

Analisa Kegagalan Pipa Udara A312 Tipe 304H pada *Line* A-1011-14" (25P2J) Unit Amonia PT. Petrokimia Gresik

Sopan Prayoga dan Witantyo

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: witantyo@me.its.ac.id

Abstrak— *Line* A-1011-14" (25P2J) menggunakan pipa tahan karat TP304H berdiameter 14 inch. Pipa mengalami pecah saat beroperasi pada temperatur 800°C (*overheating*) dan *crack* ditemukan pada hampir semua sambungan las. Kegagalan pipa dievaluasi dengan metode RCFA (*root cause failure analysis*) didukung pengujian Metalografi, SEM-EDX, dan OES. Metode ini digunakan untuk mengetahui akar penyebab kegagalan pipa udara TP304H pada *line* A-1011-14" (25P2J). Hasil analisa didapat adanya *pre-existing crack* mengakibatkan tegangan pipa 12978.55 psi masih di bawah *tensile strength* material TP304H pada temperatur 800°C yaitu 18000 psi. Hasil pengujian SEM dan metalografi menyatakan bahwa, kegagalan yang terjadi pada las *longitudinal* diakibatkan adanya IGSCC (*intergranular stress corrosion cracking*) yang mengakibatkan batas butir mengalami *sliding*, dan terjadi penurunan kekuatan pada material. Adanya sensitisasi dibuktikan dengan pengujian EDX yang menunjukkan kenaikan persentase unsur krom dan karbon pada batas butir yaitu 1.4% dan 21.64%. Untuk menghindari kegagalan yang sama, maka material TP304H *welded pipe* perlu diganti TP304H *seamless pipe*. *Crack* yang terjadi pada las *circumferential* diakibatkan adanya IP (*incomplete penetration*) yang menyebabkan tumbuhnya *crack* yang menjalar dari ujung IP menuju *fusion zone*, untuk mencegah hal tersebut maka setiap proses pengelasan yang dilakukan harus disesuaikan dengan prosedur.

Kata Kunci—304H, *failure analysis*, *high temperature*, *precipitates*

I. PENDAHULUAN

PIPA *Line* A1011-14" (25P2J) adalah penghubung antara *outlet air heater* 101-BCA 2 dengan *secondary reformer* 103-D yang merupakan saluran pipa tahan karat type 304H berdiameter 14 inch dan beroperasi pada temperatur 610°C dengan tekanan 39.7 kg/cm².

Mulai tahun 2004 sudah beberapa kali terjadi kegagalan pada *line* A1011-14" (25P2J). Kegagalan yang terjadi adalah retak (*crack*) pada sambungan lasan pipa. Perbaikan sementara yang dilakukan adalah melakukan *re-inforce* tambalan pelat dan penggantian beberapa pipa yang mengalami kegagalan. Salah satu contoh kasus kegagalan (*failure*) pada *line* A1011-14" (25P2J) yaitu pada tanggal 14 Januari 2015 pipa mengalami pecah atau meledak. Posisi pipa yang mengalami pecah berada dekat *outlet air heater* 101-BCA 2. Terjadinya beberapa kegagalan pada *line* A1011-14" (25P2J) tersebut dinilai sangat mengganggu proses produksi di unit amonia,

karena harus dilakukan beberapa kali *shutdown* untuk dilakukan proses perbaikan, sehingga *production rate* amonia PT. Petrokimia Gresik akan turun

Hasil analisa dari pihak inspeksi PT. Petrokimia Gresik menyebutkan bahwa, kegagalan terjadi akibat adanya *overheating* temperatur mencapai 800°C dan adanya *pre-existing crack* pada daerah las *longitudinal* lebih dari 80% tebal pipa, sehingga dengan adanya tekanan udara dalam pipa dapat mengakibatkan terjadinya pecah (*rupture*). *Overheating* hanya akan mempercepat terjadinya pecah pada pipa.

Berdasarkan pada teori tentang metalurgi, bahwa baja tahan karat jenis *austenitic* pada temperatur 425°C sampai 815°C, kromium karbida akan mengalami *precipitates* pada batas butir [1], dengan adanya *precipitates* tersebut daerah sekitar batas butir akan mudah terserang korosi. Adanya tekanan pada lingkungan akan menyebabkan *microcrack* yang akan menjalar di sekitar batas butir atau sering disebut *intergranular stress corrosion cracking*.

