nilai Kekerasan, HV	Rata-rata Nilai Kekerasan, HV
1.	205	200,57
2.	202	
3.	202	
4.	201	
5.	200	
6.	198	
7.	196	

Berdasarkan hasil pemeriksaan makro fraktografi (makroskopis), ada indikasi bahwa patahan yang terjadi merupakan *brittle fracture*, sebab pada daerah patahan sama sekali tidak terjadi deformasi (gambar 2). Hal ini menunjukkan bahwa pipa yang pecah sangat getas. Proses kegetasan yang terjadi pada bahan logam, kemungkinan disebabkan oleh karena adanya proses pendinginan yang sangat cepat, atau akibat terjadinya proses oksidasi, atau proses karburisasi^[4,5,6]. Dari hasil pemeriksaan ini juga nampak bahwa awal retak terjadi pada posisi kurang lebih 3 mm dari dinding diameter dalam pipa dan dengan berjalannya waktu operasi pada suhu dan tekanan yang tertentu, maka awal retak ini menjalar kearah sisi dalam dan luar pipa sampai mengakibatkan kerusakan. Hasil analisis mikrostruktur, menunjukkan bahwa bentuk

strukturmikro pada daerah patahan merupakan butiran austenit. Akan tetapi akibat adanya pengaruh kelebihan panas yang diterima pipa tersebut pada saat operasi, dan kemungkinan adanya pengaruh laju pendinginan yang sangat cepat, mengakibatkan karbida yang menyerupai pulau tersebar merata pada matriks austenit tidak ditemukan. Sebaliknya karbida tersebut bergerak menuju batas butir saat mengalami panas yang berlebihan, dan pada batas butir nampak adanya butiran berbentuk rongga bulat glabular atau disebut *round shape cavities* dan bentuk patahan yang ditimbulkan adalah patahan batas butir (*Intergranular Fracture*)^[7].

Sedangkan pada sisi diameter dalam bentuk struktur mikronya mengalami perubahan dari austenit menjadi austenit twin, perubahan mikrostruktur di daerah tersebut, memberikan petunjuk bahwa telah terjadi pengurangan kandungan unsur karbon dan chrom (lihat hasil

analisis komposisi kimia), dan *creep void* yang nampak pada batas butir belum membentuk retak yang berarti, namun pada sisi tengah penjalaran retak telah nampak dengan jelas dan pada sisi diameter luar selain nampak dengan jelas adanya retak, juga pada sisi luar tube terjadi korosi akibat suhu tinggi. Hasil identifikasi dari produk korosi pipa dengan EPMA, juga menunjukkan adanya oksidasi dan korosi (gambar 6 & 7), dimana pada daerah patahan ditemukan unsur chlor (Cl), dan oksigen (O) yang memicu terjadinya korosi, serta unsur chrom (Cr) dan nikel (Ni) yang teroksidasi keluar ke daerah patahan. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai rata-rata kekerasan pipa juga mengalami peningkatan dari 180 HV menjadi 200,57 HV, hal ini yang memperkuat pernyataan bahwa pipa *hydrogen plant* mengalami proses pendinginan yang sangat cepat.

Berdasarkan pengalaman beberapa industri perminyakan dan pupuk yang telah menggunakan bahan HP-Modified, menyatakan bahwa awal terjadinya kerusakan creep baik yang berbentuk *globular*, maupun *wedge cavities*, terjadi ditengah antara dinding dalam dan bagian tengah dari *tube hydrogen plant*^{3,4)}. Hal ini terjadi karena suhu dan *hoop stress* dari tekanan dalam lebih besar, dibandingkan dengan dinding pipa bagian luar. Disamping itu *thermal stress* yang disebabkan oleh *gradient* suhu, maksimum pada dinding bagian dalam. Dengan demikian dari analisis tersebut ditunjukkan bahwa maksimum total *stress*, yaitu *hoop stress* ditambah termal *stress* adalah maksimum diantara dinding bagian dalam dan dinding bagian tengah. Bila dilihat fraksi umur yang sangat besar maka kemungkinan faktor yang mempunyai kontribusi terhadap kerusakan pipa *hydrogen plant* adalah kesalahan operasional, artinya terjadi laju pendinginan yang sangat cepat pada saat di *stop*, dan adanya *hot spot* pada titik tertentu dalam *fire box hydrogen plant* akibat kontrol suhu yang kurang memadai, serta laju pemanasan yang sangat cepat pada saat di *start-up*.

