ANALISA KEGAGALAN PADA PIPA ULIR DI LINGKUNGAN PERMINYAKAN
FAILURE ANALYSIS OF TUBING-DRILL PIPES UNDER OIL ENVIRONMENT

Deden Suripto
Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur – BPPT
Kawasan PUSPIPTEK Gd.220 Serpong, Tangerang 15314
e-mail : deden_suripto@yahoo.co.id

Tanggal masuk naskah : 18/07/2014 ; Tanggal revisi: 19/09/2014 ; Tanggal persetujuan cetak : 08/10/2014

Abstrak

Penelitian terhadap kerusakan pada pipa ulir pada lingkungan perminyakan ,telah dilakukan. Kegagalan dari suatu komponen dapat disebabkan oleh berbagai macam faktor, mulai dari kesalahan pemilihan material sampai dengan kesalahan operator dalam service-nya. Tujuan penelitian adalah untuk mencari penyebab kegagalan terjadinya cacat pada material tubing setelah dioperasikan. Untuk mengetahui penyebabnya dilakukan analisa kegagalan dengan menggunakan beberapa metode, yaitu: pemeriksan visual dan dimensi, pengujian tarik dan kekerasan, pemeriksaan makroskopis dan mikroskopis, pengujian komposisi kimia bahan, dan pengujian SEM/EDS. Hasil penelitian membuktikan bahwa adanya unsur korosif dalam material seperti CL^- dan S^{-2} sehingga sangat potensial untuk terjadinya serangan korosi sumuran maupun korosi celah kikisan pada ujung ulir dan akan berpenetrasi pada lapisan pasivasi Fe_2O_3 yang sifatnya mengabsorbsi anion-anion agresif seperti CL^- dan S^{-2}

Kata kunci *: analisis kegagalan, pipa ulir, korosi.*

Abstract

The a research on the damage of tubing-drill pipes at an oil company, has been carried out. Failure of the component may be caused by many factors including material selection and their mishandling during in service. The objective of this research was to find out the reason of any failure or defects of a material during in, some testing methods were used, namely: visual and dimensions test, strength and hardness tests, macroscopic and microscopic test, the chemical analysis of material test, and SEM/EDS test. The results of proved that there were some corrosive elements such as the Cl and S^{-2} so that there was a the potential for the occurence of pitting and crevice corrosivation at the end of screws and these will be penetrated into the passivation layers of Fe_2O_3 that absorb aggressive anions such as Cl^- and S^{-2}.

Keywords *: failure analysis, drill pipe, corrosion.*

1. PENDAHULUAN

Kerusakan komponen dan peralatan industri harus ditangani secara tuntas penyebab utamanya agar tidak terjadi kerusakan sejenis dimasa mendatang. Kesalahan pemilihan material, kesalahan fabrikasi, ketidaksesuaian jenis material dengan kondisi kerjanya, merupakan contoh penyebab mengapa banyak komponen atau peralatan industri mengalami gagal fungsi dalam pemakaiannya[1].

Kasus kegagalan sangat merugikan, karena itu untuk menghindari peristiwa serupa maka

perlu dipelajari sebab-sebab terjadinya kegagalan. Penyelidikan terhadap sebab-sebab terjadinya kegagalan akan bermanfaat terutama untuk menghindari kerugian biaya yang berlebihan. Dengan mengetahui sebab kegagalan maka berbagai tindakan pencegahan awal dapat dilakukan. Kesalahan mungkin saja terjadi sejak tahap perencanaan. Kesalahan tersebut bisa disebabkan oleh; kesalahan perencanaan dimensi, kesalahan material, kesalahan penempatan pada kondisi lingkungan tertentu, kesalahan perhitungan tegangan dan lain-lain[2].

Berdasarkan kenyataan di atas, makalah ini akan memaparkan analisis kegagalan sehubungan dengan terjadinya cacat pada daerah ujung pipa ulir di perusahaan perminyakan yang berlokasi di Cirebon. Sehubungan hal tersebut, maka perusahaan tersebut mengirimkan dua buah (No 3 dan No 5) potongan pipa ulir yang rusak (cacat) karena korosi untuk dilakukan analisis. Data teknis dari pipa ulir adalah sebagai berikut; material pipa ulir : baja karbon *medium* dengan spesifikasi API 5 C5 Gr N-80, No 3 mempunyai diameter 73,5 mm dengan panjang 430 mm, No 5 mempunyai diameter 73,5 mm dengan panjang 535 mm.
Analisa kegagalan yang dilakukan bertujuan untuk mencari dan mendapatkan informasi penyebab kegagalan terjadinya cacat korosi pipa ulir pada celah ulir luar dan ulir dalam, memberikan gambaran tentang mekanisme kegagalan yang terjadi pada pipa ulir, mencegah, menanggulangi dan memberikan rekomendasi untuk menghindari kegagalan yang sama dikemudian hari kepada manajemen perusahaan minyak tersebut.

