

Analisa Kegagalan Pipa *Desuperheater Spray* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit 4 PT. PJB UP. Gresik

Niko Adi Lukito, Mas Irfan P. Hidayat, Haniffudin N.

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: irfan@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—*Desuperheater Spray* merupakan alat untuk mengontrol temperatur uap pada *superheater*. Kegagalan pada pipa *desuperheater spray* dapat menurunkan kualitas uap yang terbentuk dan menyebabkan terjadinya *overheat*. Di PT. PJB UP. Gresik, pipa ini mengalami pecah. Untuk menanggulangi hal yang serupa, analisa kegagalan perlu dilakukan. Beberapa pengujian dilakukan untuk mendukung hasil analisa. Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa material pipa yang mengalami kerusakan masih memenuhi persyaratan spesifikasi menurut standar ASTM A106 Grade B. Hasil pengamatan visual bahwa patahan terjadi pada daerah HAZ, pada permukaan dalam pipa tidak lagi halus, terdapat cekungan-cekungan kecil yang searah pada permukaannya dan adanya penipisan pada dinding pipa. Dari pengamatan makroskopik terlihat material mengalami patah ulet. Hasil uji metalografi menunjukkan terjadinya deformasi dan adanya inklusi. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan adanya kenaikan kekerasan pada bagian HAZ. Hasil pengujian SEM menunjukkan adanya retak mikro secara *intergranular* dan adanya struktur korosi pada bagian patah yang didukung dengan hasil XRD. Dari hasil pengujian tersebut disimpulkan bahwa penyebab kegagalan adalah erosi korosi.

Kata Kunci—pipa, *desuperheater spray*, kegagalan.

I. PENDAHULUAN

PEMBANGKIT Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan suatu lembaga pembangkitan energi listrik yang proses kerjanya memanfaatkan tenaga uap untuk menghasilkan listrik. PLTU PT. PJB UP. Gresik (PT. Pembangkitan Jawa-Bali Unit Pembangkitan Gresik) merupakan salah satu pemasok utama listrik di wilayah Jawa-Bali, dimana PLTU ini memiliki tiga peralatan utama (*main building*) dalam sistem PLTU, yakni *boiler*, *turbin*, dan *generator*. *Boiler* merupakan komponen yang berfungsi menghasilkan uap yang nantinya digunakan untuk memutar *turbin*, salah satu bagian dari *boiler* adalah *superheater*. Dimana *superheater* berfungsi sebagai *second heater* setelah *burner*, *superheater* akan memanaskan uap basah menjadi uap kering. Dalam mengoptimalkan proses pemanasan uap pada *superheater* diperlukan alat-alat yang mendukung kerja dari *superheater* salah satunya adalah *desuperheater spray*.

Desuperheater Spray berfungsi untuk mengontrol temperatur uap pada *superheater* dengan jalan menyemprotkan air pada uap *superheater*. Uap air *superheater* yang masuk *turbin* uap

sebuah PLTU harus memiliki spesifikasi temperatur tertentu agar kualitas uap air terjaga dan tidak terjadi *over heat* yang dapat menyebabkan *superheater* menjadi pecah sehingga mengganggu jalannya siklus pada PLTU. Pada *desuperheater spray* PLTU unit 4 PT. PJB UP Gresik ditemukan kerusakan pada bagian pipanya. Kerusakan yang ditemukan berupa kebocoran yang disebabkan pecahnya pipa. Kerusakan tersebut dapat disebabkan oleh berbagai hal seperti kesalahan operasi, kondisi lingkungan, kesalahan pemasangan, pemilihan material dan lain-lain.

Karena mempunyai peranan yang cukup penting dalam mendukung jalannya siklus pada PLTU tentunya tidak diinginkan terjadinya kerusakan pada komponen ini. Sehingga perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui penyebab kerusakan yang terjadi pada pipa *desuperheater* sehingga diharapkan nantinya dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan langkah pencegahan dan perawatan agar tidak terjadi kerusakan yang serupa.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Erosi Korosi

Erosi-korosi adalah peningkatan laju korosi yang disebabkan oleh gerakan relatif antara permukaan logam dengan lingkungan yang korosif. Ketahanan korosi yang baik pada kebanyakan logam terbentuk dalam lapisan pelindung dan terjaga pada permukaan logam [1].