Untuk mencapai hasil yang optimal tanpa terjadi kecelakaan atau ledakan yang fatal, maka sebaiknya suhu operasi pipa tersebut dibuat lebih rendah dari suhu disain operasi, hal ini penting, mengingat bahwa penggantian pipa yang masih terpasang memerlukan dana yang cukup besar dan pengadaannya pun memerlukan waktu yang lama, sehingga dibutuhkan penjadwalan yang ketat dan akurat, untuk perencanaan suhu operasi, waktu penggantian dan inspeksi selanjutnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data makroskopis, metalografi, komposisi kimia, produk korosi dan uji

kekerasan pada pipa *hydrogen plant* No. 179 yang dilakukan di B2TKS-BPPT, BPPT, maka dapat disimpulkan bahwa : Pipa *hydrogen plant* yang pecah, disebabkan oleh faktor lokal *over-heating* dan pengaruh pendinginan yang sangat cepat pada saat *hydrogen plant* tersebut di stop untuk yang terakhir kalinya (sebelum terjadi kerusakan).

Over heating mempercepat terjadinya kerusakan akibat *creep* dan mempercepat penjalaran retak yang telah terjadi sebelumnya, serta menimbulkan oksidasi dan serangan korosi batas butir akibat suhu tinggi (*Intergranular high temperature corrosion*). Sedangkan laju pendinginan yang sangat cepat menyebabkan terjadinya *premature failure* dengan bentuk *fracture surface* yang *brittle* (getas) . Terlarutnya fasa karbida seperti yang terlihat dalam foto metalografi menunjukkan bahwa lokal *over heating* suhunya melebihi 1000 °C . Produk korosi yang ditemukan pada celah retakan hasil pemetaan dengan EPMA mengandung unsur yang korosif, yaitu unsur chlor (Cl) dan oksigen (O) kedua unsur ini mempercepat laju kerusakan pada suhu tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- API Recommended Practice 530, "Recommended practice for calculation of heater tube thickness in petroleum refineries. Washington, D.C., 1998.
- ASM Handbook, "Failure Analysis and Prevention" Volume 11, Formerly Ninth Edition, Metal Handbook. 1998.
- ASM Handbook, "Fractography" Volume 12, Formerly Ninth Edition, Metal Handbook. 1998.
- ASM Handbook, "Mechanical Testing" Volume 8, Formerly Ninth Edition, Metal Handbook. 1998.
- ASTM E.139-03, "Standard Recommended Practice for Conducting Creep, Creep-Rupture and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, 1903.
- B.J. Cane and John W., "Remanent Life Assesment Seminar", ERA Techonology Leatherhead-UK 22/23, September 1992 .
- Colangelo, V.J., F.A. Heiser, " Analysis of Metallurgical Failures", Second Edition. By John Wiley and Sons, Inc. 1989.

Dieter, George E. , *Mechanical Metallurgy*, 2nd edition, Mc Graw Hill Kogakusha Ltd, Tokyo, 1996.

Viswanathan, R., “ *Damage Mechanisms and life assessment of high temperature components*”,ASM International, Metal Park, Ohio 44073, 1996.

Hatta, I., Hadi Sunandrio, “ Teknik Pengkajian Sisa Umur Pada *Tube Reformer Hydrogen Plant*”. Seminar Sehari “Reformer tube dan Katalis Dengan Berbagai Masalahnya”, Hotel Hyatt Bandung 18-19 Oktober 2000.