Analisa Kegagalan

Berdasarkan teori analisa kerusakan / kegagalan (*failure analysis*)[3-9] , adalah kegiatan atau usaha untuk menyelidiki sebab-sebab kegagalan suatu komponen. Semua indikasi dipelajari dan diteliti untuk mendapatkan keputusan apakah komponen layak dperbaiki atau tidak. Modus kegagalan bisa berupa keausan. Kegagalan yang ekstrim adalah bilamana komponen mengalami patah atau pecah.

Modus Kegagalan[4]

Komponen akan gagal bila kondisi kerja menyebabkan besaran operasi mencapai atau melampaui batas kritis sifat material. Pertanyaan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk rumus umum sebagai berikut:
Besaran akibat kondisi operasi ≥ Sifat kritis material. Penggunaannya untuk modus berbagai kegagalan dirangkum pada Tabel 1. Tabel 1 ini hendaknya diartikan bahwa bila besaran akibat kondisi operasi (ruas kiri) mencapai atau melampaui batas kritis sifat material (ruas kanan), maka komponen akan mengalami kegagalan.
Arti lanjut dari bentuk umum kriteria kegagalan tersebut di atas adalah bahwa kegagalan akan terjadi bila:

1. Parameter kiri membesar dan atau
2. Parameter kanan berubah menjadi kecil

Dari logika ini kita perlu mengembangkan semua kemungkinan yang dapat memperbesar ruas kiri (=memperparah kondisi operasi), serta kemungkinan-kemungkinan yang menyebabkan mengecilnya ruas kanan (=menurunkan sifat kritis material).
Seringkali kegagalan terjadi setelah beberapa waktu beroperasi normal dan aman. Pertanyaannya tentu saja: “Mengapa komponen itu gagal?” Mungkinkah telah terjadi hal atau kondisi yang memperbesar ruas kiri hingga melampaui ruas kanan (sifat kritis material)? Dari konteks material, mungkinkah terjadi degradasi material selama beroperasi ?

Tabel 1. Kegagalan komponen untuk berbagai modus kegagalan

Besaran akibat kondisi operasi	Sifat kritis material	Peristiwa yang akan terjadi
Tegangan kerja σ_w	Kekuatan luluh σy	Deformasi plastis
Tegangan kerja σ_w	Kekuatan tarik σy	Patah statis
Tegangan amplitudo σ_a	Batas lelah (*Fatigue limit*) σf	Patah lelah

Tegangan dinamik setempat $\sigma' = K_t . \sigma_{nom}$	Kekuatan luluh σy	Awal retak lelah
Intensitas tegangan $K = \beta.\sigma\sqrt{(\pi a)}$	Ketangguhan retak (*Fracture toughness*) K_c atau K_{Ic}	Komponen yang retak lelah akan patah
Tegangan kerja σ_w	Batas mulur (*Creep limit*)	Deformasi plastis akibat *creep* (pada suhu tinggi)
Tegangan kerja σ_w	Kekuatan terhadap retak korosi tegangan σ_{scc}	Retak akibat korosi tegangan
Suhu lingkungan terlalu rendah	Suhu transisi material	Patah getas (*brittle fracture*)
Lingkungan terlalu korosif	Batas korosivitas	Laju korosi yang tinggi

Sifat Material[4]

Sifat material ditentukan oleh berbagai hal yang secara arif diformulasikan oleh kelompok peneliti di Departemen MTM Katholieke Universiteit Leuvin Belgia, yaitu; (1) komposisi kimia material, (2) struktur material, (3) tekstur kristalografis, (4) tegangan sisa, (5) permukaan.

Jelaslah bahwa perbedaan dalam parameter material tersebut di atas akan mengubah sifat material. Dalam melakukan analisis kegagalan kesadaran akan hal ini penting dalam meninjau kemungkinan penyebab perubahan sifat material.