Analisa pihak inspeksi PT. Petrokimia Gresik tentang penyebab kegagalan pipa udara A312 Type 304H pada *line* A1011-14" (25P2J) belum mencapai akar permasalahan sebenarnya, karena belum diketahui apa penyebab terjadinya *pre-existing crack*. Atas dasar hal tersebut maka akan dilakukan penelitian tentang analisa kegagalan pipa udara A312 Type 304H pada *line* A1011-14" (25P2J) menggunakan metode RCFA (*Root Cause Failure Analysis*) agar dapat diketahui akar permasalahan sebenarnya.

Dengan metode RCFA dapat mengidentifikasi suatu permasalahan dengan mencari penyebab utama terjadinya kegagalan maupun faktor-faktor yang memungkinkan baik langsung maupun tidak langsung berkontribusi terhadap masalah tersebut [2]. Komparasi antara pengujian material dan identifikasi beban operasi yang bekerja serta identifikasi proses *maintenance* yang sudah dilakukan pada *line* A1011-14" (25P2J) adalah skema dasar dari penelitian ini yang digunakan sebagai langkah antisipasi untuk meminimalisir kegagalan dengan kasus yang sama pada komponen ini dikemudian hari.

II. METODE PENELITIAN

A. Metode RCFA

Metode ini digunakan untuk menemukan akar dari permasalahan yang terjadi dengan bantuan *tool* FTA (*Fault*

Tree Analysis) didukung dengan perhitungan tegangan dan pengujian pada material pipa.

B. Perhitungan Tegangan yang Terjadi pada Pipa

Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui tegangan pada pipa akibat tekanan operasi

C. Pengujian Fraktografi

Pemeriksaan fraktografi merupakan pengambilan foto makro dengan menggunakan *microscope electron* hingga perbesaran maksimal 100x. Pemeriksaan ini bertujuan untuk melihat patahan yang terjadi pada pipa hasil potongan melintang.

D. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro material pipa TP304H dengan perbesaran maksimum 500x dengan menggunakan *microscope optic*.

E. Pengujian SEM-EDX

Dilakukan untuk pemetaan distribusi unsur pada sampel dan untuk mengetahui apakah ada unsur korosif yang terdapat pada sampel.

F. Pengujian OES

Dilakukan untuk mengetahui unsur penyusun SS TP304H, dan untuk mengetahui kadar kromium dan karbon yang terkandung pada TP304H.

G. Spesifikasi Material

Tabel 1.
Data Teknis Pipa Udara

Material Pipa Udara A 1011-14"	A-321 tipe 304H
Diameter	14"
Schedule	60
Ketebalan Pipa	15.6mm
Tekanan Operasi	35.7 kg/cm ²
Temperatur Operasi	610 °C

Tabel 2.
Mechanical Properties

Temperature		Yield Strength		Tensile Strength	
°F	°C	ksi	Mpa	ksi	Mpa
1500	816	9.9	68	18	124

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Bentuk Kegagalan

Ada dua jenis kegagalan yang terjadi pada *line A1011-14"* (25P2J), yaitu terjadinya *crack* pada sambungan *circumferential* dan pecah pada sambungan las *longitudinal*. *Crack* pada sambungan *circumferential* terjadi pada bagian lasan, dan *toe crack* di *base metal* saat terjadi pecah di sambungan las *longitudinal*.



Gambar 1. Kegagalan *Crack* pada Sambungan *Circumferential*



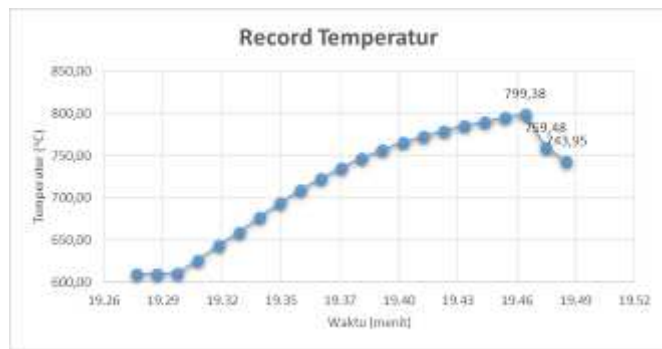
Gambar 2. Kegagalan Pecah pada Sambungan *Longitudinal*

B. Pengumpulan Data



Gambar 3. *Record Tekanan* saat Terjadi Kegagalan

Gambar 3 menunjukkan adanya penurunan tekanan udara mulai pukul 11.00 WIB, hal ini disebabkan kompresor 101-J mengalami *low speed*, dengan adanya *low speed* pada kompresor maka debit udara akan menurun. Penurunannya tekanan dan debit udara maka akan mengakibatkan terjadi kenaikan temperatur pada pipa karena kurangnya fluida yang akan dipanaskan, sehingga pipa mengalami *overheat* kemudian menyebabkan pecah.