Walaupun peningkatan kecepatan gerakan relatif antara logam dan lingkungannya terkadang mengurangi laju korosi akibat faktor-faktor kinetik, tetapi efek umum dari peningkatan kecepatan adalah terganggunya kesetabilan lapisan pelindung, yang menimbulkan peningkatan laju korosi ketika lapisan di permukaan dihancurkan. Penampakan kerusakan akibat erosi-korosi pada permukaan logam ditunjukkan dengan banyaknya kehilangan berat dan terbentuknya daerah cekungan dengan tampilan bagai dipahat.

Erosi-korosi fase tunggal banyak terjadi di jalur pipa yang menyirkulasi ulang aliran yang minimum, di-*downstream* katup-katup pengontrolan aliran, dan di *elbow-elbow* dekat *fitting*, juga ada kejadian di ujung *diffuser* pada pipa yang berdiameter lebih kecil [2].

III. METODE PENELITIAN

A. Data Operasional Lapangan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data-data perusahaan yang mendukung penelitian. Data-data yang diambil antara lain:

1. Spesifikasi pipa *desuperheater*
2. Desain pipa *desuperheater*
3. Data operasi
4. Spesifikasi material

B. Pengamatan Makroskopik

Pengamatan makroskopik dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro (kasat mata). Pengamatan ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop stereo Stemi DV 4 yang berada di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

C. Pengujian Komposisi OES (Optical Emission Spectroscopy).

Identifikasi kimia dilakukan untuk mengetahui unsur apa saja yang terdapat pada pipa *desuperheater spray* yang mengalami kegagalan secara kuantitatif yang kemudian dibandingkan dengan komposisi standar dari ASTM A106 Grade B. Pada identifikasi komposisi kimia ini dilakukan dengan metode OES (*Optical Emission Spectroscopy*) di PPNS.

D. Pengujian Mikroskop Optik

Pengamatan mikroskop optik dilakukan untuk menganalisa fasa, bentuk, dan ukuran struktur mikro. Hal ini dilakukan untuk mengetahui proses manufaktur yang terjadi pada material tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus BX51M-RF yang berada di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

E. Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode *Vickers* dimana dalam pengujinya menggunakan *indentor* piramida intan, pembebanan sebesar 60 kg dengan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

F. Pengujian SEM

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui profil permukaan patahan dan perambatan retak secara mikro dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Pada pengujian SEM sampel uji harus bersih dari kotoran-kotoran yang menempel seperti debu, keringat, dan lain sebagainya. Pembersihan dilakukan dengan metode *blowing*.

G. Pengujian XRD

Pengujian ini digunakan untuk mengidentifikasi unsur/senyawa (analisa kualitatif) dan penentuan komposisi

(analisa kualitatif). Pengujian ini akan menjelaskan bagaimana distribusi fasa yang teridentifikasi berdasarkan hasil XRD.

IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Data Operasi Lapangan

Pipa *desuperheater primary spray* di PLTU unit 4 buatan Ishikawajima-Harima Heavy Industries milik PT. PJB UP. Gresik ini mengalami *rupture* (pecah) yang terlihat melingkar pada permukaan seperti yang terlihat pada Gambar 4.1 sehingga perlu dilakukannya pergantian Pipa *desuperheater primary spray* yang memakan biaya dan membutuhkan waktu yang cukup lama



Gambar 1 Pipa *desuperheater spray* yang mengalami *rupture*

Berikut ini merupakan kronologi kejadian yang terjadi pada PLTU 4 sampai ditemukannya adanya indikasi kebocoran yang terdapat pada Tabel 1