Salah satu parameter yang dominan adalah struktur material, makro ataupun mikro. Struktur material dipengaruhi oleh kompensasi material dan dapat berubah oleh proses pengerjaan hingga tahap akhir, bahkan dapat juga berubah selama beroperasi, tergantung pada kondisi operasinya.**Struktur Material**[4]

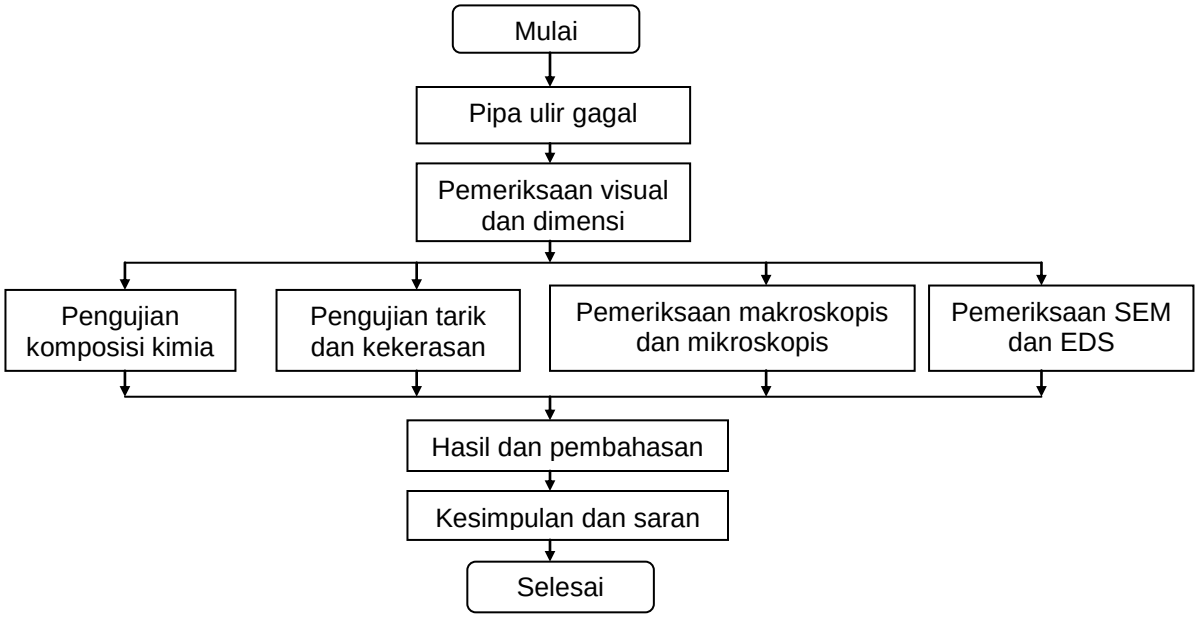
pemilihan material selalu dikaitkan dengan persyaratan operasi yang harus dipenuhi oleh sifat-sifat material. Secara filosofis, pada masa kini kegiatan disain material itu adalah melakukan desain terhadap struktur material. Oleh karenanya setiap perubahan pada struktur material pasti ada implikasinya pada sifat material itu. Pada Tabel 2 diperlihatkan rangkuman berbagai proses/peristiwa yang mengubah struktur material, baik yang sengaja, maupun tidak sengaja. Isi Tabel 2 ini dapat ditambah dengan peristiwa (mekanisme) lain yang mengubah sifat. Selain itu cacat material sering pula teramati, seperti: inklusi, retak mikro, porositas, blister, lipatan dan seterusnya. Semua itu pasti akan berpengaruh terhadap sifat material.

Tabel 2. Rangkuman berbagai proses yang mengubah struktur material

No	Peristiwa	Sifat material
1	Ukuran butir terlalu besar	Menjadi getas
2	Dekarburisasi	Kekuatan setempat turun
3	Difusi	Perubahan sifat di permukaan
4	Sensitisasi (pada *stainless steel*)	Mudah terserang korosi batas butir
5	*Dezincfication* (pada kuningan)	Terjadi korosi selektif
6	Presipitasi	Mengubah kekuatan, keuletan, ketahanan lelahdan *fracture toughness*
7	*Quench* & temper	Terlalu keras atau terlalu lunak
8	Segregasi	Perbedaan sifat didalam material
9	Rekristalisasi	Perubahan kekuatan dan keuletan
10	Inokulasi dan nodularisasi grafit (pada besi cor)	Kekuatan dan keuletan besi cor