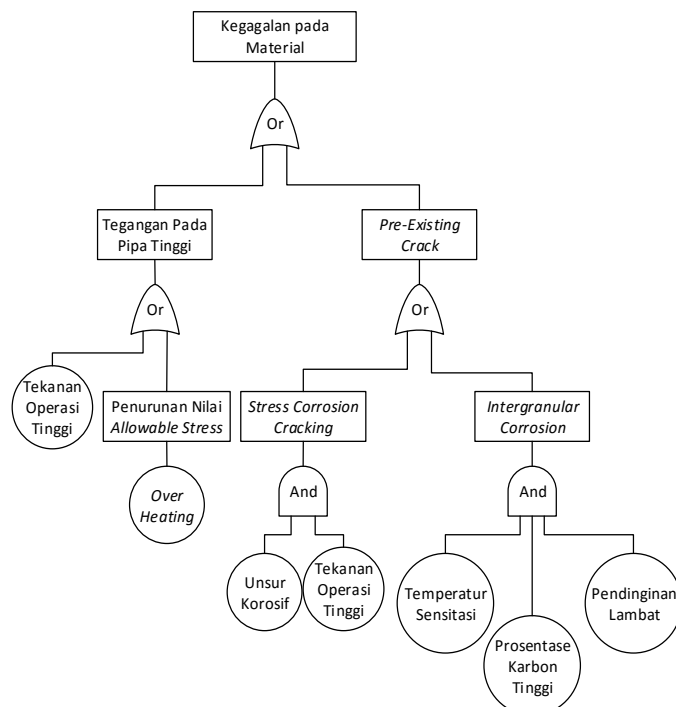
Gambar 4. Record Tekanan saat Terjadi Kegagalan

Adanya penurunan temperatur mengindikasikan bahwa ledakan yang menyebabkan pipa pecah terjadi pada pukul 19.47 WIB. Saat terjadi pecah pukul 19.47 temperatur mencapai 799.38°C dan tekanan udara turun hingga diantara 21.35 kg/cm² dan 19.69 kg/cm².

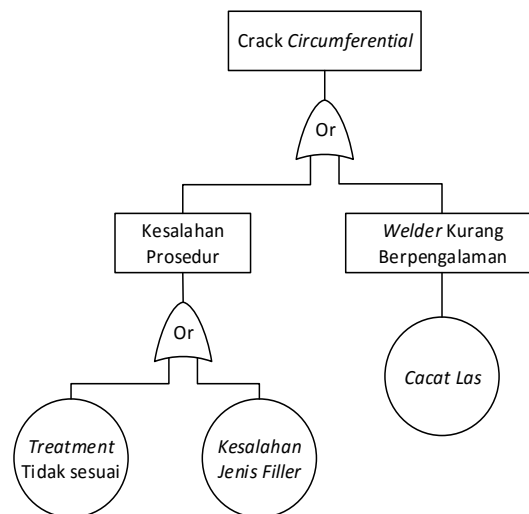
C. Identifikasi Penyebab yang Mungkin

Dari diagram FTA pada Gambar 5 telah mengerucut pada kegagalan material, dimana untuk mengerucutkan permasalahan sebelumnya telah dilakukan metode *brainstorming* dan *interview* dengan pihak *inspector* PT. Petrokimia Gresik.

Gambar 6 menjelaskan diagram FTA kemungkinan penyebab terjadinya *crack* pada sambungan *circumferntial* pipa.