Tabel 1

Kronologi Kejadian pada PLTU unit 4

Waktu	Kejadian
11 Desember 2015 13.00	Terjadi kenaikan <i>feedwater flow</i> pada PLTU Unit 4
11 Desember 2015 13.45	Ada indikasi kebocoran pada bagian Unit
11 Desember 2015 14.05	Dilakukan <i> downgrade</i> pada Unit dan ditemukan kebocoran pada pipa <i>desuperheater spray</i>

Tabel 2

Data operasi pada *desuperheater spray*

Description	Value
Design Pressure	25000 KPa
Operating Pressure	17016,5 KPa
Design Temperature	210 °C
Operating Temperature	172 °C
Flow Rate	397000 kg/h

B. Analisa Hasil Pengujian

1) Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Berikut ini adalah hasil uji spektrometer dari komposisi pipa *desuperheater spray* yang terbuat dari material ASTM A106 Gr B yang ditampilkan pada Tabel 3

Tabel 3

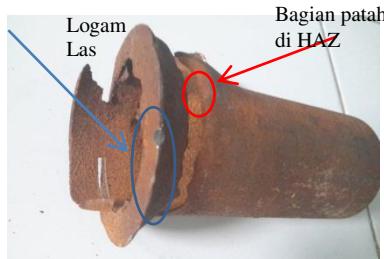
Perbandingan komposisi pipa *desuperheater spray* antara ASTM A106 dengan hasil pengujian

Unsur	ASTM A106 (%)	Hasil Pengujian (%)
Karbon	≤ 0,3	0,2
Mangan	0,29 – 1,06	0,555

Fosfor	$\leq 0,035$	0,0193
Sulfur	$\leq 0,035$	0,0021
Silicon	$\geq 0,10$	0,273
Kromium	$\leq 0,40$	0,0226
Tembaga	$\leq 0,40$	0,0079
Molybdenum	$\leq 0,15$	0,0055

Berdasarkan hasil pengujian komposisi pada Tabel 3, menunjukkan bahwa komposisi kimia material pipa yang mengalami kerusakan masih memenuhi persyaratan spesifikasi menurut standar ASTM A106 ($C = 0,3 \text{ max}$; $Mn = 0,29\text{-}1,06$; $P = 0,035 \text{ max}$; $S = 0,035 \text{ max}$; $Si = 0,10 \text{ min}$).

2) Hasil Pengamatan Makroskopik



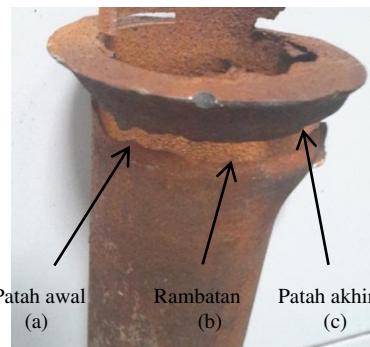
Gambar 2 Patahan yang terjadi pada pipa *desuperheater spray*

Hasil pemeriksaan visual pipa *desuperheater spray* pada Gambar 2 menunjukkan bahwa kegagalan atau patahan terjadi pada daerah dekat lasan yang diindikasi daerah tersebut sebagai daerah HAZ karena tepat terjadi di samping daerah weld metal. Dimana pada daerah tersebut patahan terjadi secara melingkar.



Gambar 3 Permukaan dalam pipa *desuperheater spray*

Dari pengamatan yang dilakukan pada permukaan dalam pipa seperti pada gambar 3 ditemukan bahwa permukaan pipa tidak lagi halus, terdapat cekungan-cekungan kecil yang searah pada permukaannya. Hal ini dapat terjadi karena adanya erosi korosi. Selain itu terjadi penipisan pada ketebalan pipa yang disebabkan erosi dari air yang mengalir serta adanya korosi yang ditandai dengan warna kecoklatan pada permukaan dalam pipa yang mengalami kegagalan.