3. BAHAN DAN METODA

Skema penelitian untuk mencari penyebab kegagalan yang terjadi pada pipa ulir yang dilakukan dengan menggunakan metode *failure analysis* ditunjukkan pada Gambar 1.
Metoda yang digunakan untuk menganalisis cacat korosi pada daerah ujung pipa ulir adalah metode analisis kegagalan (*failure analysis*) yaitu suatu langkah pemeriksaan kegagalan atau kerusakan pada suatu komponen yang mencakup situasi dan kondisi kegagalan atau kerusakan tersebut, sehingga dapat ditentukan penyebab dari kegagalan/kerusakan yang terjadi pada daerah pipa tersebut. Langkah ini disertai dengan pemeriksaan dan pengujian-pengujian sebagai berikut; pemeriksaan visual dan dimensi, pengujian komposisi kimia, uji tarik dan kekerasan, pemeriksaan makroskopis dan mikroskopis, pemeriksaan *Scanning Electrons Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersed Spectometry* (EDS).



Gambar 1 : Metodologi penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pemeriksaan Visualisasi dan Dimensi

Pemeriksaan yang pertama kali dilakukan yaitu pemeriksaan visual dan dimensi.

Berdasarkan pengamatan visual pada daerah permukaan luar terlihat adanya korosi merata yang signifikan. Selain itu ada cacat pada daerah ulir *tubing* yang diprediksi pada daerah ulir tersebut ada celah yang menyebabkan terjadinya korosi celah oleh media korosif (*crevice corrossion*), sebagai ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 2.

Gambar 2 : Potongan tubing No3: panjang 430 mm, diameter 73,5 mm dan pipa No.5: panjang 535 mm, diameter 73,5 mm

Gambar 3 : Bentuk korosi pada permukaan pipa No.5

Gambar 4 : Cacat slek pada daerah ujung pipa berulir pipa No.3.

3.2. Analisis Komposisi Kimia

Komposisi kimia bahan untuk pipa no.3 dan no.5 (Gambar 2 dan Gambar 4) telah dilakukan penelitian dengan spectrometer (AAS) yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.

Dari hasil uji komposisi kimia dinyatakan bahwa material pipa adalah baja karbon medium dengan paduan rendah. Kehadiran unsur Mn-Cr-Mo dalam material sangat diperlukan untuk menahan gesekan serta tahan terhadap lingkungan korosif. Dari data hasil uji komposisi kimia terbukti bahwa ketiga unsur tsb relatif sangat kecil, dengan demikian material pipa akan rentan terhadap serangan yang bersifat korosif. Sehingga kekuatan material akan menurun akibat gesekan pada beban yang bekerja (beban puntir).

Tabel 3. Hasil uji komposisi kimia pada pipa ulir

Unsur	Persentase berat (%)		API.5CT. GR.N-80
	No3	No5	
C	0.2804	0.32402	
Si	0.32775	0.35161	
S	0.00936	0.01138	0.03 Max
P	0.0224	0.027	0.03 Max
Mn	1.50522	1.48929	
Ni	0.00962	0.0098	
Cr	0.02575	0.04321	
V	0.11696	0.12583	
Cu	0.00524	0.00546	
W	0.00392	0.00354	
Ti	0.00304	0.00305	
Sn	0.00304	0.00272	
Al	0.00379	0.00307	
Zr	0.00075	0.00071	
Zn	0.00081	0.00054	
Fe	97.70902	97.60717	

3.3. Uji Tarik

Pada Tabel 4 diperlihatkan hasil uji pipa ulir. Menujukkan spesifikasi material termasuk material pipa ulir yang mempunyai ketangguhan cukup kuat, karena diperuntukkan untuk beban tinggi, disamping itu tingkat elongasi mempunyai nilai cukup. Jadi hasil uji tarik masih memenuhi persyaratan sifat mekanik untuk pipa ulir.