Gambar 5. FTA Kegagalan Crack pada Sambungan Longitudinal



Gambar 6. Kegagalan Crack pada Sambungan Circumferential

D. Identifikasi Akar Permasalahan

- *Perhitungan Tegangan pada Pipa setelah Mengalami Pengurangan Ketebalan Pipa*

Setelah dilakukan pengukuran, ketebalan pipa mengalami penipisan menjadi 13.75mm atau 0.54inch, dimana desain awal pipa 0.6inch.

$$\sigma_{SH} = \frac{P(r_i^2 + \frac{r_o^2}{r_i^2})}{r_o^2 - r_i^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\sigma_{SH} = 7276.38 \text{ psi}$$

Tegangan yang terjadi pada pipa yang disebabkan oleh tekanan operasi sebesar 20.53kg/cm² adalah 7276.38 psi, masih dibawah *yield strength* material pipa pada temperatur 799.38°C yaitu 9900 psi.

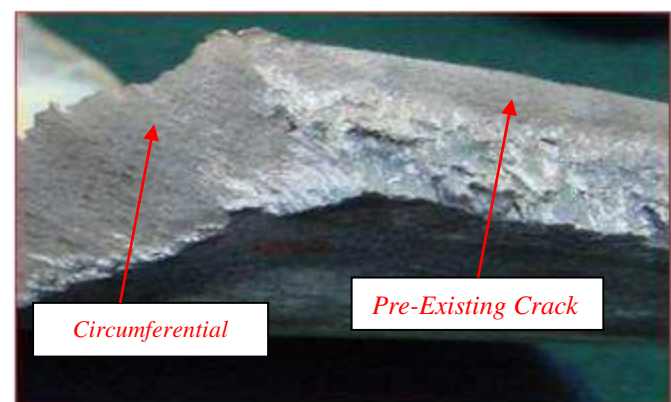
- *Perhitungan Tegangan pada Pipa setelah Mengalami Pengurangan Ketebalan Pipa dan Pre-existing Crack*

$$\sigma_{SH} = \frac{P(r_i^2 + \frac{r_o^2}{r_i^2})}{r_o^2 - r_i^2}$$

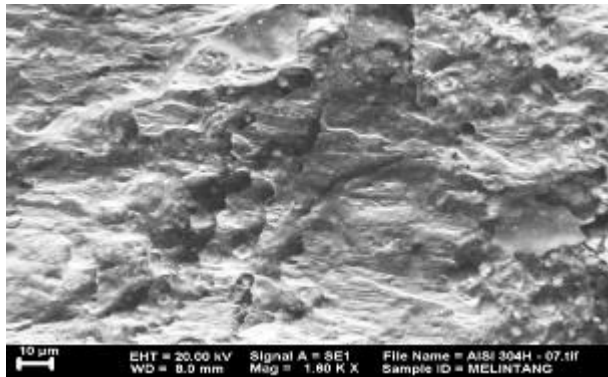
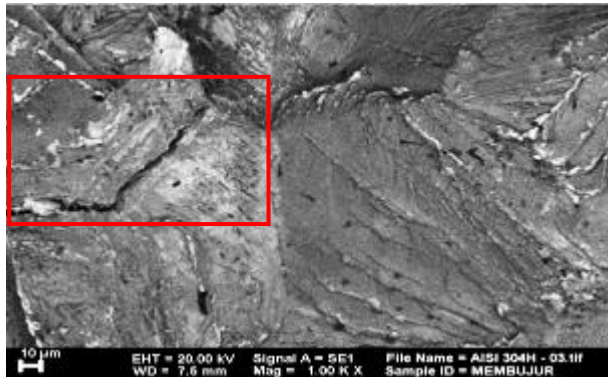
$$\sigma_{SH} = 12978.55 \text{ psi}$$

Tegangan pipa yang terjadi 12978.55 psi melampaui *yield strength* material yaitu 9900 psi, akan tetapi masih dibawah *tensile strength* material yaitu 18000 psi.