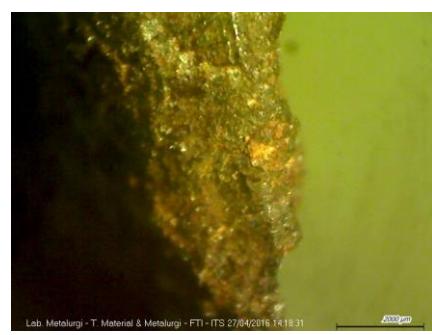
Gambar 4 Pembagian daerah patahan pada pipa

Pada Gambar 4 merupakan pembagian daerah patahan, dibagi menjadi 3 daerah yakni awal retakan, penjalaran retak, dan patah akhir. Berikut ini ditampilkan perbesaran pada masing-masing daerah tersebut menggunakan mikroskop stereoskopik.



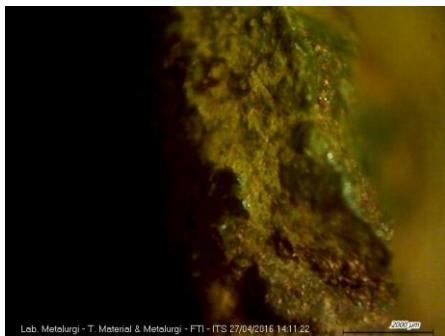
Gambar 5 Daerah initial crack (a) diambil dengan mikroskop stereo perbesaran 10x

Dari hasil pengujian dengan menggunakan mikroskop stereoskopik pada gambar 5 diindikasi sebagai daerah inisiasi crack. Pada daerah awal retak ini tidak terdapat beachmark dan striasi yang terlihat dan juga permukaan terlihat halus dan lebih terang dimana komponen ini menerima beban statis



Gambar 6 Daerah perambatan (b) diambil dengan mikroskop stereo perbesaran 10x

Pada gambar 6 adalah daerah perambatan patahan pada pipa yang mengalami kegagalan dimana terlihat adanya berbedaan ketinggian secara nyata serta warna yang lebih gelap dibandingkan daerah awal patahan.



Gambar 7 Daerah akhir patahan (c) diambil dengan mikroskop stereo perbesaran 10x

Pada gambar 7 merupakan daerah patahan akhir yang ditandai dengan adanya permukaan yang terlihat kasar dan tajam berserabut dan tidak adanya beachmark yang terlihat secara makro yang merupakan ciri dari patahan ulet.

3) Hasil Pengujian Kekerasan.

Pengujian kekerasan ini menggunakan indentasi sebanyak 3 titik, indentasi dilakukan pada bagian dekat patahan, jauh dari patahan, HAZ, dan logam las. Berikut ini adalah hasil pengujian kekerasan yang ditampilkan pada tabel 4.

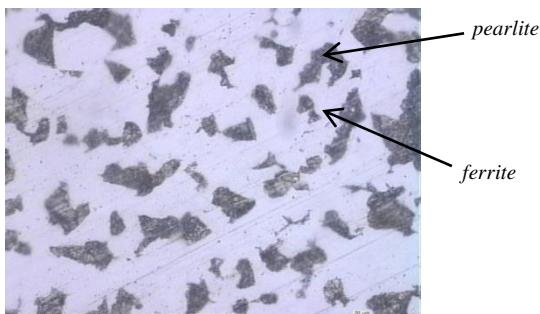
Tabel 4
Data Hasil Uji Kekerasan (*Hardness Vickers*)

Lokasi Uji	1	2	3	Rata-rata
Jauh patah	141	143	140	141
Dekat patah	147	147	149	147
HAZ	152	151	153	152
Logam las	148	148	147	147

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan dapat diketahui bahwa pada daerah jauh dari patahan memiliki kekerasan rata-rata 141 HV. Sedangkan pada daerah patahan memiliki kekerasan sebesar 147 HV, nilai ini lebih tinggi dari pada daerah yang jauh karena adanya tegangan sisa dari proses deformasi saat pipa mengalami pecah. Pada daerah HAZ memiliki kekerasan sebesar 152 HV. Pada daerah logam las memiliki kekerasan yang paling tinggi yaitu 147 HV.