Tabel 4. Hasil uji tarik pipa

No	Sifat Mekanik	Hasil uji (%)		API.5CT. Gr.N-80 Psi kgf/mm^2
		No3	No5	
1	Kuat tarik kgf/mm^2	87,2	97,3	70,3
2	Kuat luluh kgf/mm^2	64,8	72,4	56,7 – 77,3
3	Elongasi (%)	19,4	13,8	Min 12

3.4. Hasil Uji Keras

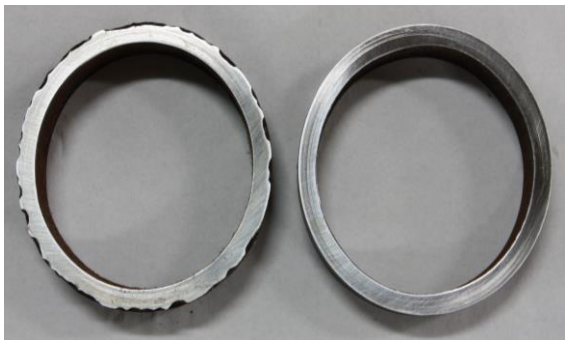
Pengujian kekerasan dengan menggunakan metode *Vickers* menggunakan indentor intan dengan beban 500 kg pada masing-masing spesimen. Pengujian kekerasan dilakukan dalam 5 kali titik pengujian pada posisi potongan melintang dan hasil pengujian kekerasan ditunjukkan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hasil uji keras Vickers (VHN) pada potongan melintang pipa No 3 dan 5

No	Pipa No. 3	Pipa No. 5
1	231	256
2	231	256
3	231	285
4	231	285
5	220	270
Rata-rata	229	270

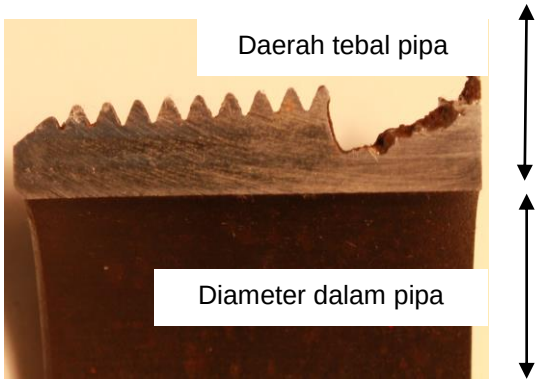
3.5. Hasil Metalografi

Pipa ini termasuk pipa tak berkampuh (*Seamless pipe*) yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 : Potongan pipa arah melintang No.3 dan No 5 yang memperlihatkan jenis pipa tanpa sambungan (*seamless*)

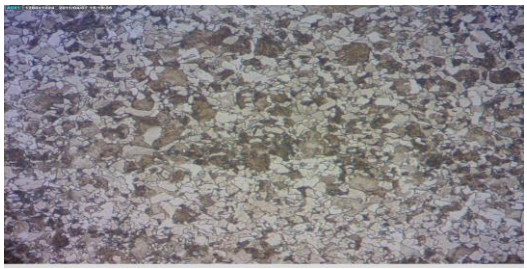
Pemeriksaan makro dilakukan pada penampang ujung ulir pipa No 3 yang telah mengalami slek akibat gesekan dan penggetasan oleh lingkungan korosif pada celah antara ulir dalam dan luar. Hal ini material tersebut akan mengalami penipisan yang akhirnya akan mengalami patah (*cracking corrossion*). Sebagai ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 6.



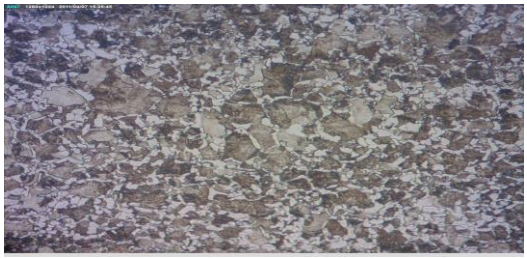
Gambar 6 : Penampang ujung ulir pipa No3 yang telah mengalami slek, (lihat tanda panah)

3.6. Pemeriksaan Struktur Mikro

Hasil pemeriksaan struktur mikro pada pipa No3, memperlihatkan struktur yang terbentuk adalah ferit-perlit (ferit berwarna terang, perlit berwarna gelap) dengan kekerasan rata-rata 220 HV, dan kondisi struktur masih normal (Gambar 7a). Hasil pemeriksaan struktur mikro pada pipa No5, memperlihatkan struktur ferit-perlit (ferit berwarna terang, perlit berwarna gelap). Struktur perlit pada pipa No 5 lebih dominan di dibanding dengan struktur perlit pada pipa No 3, dengan kekerasan rata-rata pada material pipa No 5 adalah 270 HV. Dengan demikian kekerasan material pipa No 5 lebih tinggi dibanding material pipa No 3 (Gambar 7b).