- *Hasil Pengamatan Fraktografi menggunakan SEM*



Gambar 7. Titik Pengamatan Fraktografi

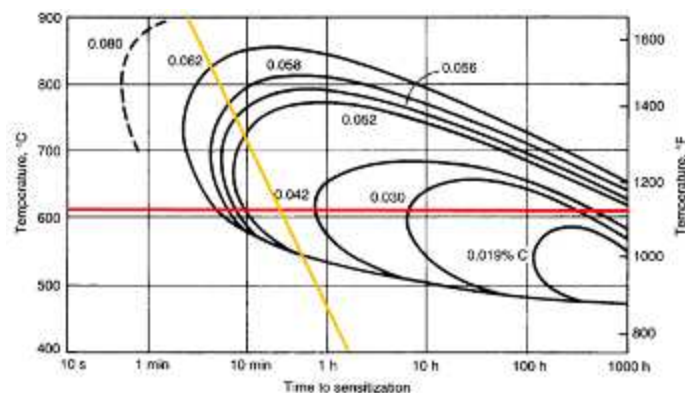
Gambar 8. Patahan *Circumferential*

Gambar 9. Pre-existing Crack Patahan Longitudinal

Patahan *circumferential* perbesaran 1600x berdasarkan *ASM Handbook Volume 12 – Fractography* bentuk patahan dengan ciri-ciri tersebut merupakan bentuk patahan akibat proses geser (*shear process*). Bentuk patahan yang terjadi akibat tegangan geser, sehingga pada daerah *circumferential* bukan merupakan awal terjadinya *fracture*, akan tetapi patahan pada daerah *circumferential* terjadi akibat dari adanya patahan lain.

Hasil pengamatan (*scanning electron microscope*) SEM dengan perbesaran 1000x pada patahan halus yang merupakan *pre-existing crack* menunjukkan pola *cracking* disebabkan *sliding* pada batas butir. *Sliding* pada batas butir diakibatkan karena lemahnya batas butir sehingga dapat mengalami deformasi.

- Pengamatan Struktur Mikro



Gambar 10. Diagram Terjadinya Presipitasi Karbida Krom

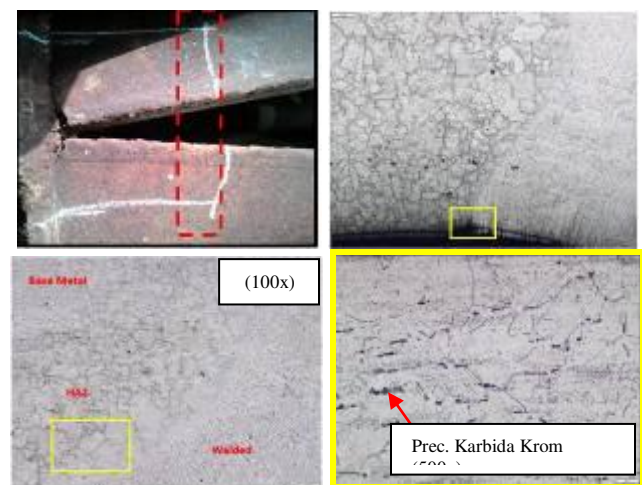
Garis merah menggambarkan temperatur operasi udara dan garis kuning merupakan pendinginan pada proses pengelasan.

Hasil *interview* yang dilakukan dengan bagian pengelasan. Garis merah dan kuning pada Gambar 8 menunjukkan bahwa garis tersebut melewati daerah sensitasi.



Gambar 11. Hasil Pengujian pada Sampel di Titik ke 1

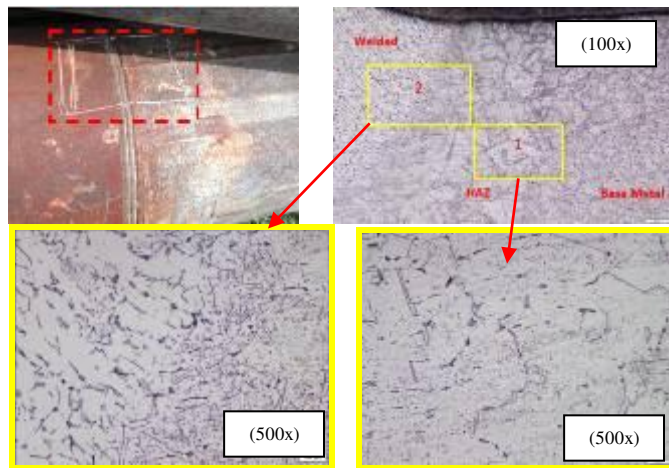
Hasil perbesaran pada sampel di titik 1 terdapat adanya *crack* yang menjalar pada batas butir mulai dari HAZ melewati *fusion line* sampai berhenti di *fusion zone*. Perbesaran 500x pada *fusion zone* atau *welded* menunjukkan adanya delta ferrit. Pada perbesaran 500x daerah HAZ terlihat adanya presipitasi karbida krom pada batas butir. Perbesaran 500x presipitasi karbida krom terlihat sangat banyak. Hal tersebut yang menyebabkan daerah disekitar batas butir menjadi lemah dan terjadi retak pada daerah tersebut. Retak yang menjalar pada batas butir disebut dengan IGSCC (*intergranular stress corrosion cracking*).