4) Hasil Pengujian Metalografi

a. Bagian Jauh dari Patahan

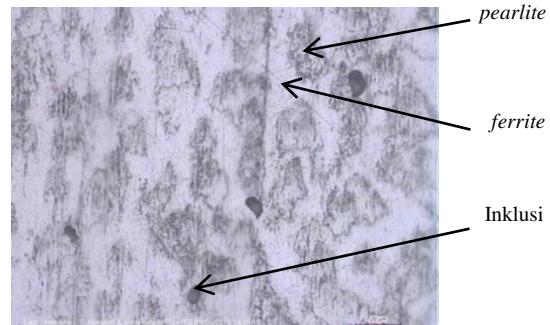


Gambar 8 Struktur mikro pada daerah jauh dari patahan dengan perbesaran 50x

Dari hasil pengujian struktur mikro yang dilihat dibawah mikroskop optik pada bagian jauh dari patahan, diperoleh hasil seperti pada gambar 8. Dari hasil pengujian metalografi dengan menggunakan etching nital didapatkan struktur mikro

berupa *pearlite* yang berwarna gelap dan fasa *ferrite* yang sesuai dengan struktur mikro baja karbon rendah. Pada gambar tersebut dapat diketahui fasa *pearlite* dan *ferrite* tersebar merata dan butir-butirnya normal tidak mengalami deformasi.

b. Bagian Dekat dengan Patahan

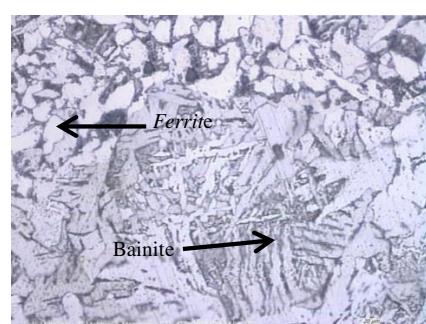


Gambar 9 Struktur mikro pada daerah dekat dengan patahan dengan perbesaran 50x

Dari gambar struktur mikro pada daerah dekat dengan patahan diketahui adanya perbedaan dengan struktur mikro pada daerah yang jauh dari patahan. Pada struktur mikro dekat dengan patahan mempunyai butir-butir yang memanjang yang menunjukkan adanya deformasi pada daerah ini, selain itu butir-butir *pearlite* warna hitamnya terlihat memudar tidak seperti pada daerah jauh dari patahan yang mempunyai *pearlite* hitam pekat. Dan pada daerah ini juga ditemukan struktur bulatan-bulatan kecil yang berwarna hitam yang menunjukkan adanya inklusi pada daerah ini.

c. Daerah HAZ

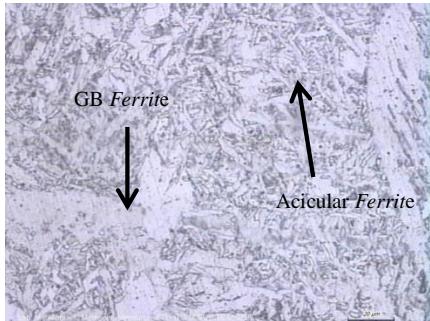
Dari Gambar 10 tampak bahwa struktur mikro pada HAZ yang diamati dengan mikroskop optik pada perbesaran 50 kali terdiri dari, *ferrite* kasar, *pearlite* dan *bainite* yang berstruktur seperti bulu. Karena memiliki struktur ferit yang kasar dan bainit pada daerah HAZ mengalami kenaikan kekerasan.