(a)

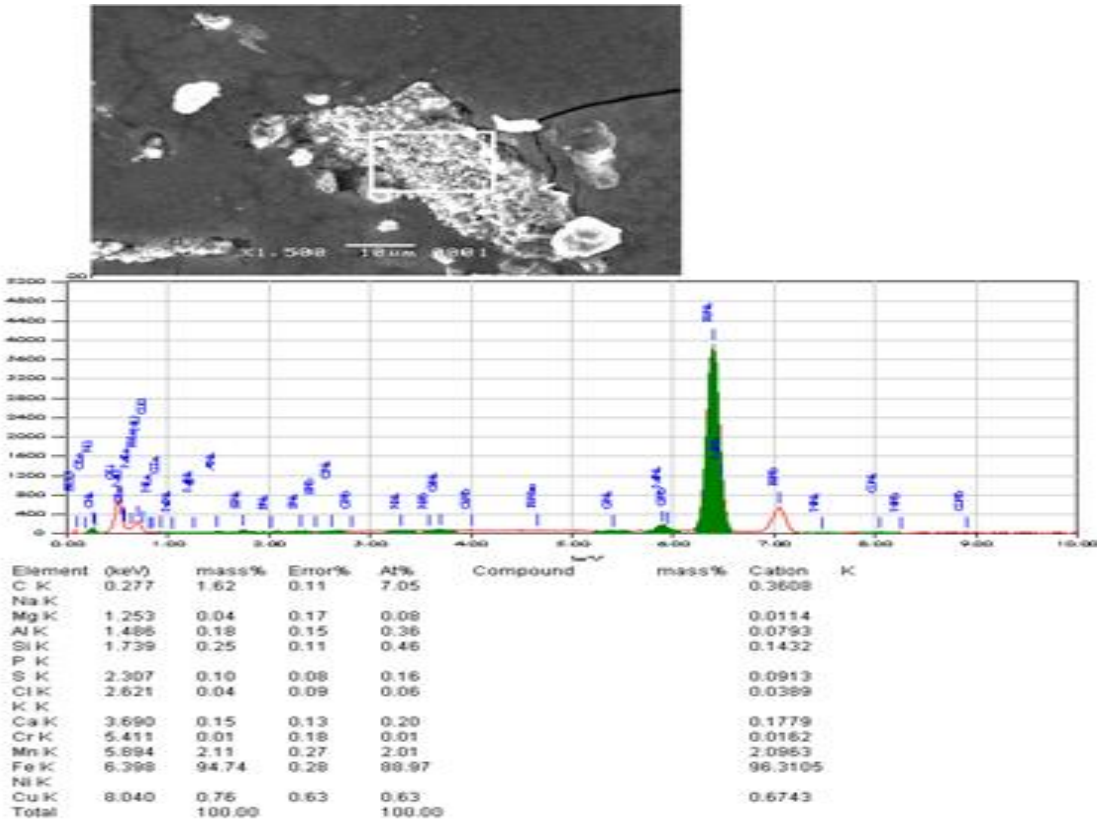


(b)

Gambar 7: Struktur dalam material pipa berupa ferit dan perlit; (a) pipa No 3, (b) pipa No 5. Etsa Nital 2%, perbesaran 200x

3.7. SEM dan EDS

Pemeriksaan SEM memperlihatkan produk korosi dibagian yang cukup tebal dan rapat pada pipa 3 dan No 5 (Gambar 8). Produk korosi tersebut bersifat getas dan memiliki sifat *porous*, sehingga korosi yang berlapis-lapis akan rentan terhadap lingkungan alkalis. Produk korosi yang yang berlapis-lapis akan rentan terhadap lingkungan korosif seperti ion CL^{-1} dan ion $SO2^{-2}$ karena bersifat *porous* sehingga dapat berpenetrasi pada logam dasarnya. Di samping itu terlihat pada foto visual permukaan telah terjadi korosi yang dimungkinkan akibat sejenis mikroba (*corrossion microbatic*) seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Element	(keV)	mass%	Error%	At%	Compound	mass%	Cation	K
C K	0.277	1.62	0.11	7.05			0.3608	
Na K								
Mg K	1.253	0.04	0.17	0.08			0.0114	
Al K	1.486	0.18	0.15	0.36			0.0793	
Si K	1.739	0.25	0.11	0.46			0.1432	
P K								
S K	2.307	0.10	0.08	0.16			0.0913	
Cl K	2.621	0.04	0.09	0.06			0.0389	
K K								
Ca K	3.690	0.15	0.13	0.20			0.1779	
Cr K	5.411	0.01	0.18	0.01			0.0162	
Mn K	5.894	2.11	0.27	2.01			2.0963	
Fe K	6.398	94.74	0.28	88.97			96.3105	
Ni K								
Cu K	8.040	0.76	0.63	0.63			0.6743	
Total		100.00		100.00				