Gambar 12. Hasil Pengujian pada Sampel di Titik ke 2

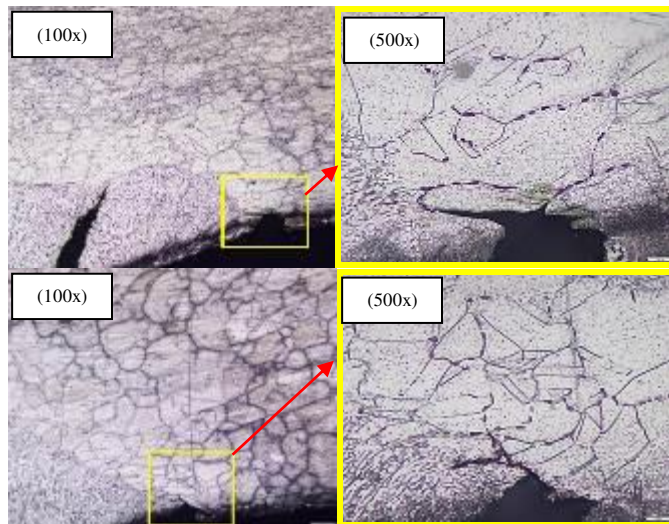
Sampel diambil dari bagian las *longitudinal*, dari hasil pengamatan metalografi dengan perbesaran 100x pada terlihat adanya *initial crack* pada sisi pipa bagian dalam. *Initial crack* yang terjadi pada daerah HAZ dan menjalar melalui batas butir. Pada perbesaran 100x menunjukkan butir HAZ berukuran besar dan tidak homogen dan butir *base metal* yang berukuran lebih kecil dan homogen. Besarnya butiran HAZ maka butir akan rentan terjadi dislokasi dikarenakan batas butir yang menjadi penghambat pergerakan dislokasi sedikit, sehingga

logam akan mudah terdeformasi. Mudahnya bagian HAZ untuk terdeformasi dan dengan adanya presipitasi karbida krom pada batas butir mengakibatkan *initial crack* muncul pada daerah tersebut. Perbesaran 500x terlihat pada daerah HAZ terdapat adanya presipitasi karbida krom.



Gambar 13. Hasil Pengujian pada Sampel di Titik ke 3

Sampel diambil dari sambungan *longitudinal* pipa yang masih utuh, pada pengamatan dengan perbesaran 100x tidak terlihat adanya cacat pada lasan maupun *base metal*, hanya saja butiran pada HAZ terlihat lebih besar dibandingkan dengan *base metal*. Perbesaran 500x menunjukkan pada daerah HAZ terjadi presipitasi karbida krom.