Gambar 10 Struktur mikro pada daerah HAZ dengan perbesaran 50x

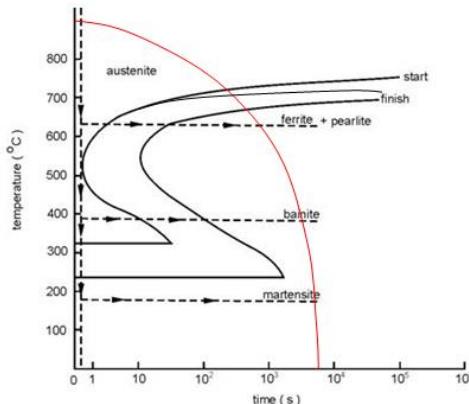
Ukuran besarnya butir kristal menunjukkan tingkat kekerasannya. Kekasaran butir Kristal menunjukkan bahwa kekerasan bahan meningkat dibanding dengan logam induk. Jika dilihat diagram transformasi pada Gambar 12 menunjukkan bahwa pada daerah HAZ ini mengalami pendinginan yang agak cepat yang juga menyebabkan kekerasan tinggi.

d. Daerah Logam Las



Gambar 11 Struktur mikro pada daerah logam las dengan perbesaran 50x

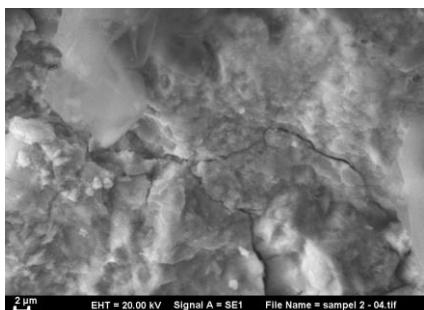
Pada Gambar 11 tampak struktur mikro daerah las yang diamati dengan mikroskop optik pada perbesaran 50 kali, terdiri dari *acicular ferrite* dan *grain boundary ferrite*. Ferit batas butir yang terbentuk kecil dan memanjang dan ferit acicular berupa bilah-bilah yang menyilang dan berbutir lembut. Struktur *acicular ferrite* inilah yang diharapkan dari setiap proses pengelasan, karena struktur ini sebagai *interlocking structure* yang mampu menghambat laju perambatan retak. Kelestan dan ketangguhan logam las akan meningkat jika struktur mikro yang terbentuk berupa *acicular ferrite*. Jika dilihat pada diagram transformasi menunjukkan bahwa pada daerah logam las mengalami pendinginan sedang.



Gambar 12 Continuos Cooling Transformation Diagram

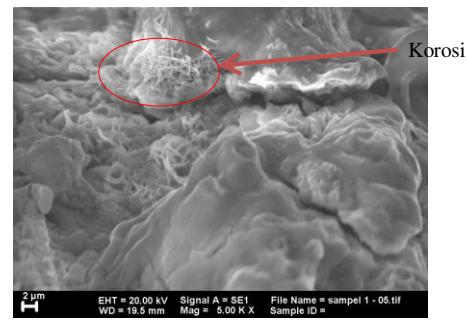
5) Hasil Pengujian SEM

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan untuk mengetahui profil permukaan patahan dan perambatan retak secara mikro.



Gambar 13 Hasil pengujian SEM pada daerah patahan yang menunjukkan adanya retak mikro dengan perbesaran 5K x

Dari gambar 13 menunjukkan adanya *crack* atau retak mikro, jika kita lihat retakan tersebut mengikuti alur batas butir yang menunjukkan bahwa reatakan terjadi secara *intergranular*.

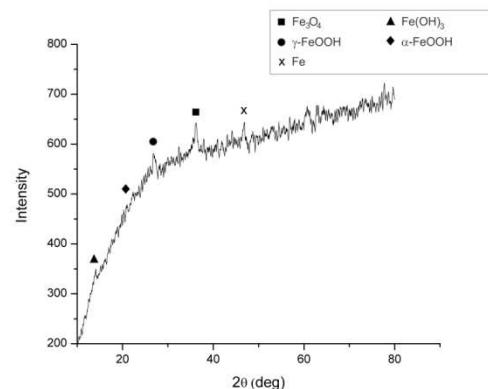


Gambar 14 Hasil pengujian SEM pada daerah patahan yang menunjukkan adanya korosi dengan perbesaran 5K x

Pada gambar 14 merupakan hasil pengujian SEM pada daerah sekitar patahan yang terkorosi. Dari gambar tersebut menunjukkan adanya struktur korosi yang digambarkan dengan bentuk serabut-serabut bunga.