Gambar 8 : Hasil uji SEM-EDS pada permukaan korosi (komposisi senyawa kerak pada daerah patahan).

3.8. Pemeriksaan EDS

Pengujian komposisi senyawa kerak pada daerah patahan dan daerah permukaan slek akibat korosi dan gesekan, dilakukan dengan uji EDS dapat dilihat pada Tabel 6 dibawah ini.

Tabel 6. Hasil uji komposisi kerak dengan EDS pada pipa No 3 dan 5

No	Unsur	Daerah Patahan			Daerah Slek Ujung Ulir		
		I	II	III	I	II	III
1	Karbon (C)	5,53	1,62	4,50	-	-	-
2	Natrium (Na)	0,15	-	-	-	-	-
3	Magnesium (Mg)	0,22	0,04	0,18	0,06	0,45	-
4	Silika (Si)	1,07	0,25	0,83	2,77	2,80	0,18
5	Fosfor (P)	-	-	0,04	0,22	0,09	0,18
6	Sulfur (S)	0,06	0,10	0,09	0,24	1,50	0,17
7	Klor (Cl)	0,17	0,04	-	0,01	0,65	0,42
8	Kalium (K)	0,07	-	0,09	-	0,34	0,22
9	Kalsium (Ca)	0,45	0,15	-	0,06	1,57	0,10
10	Besi (Fe)	90,11	94,74	93,99	93,85	79,76	76,40
11	Oksigen (O)	-	-	-	0.98	12,85	22,47

Komposisi kimia senyawa kerak bagian permukaan daerah slek pada ujung ulir dan daerah patahan dari contoh pipa umumnya mengandung Fe dan O sebagai produk korosi. Produk korosi yang terjadi pada lingkungan *Aqueous* berwarna merah kecoklatan dan merupakan lapis lindung, akan tetapi memiliki karakteristik *porous*, sehingga korosi yang terjadi berada dalam lingkungan alkalis dengan reaksi elektrokimia sebagai berikut:

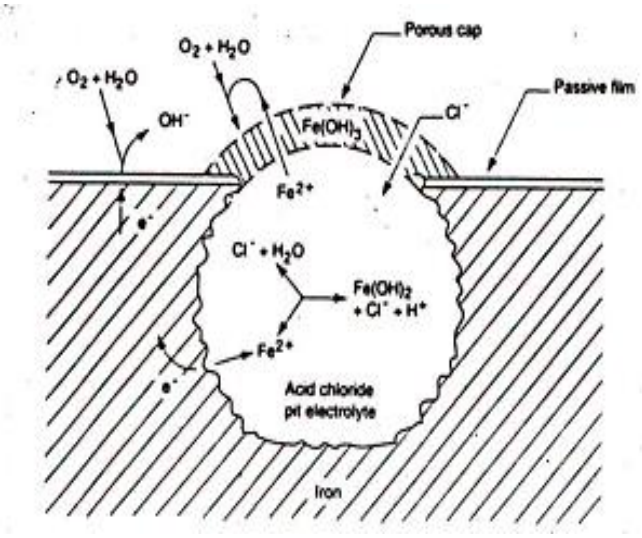
Anoda : $Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e$
Katoda : $O_2 + 2H_2O + 4e \longrightarrow 4OH$
$H_2O + 2e \longrightarrow H_2 + 2\,OH$

Dengan reaksi totalnya:
$Fe + 2H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + H_2$

Adanya O2 memungkinkan terbentuknya Fe $(OH)_2$, yaitu:
$2\,Fe(OH)_2 + H_2O + ½\,O_2 \longrightarrow 2\,Fe(OH)_2$

Dari hasil uji EDAX (Tabel 4) ditemukan adanya khlorida (CL) pada permukaan korosi atau serbuk korosi yang konsentrasinya yaitu 0,17 – 0,42 – 0,65 %. Ion khlorida dikenal sebagai ion yang sangat agresif dan sangat potensial untuk terjadinya korosi sumuran, sehingga dapat berpenetrasi kedalam lapis lindung Fe $(OH)_2$ atau $FeOH_2O$ maupun Fe $(OH)_3$ atau $Fe2O_33H_2O$. Terjadinya korosi sumuran ditunjukkan pada Gambar 9.