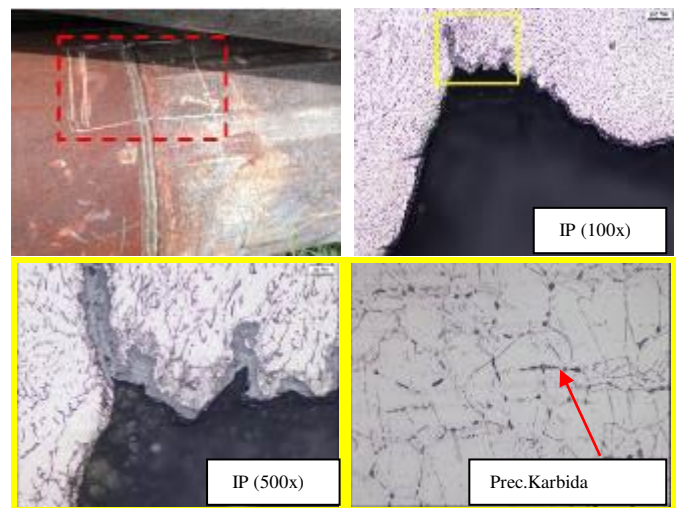


Gambar 14. Hasil Pengujian pada Sampel di Sambungan Reinforce

Sampel terdapat adanya *initial crack* yang menjalar pada batas butir daerah HAZ dan terdapat presipitasi karbida krom pada daerah tersebut. Hasil pengamatan juga terlihat adanya *undercut*. Adanya *undercut* pada lasan dapat mengurangi kekuatan sambungan las, dikarenakan tegangan akan terkonsentrasi pada daerah tersebut, sehingga berpotensi terjadinya retak. *Undercut* pada proses pengelasan disebabkan saat melakukan *capping* dengan kecepatan yang rendah, sehingga *base metal* akan ikut mencair. Adanya *initial crack* dan presipitasi karbida krom pada daerah HAZ retak akan

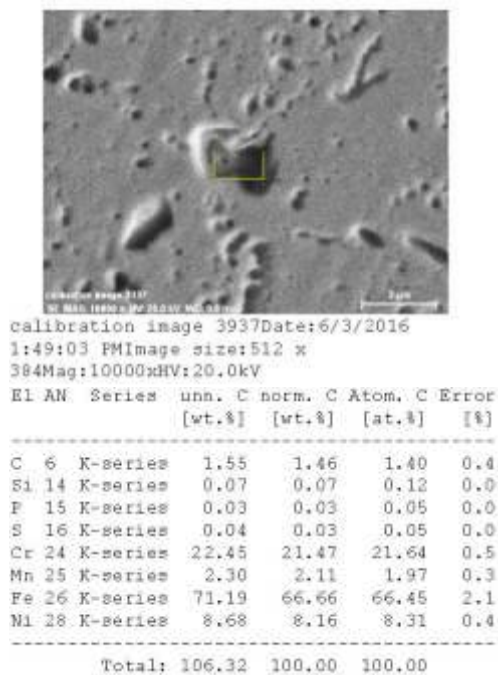
menjalar melalui batas butir, sehingga hal tersebut merupakan penyebab terjadinya *toe crack* saat terjadi pecah pada pipa. Proses pecahnya daerah *circumferential* diyakini selain akibat dari tegangan geser juga akibat adanya *initial crack* yang terjadi pada HAZ.

Dari hasil pengujian sampel pada empat titik ditemukan adanya presipitasi karbida krom pada batas butir baik di daerah HAZ maupun *base metal*. Adanya presipitasi karbida krom pada batas butir membuat daerah tersebut menjadi lemah dan timbul *intergranular cracking*. *Pre-existing crack* yang terjadi pada sambungan longitudinal pipa setelah diteliti juga terdapat adanya *intergranular cracking*. Dari hasil analisa tersebut menyatakan bahwa kegagalan bukan hanya karena tegangan dan adanya *pre-existing crack*, akan tetapi kegagalan disebabkan karena *intergranular corrosion* yang menyebabkan kekuatan material menurun.



Gambar 15. Hasil Pengujian pada Sampel Potongan *Circumferential*

Sampel diambil dari bagian *circumferential*, pengamatan dilakukan untuk menemukan penyebab terjadinya *crack* pada las *circumferential*. Hasil pengamatan fotografi setelah dilakukan pemotongan sampel menunjukkan adanya *incomplete penetration* pada layer pertama proses pengelasan. *Incomplete penetration* disebabkan karena prosedur pengelasan yang kurang baik, biasanya disebabkan karena saat pengelasan tidak melakukan *preheat*, sehingga dengan kecepatan pengelasan yang tinggi dan logam dalam keadaan dingin cairan *filler* akan cepat membeku dan tidak dapat berpenetrasi sampai ke dalam. Dengan adanya *incomplete penetration* pada daerah lasan, maka dilakukan pengamatan lebih lanjut pada daerah tersebut dengan pengamatan metalografi. Hasil dari pengamatan metalografi dengan perbesaran 100x menunjukkan ujung-ujung *incomplete penetration* terlihat tajam, setelah dilakukan perbesaran hingga 500x terlihat dari ujung-ujung tajam tersebut menjalar *crack* menuju dalam bagian *fusion zone*. Selain itu pada bagian HAZ dengan perbesaran 500x sangat jelas terdapat presipitasi karbida krom pada batas butir.