6) Hasil Pengujian XRD

Dari pengujian XRD yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa terdapat adanya korosi pada permukaan dalam pipa yang menyebabkan penipisan pada dinding pipa.



Gambar 15 Hasil pengujian XRD

Hal ini dibuktikan dengan teridentifikasi senyawa korosi yaitu Fe_3O_4 yang sesuai JCPDS no. 88-0315, $\gamma\text{-FeOOH}$ yang sesuai dengan JCPDS no. 44-1415, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang sesuai dengan JCPDS no. 46-1436, dan $\alpha\text{-FeOOH}$ yang sesuai dengan JCPDS no. 29-0713. Jika dilihat pada data air yang melewati pipa *desuperheater* ini menunjukkan bahwa air memiliki pH 8,61 yang berarti basa dan tidak ada senyawa pengotor yang berbahaya sehingga menunjukkan jika korosi yang terjadi bukan karena kandungan air yang melewati pipa namun karena erosi yang terjadi pada dinding pipa.

C. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, pengujian komposisi kimia yang telah dilakukan menunjukkan bahwa material pipa *desuperheater spray* ini adalah baja karbon rendah dengan standar ASTM A106 *Grade B* dan komposisi kimia material pipa yang mengalami kerusakan

masih memenuhi persyaratan spesifikasi menurut standar ASTM A106 *Grade B*(C = 0,3 max; Mn = 0,29-1,06; P = 0,035 max; S = 0,035 max; Si = 0,10 min). Hal ini menunjukkan bahwa komposisi kimia tidak berperan dalam kerusakan yang terjadi pada pipa.

Pengamatan yang dilakukan secara visual kegagalan pipa menunjukkan bahwa kegagalan atau patahan terjadi pada daerah dekat lasan yang diindikasi daerah tersebut sebagai daerah HAZ karena tepat terjadi di samping daerah logam las. Selain itu pipa telah mengalami erosi korosi ditandai dengan banyaknya kehilangan berat dan terbentuknya daerah cekungan-cekungan kecil dengan tampilan seperti dipahat yang searah pada permukaannya [2]. Cekungan terbentuk dengan pecahnya gelembung-gelembung udara yang berada di dalam air, yang menimbulkan tekanan hidrostatis yang menghantam permukaan logam dan aliran lokal yang berkecepatan sangat tinggi [1]. Selain terbentuk cekungan tentunya adanya produk korosi yang didukung oleh hasil pengujian XRD dengan ditemukan senyawa korosi pada permukaan dalam pipa yaitu Fe₃O₄, γ-FeOOH, Fe(OH)₃, dan α-FeOOH. Dari data laboratorium diketahui bahwa air yang mengalir melewati pipa dalam kondisi basa dan tidak terdapat senyawa pengotor yang berbahaya sehingga menunjukkan jika korosi yang terjadi bukan karena kandungan air yang melewati pipa namun karena erosi yang terjadi pada dinding pipa.

Dari pengamatan makroskopis yang telah dilakukan dengan alat mikroskop stereo menunjukkan bahwa material mengalami patah ulet dengan adanya permukaan yang kasar berserabut, tajam dan berwarna gelap [3].

Kehilangan berat pada pipa didukung dengan hasil pengukuran dimensi yang menunjukkan adanya penipisan pada ketebalan dinding pipa. Ketebalan pipa ini sangat berpengaruh pada kekuatan pipa. Karena dalam menopang tegangan yang dialami memerlukan ketebalan minimum pada pipa [4]. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan material memenuhi teori kegagalan Von Mises dengan nilai tegangan 296,18 MPa yang melebihi tegangan *yield*-nya sebesar 240 MPa dengan demikian material dapat dikatakan gagal [5]. Selain itu pada perhitungan tekanan yang diijinkan dengan tebal dinding pipa 1,5 mm mempunyai tekanan ijin sebesar 6999,75 KPa sedangkan aliran air yang melewati pipa memiliki tekanan 17016,5 KPa dapat disimpulkan bahwa ketebalan pipa kurang dari ketebalan minimum yang diperbolehkan.