Dengan adanya ion khlorida tersebut maka total reaksi elektronika yang berlangsung adalah :
$Fe^{2+} + H_2O + 2\,CL \longrightarrow Fe(OH)_2 + HCL$
Propagasi sumuran akan berlangsung secara *autocatalytic* pada suatu saat bila ada tegangan yang melebihi tegangan maksimum bahan maka retakan tidak dapat dihindari.



Gambar 9 **:** Profil korosi sumuran .

4. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian, analisa dan pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut:

Secara visualisasi permukaan pipa ulir telah terjadi korosi merata berwarna merah kecoklatan.

Hasil komposisi kimia termasuk baja karbon medium termasuk spec API 5 C5 Gr N-80.Hasil pemeriksaan makro terlihat pada ujung ulir ada penipisan ketebalan yang disebabkan oleh korosi celah (*crevice corrossion*),hasil mikrostruktur memiliki struktur ferit-perlit dengan kondisi masih normal ,hasil SEM & EDS menunjukkan adanya unsur korosif seperti CL^- dan S^{-2} sehingga sangat potensial untuk terjadinya serangan korosi sumuran ,terjadinya slek pada ujung ulir disebabkan oleh lapisan pasivasi Fe_2O_3 yang sifatnya mengabsorbsi anion-anion agresif seperti CL^- dan S^{-2} ,selanjutnya penulis sarankan yaitu pada daerah ulir kelonggaran disesuaikan dengan ketentuan teknis dan pada korosi permukaan perlu dilakukan analisis mikrobiologi untuk mengetahui adanya mikro organisme tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

1. Timothy Hill, Koch Refining, Pine Bend, MN, *Journal* "*Heater Tube Life Management*", National Petroleum Refiners Association Plant Maintenance Conference, May 22-25 ,2010.
2. Helmut Thielsch,"*Defects and Failures in Pressure Vessels and Piping",* Publising by Robert E. Krieger, Malabar, Florida. 7-11. 2009
3. Francis Wildy,"*Fire heater optimation*", AMETEK process Instruments, Freeport Road - Pittsburgh. 2009
4. R. E. Smallman, CBE, DSc, FRS, FREng, FIM And R. J. Bishop, PhD, CEng, MIM, *"Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering",* Science, process and applications, Sixth Edition, Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1995, 168-181.2010
5. W. R. Warke, "*Failure Analysis And Prevention",* Stress-Corrosion Cracking, ASM Handbook, Vol.9, 1810. 2011
6. Colangelo and Heiserc, *"Analysis of Metalurgical Failures*", Jhon Wiley & Son Inc, New York, p1-2.81-84. 2009
7. Bruce L. Bramfitt, *"Carbon And Alloys Steel",* Handbook of Materials Selection Edited by Myer Kutz, JOHN Wiley & Sons inc, New York, p 32 - 36. 2012
8. "Metallography and Microstructures", ASM Handbook, Vol.9, 2435, 2686,2010
9. William C. Leslie, *"The Physical Metallurgy of Steels",* Mc-Graw-Hill Company, Bruce L. Bramfitt, "Carbon And Alloys Steel", Handbook of Materials Selection *Edited* 185, 14-17. 2009
10. ....."*Corrosion",* Introduction, ASM Handbook, Vol.13, 11, 33. 2011
11. George E. Dieter, *"Mechanical Metallurgy",* SI Metric Edition, McGraw-Hill, 289. 2012
12. ....."*Ferrous Material Specifications",* Materials, ASME II Part A, ASME Boiler & Pressure Vessel Code, New York, 205 – 219. 2009
13. G Antaki, "*Piping And Pipeline Engineering",* Design, Construction, Maintenance, Integrity And Repair, Marcel Dekker. 2011