Gambar 16. Hasil SEM-EDX

Tabel 3.
Perbandingan Hasil OES dan EDX

Unsur	Pengujian OES (%)	Pengujian EDX (%)
C	0,049	1,40
Cr	18,16	21,64
Mn	1,608	1,97
P	0,01	0,05
S	0,025	0,05
Si	0,479	0,12
Ni	8,52	8,31
Fe	71,149	66,45

Setelah dilakukan pengujian EDX pada bagian endapan berwarna hitam tersebut hasilnya adalah terdapat unsur C 1.4% dan unsur Cr 21.64%, apabila dibandingkan dengan hasil pengujian OES (*Optical Emission Spectrometry*) unsur C 0.049% dan Cr 18.16%. Hasil dari EDX menunjukkan adanya peningkatan persentase unsur karbon dan krom yang signifikan pada batas butir, hal ini menunjukkan pada daerah tersebut terdapat presipitasi karbiada krom. Hasil pengujian EDX juga tidak menunjukkan adanya unsur korosif Cl (*chloride*), sehingga *pre-existing crack* bukan terjadi karena SCC (*Stress Corrosion Cracking*) melainkan karena IGSCC (*intergranular stress corrosion cracking*).

E. Solusi dan Rekomendasi

Penggantian pipa TP304H *welded* menjadi TP304H *seamless* dapat meningkatkan kekuatan pipa. Hasil penelitian membuktikan kegagalan terjadi pada daerah HAZ sambungan *longitudinal* yang disebabkan *intergranular corrosion*, selain itu kegagalan pada pipa juga dipengaruhi dengan pipa yang sudah beroperasi lebih dari 15 tahun. Penggantian dengan TP304H *seamless* pipe dirasa lebih efektif karena dengan biaya yang minimal dapat menaikkan kekuatan pipa. Tidak adanya sambungan *longitudinal* pada pipa *seamless*, maka kegagalan serupa dapat dicegah dan akan menambah umur pakai pipa.

Untuk kegagalan pada sambungan *circumferential*, hal tersebut dapat dicegah dengan penggunaan prosedur yang sesuai pada proses *reweld* ataupun proses pengelasan pada *reinforce*.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa terdapat beberapa penyebab terjadinya kegagalan, yaitu:

- Hasil pengujian EDX/EDS (*Energy Dispersive X-Ray Analysis*) membuktikan adanya peningkatan unsur C dan Cr pada batas butir.
- Kegagalan pada *line A 1011-14"* bukan hanya disebabkan oleh adanya tegangan dan *pre-existing crack* tetapi juga dikarenakan adanya IGSCC (*intergranular stress corrosion cracking*), dan juga disebabkan oleh umur pipa mencapai lebih dari 15 tahun. Hasil pengujian EDX membuktikan adanya IGSCC (*intergranular stress corrosion cracking*).
- Hasil pengamatan struktur mikro bagian las *circumferential* menunjukkan adanya *incomplete penetration* pada *fusion zone*, setelah dilakukan perbesaran 500x cacat las tersebut berujung runcing yang menyebabkan *crack* pada *fusion zone*. Hal tersebut menjadi penyebab terjadinya *crack* pada las *circumferential* pipa.

Solusi dan rekomendasi yang akan diajukan agar kegagalan yang serupa tidak terulang lagi adalah sebagai berikut:

- Penggantian pipa TP304H *welded* menjadi TP304H *seamless* dapat meningkatkan kekuatan pipa. Penggantian dengan TP304H *seamless* pipe dirasa lebih efektif karena dengan biaya yang minimal dapat menaikkan kekuatan pipa. Tidak adanya *sambungan longitudinal* pada pipa *seamless*, maka kegagalan serupa dapat dicegah dan akan menambah umur operasi pipa.
- Untuk menaggulangi terjadinya *crack* di setiap *joint* maka proses pengelasan harus disesuaikan prosedur.

DAFTAR PUSTAKA

- Denny A. Jones. *Principles and Prevention of Corrosion Second Edition*. University of Nevada: Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Mobley Keith. R., Lindley R. Higgins dan Darrin J. Wikoff. 2008. *Maintenance Engineering Handbook Seventh Edition*. New York: Mc Graw Hill.
- ASM. 1987. *Handbook Volume 12 Fractography*. ASM International the Materials Information Company. Amerika
- Brook, R.C dan Choudhury, A. 2002. *Failur Analisis of Engineering Material*. New York: Mc Graw-Hill.
- Fontana, Mars G. 1978. *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill Inc.