Dari hasil uji kekerasan menggunakan Vickers menunjukkan adanya kenaikan kekerasan pada daerah dekat patah karena adanya tegangan sisa dari proses deformasi saat pipa mengalami pecah. Kenaikan kekerasan juga terjadi pada daerah HAZ dikarenakan adanya efek pemanasan las yang mengalami pendinginan agak cepat. Nilai kekerasan ini jika dikonversi menjadi nilai tegangan tarik pipa masih memiliki tegangan tarik sesuai standar ASTM A106 Gr. B.

Bila dilihat dari hasil *metalografi*, pada bagian yang jauh dari patah terdapat struktur mikro berupa *perlite* yang berwarna gelap dan fasa *ferrit* yang sesuai dengan struktur mikro baja karbon rendah. Fasa *perlite* dan *ferrit* tersebar merata dan butir-butirnya normal tidak mengalami deformasi. Sedangkan pada bagian yang dekat patah memiliki fasa *ferrit* dan butiran *perlite* yang memanjang yang menunjukkan

adanya deformasi pada daerah ini. Dan pada daerah ini juga ditemukan struktur bulatan-bulatan kecil yang berwarna hitam yang menunjukkan adanya inklusi pada daerah ini. Pada daerah HAZ terjadi perubahan struktur mikro menjadi *ferrite* kasar, *pearlite* dan *bainite* yang menyebabkan daerah ini memiliki kekerasan tinggi. Sedangkan pada daerah logam las terbentuk struktur *acicular ferrite* dan *grain boundary ferrite* yang menyebabkan daerah ini menjadi tangguh.

Dari hasil pengujian SEM menunjukkan adanya *crack* atau retak mikro, jika diihat lihat retakan tersebut mengikuti alur batas butir yang menunjukkan bahwa retakan terjadi secara *intergranular* [3]. Selain itu juga terlihat adanya korosi pada daerah patah ditandai dengan adanya struktur yang berbentuk serabut-serabut bunga [6].

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Telah dilakukan penelitian mengenai proses delaminasi yang terjadi pada material komposit dengan metode numerik atau simulasi. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa:

1. Faktor utama penyebab kegagalan pada pipa *desuperheater* primary *spray* adalah adanya erosi korosi yang menyebabkan penipisan pada dinding pipa.
2. Mekanisme terjadinya erosi korosi yaitu dipicu dengan adanya pecahnya gelembung-gelembung udara yang berada di dalam *liquid* sehingga mengikis dan merusak lapisan pelindung logam. Logam yang berada di bawah lapisan pelindung mulai terkorosi, sehingga membentuk cekungan hal ini menyebabkan dinding pipa menipis sehingga pipa tidak mampu menahan tegangan yang diberikan lalu mengalami kegagalan atau pecah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis N.A.L. mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua yang telah memberikan dukungan finansial dan motivasi sehingga penelitian ini selesai tepat pada waktunya. Penulis N.A.L. juga mengucapkan terima kasih kepada sejumlah pihak yang telah memberikan bantuan baik moril maupun materi sehingga penelitian ini bisa terselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] —, 1975. ASM Volume X: *Wear Failures*. Ohio, Amerika: ASM Internasional.
- [2] Spencer H. Bush, 1990. *The Effects of Erosion-Corrosion on Power Plant Piping, Proceeding of The 59th General Meeting of The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors*. Tennessee: Nashville.
- [3] Callister, William. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Kannappan, Sam. 1986. *Introduction to Pipe Stress Analysis*. New York: John Wiley & Son, Inc.
- [5] Popov, E. Paul. 1952. *Mechanics of Materials*. New York: Prentice-Hall.
- [6] Renato dkk. 2003. *Characterization of Corrosion Products Formed on Steels in The First Months of Atmospheric Exposure*. Sao Paulo: Material Research.