

ANALISIS KEGAGALAN PIPA *ELBOW* 180° PADA *FURNACE*

*Gregorius Sasongko¹, Sri Nugroho²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: greg.wirastama@gmail.com

Abstrak

Pipa dalam industri minyak dan gas berfungsi sebagai pendistribusi aliran minyak melalui proses pengolahan hingga menjadi minyak siap jual. Namun jika terjadi kegagalan pada komponen ini akan berakibat fatal pada perusahaan migas itu sendiri. Penelitian ini akan menjelaskan tentang analisis kegagalan pipa *elbow* 180° pada penggunaannya pada *furnace* yang baru beroperasi selama 2 tahun. Kegagalan ini menimbulkan adanya retakan pada bagian samping pipa *elbow* yang berhubungan langsung dengan api dari *burner*. Untuk mengetahui penyebab kegagalan tersebut dilakukan penelitian serta dilakukan investigasi dalam bentuk pengujian laboratorium yaitu pengukuran ketebalan dinding pipa, pengamatan visual, pengujian makrografi dan mikrografi. Dilakukan juga uji komposisi kimia, pengujian kekerasan dengan *Rockwell* dan *Vickers*, terakhir untuk menunjang hasil pengujian laboratorium dilakukan pengujian pada permukaan patahan dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). Terjadinya kegagalan karena fenomena *decarburation* pada permukaan pipa akibat suhu tinggi mengakibatkan nilai kekerasan yang rendah pada bagian permukaan material. Material tersebut memenuhi standar ASTM A234 WPB dari hasil uji komposisi kimia dan mikrografi. Patahan yang terjadi adalah patah lelah (*fatigue fracture*) berdasarkan hasil pengujian makrografi dan SEM karena terlihat *ratchet marks* dan *microcrack* yang diduga sebagai awal terjadi patahan (*crack initiation*). Patah lelah material disebabkan oleh *thermal fatigue* atau karena beban termal secara fluktuatif. Hasil pengukuran dinding pipa mengindikasikan umur pipa masih layak dan hasil uji EDS menunjukkan adanya korosi pada permukaan patahan dengan Oksigen (O) dan Besi Oksida (FeO) sebagai produk korosi.

Kata kunci: analisis kegagalan, *decarburation*, patah lelah, pipa *elbow* 180°, *Scanning Electron Microscope*.

Abstract

Pipelines used in the oil and gas industry to distributing flow of oil from the refinery through processing up until become fine oil. But if this component is failure it would be fatal to the oil and gas company itself. Where this research will explain about failure analysis of 180° elbow tube on its use in the furnace during the second year of operation. This cracking failure on the side of the elbow pipe as direct contact with flames from burner. Laboratory investigation is necessary to find the cause of the failure where the testings are wall thickness test, visual observation, micrography and macrography testing. Also the chemical composition test, hardness testing with Rockwell and Vickers, the last to support the results of laboratory testing conducted SEM (Scanning Electron Microscope) and EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) tests on the fracture surface. Failure caused by the phenomenon of decarburation on the surface of the pipe as a result of high temperatures resulted in lower hardness value on the surface of the material, although the material meets the standards of ASTM A234 WPB as the result of chemical composition and micrography. Known failure that occur are fatigue fracture is based on macrography and SEM test result, because there are ratchet marks and microcracks that indicates crack initiation. Fatigue fracture material caused by thermal fatigue or due to fluctuating thermal stresses. The wall thickness test results indicate the age of the pipe should be young and safe, at last EDS test results concluded there is corrosion on the fracture surface with oxygen (O) and iron oxide (FeO) as the cause of the corrosion products.

Keywords: 180° elbow tube, *decarburation*, failure analysis, fatigue fracture, *Scanning Electron Microscope*.

1. Pendahuluan

Pipa adalah istilah untuk benda silinder yang berlubang dan digunakan untuk memindahkan zat hasil pemrosesan seperti cairan, gas, uap, zat padat yang dicairkan maupun serbuk halus. Material yang digunakan sebagai

pipa sangat banyak, diantaranya adalah: beton cor, gelas, timbal, kuningan, tembaga, plastik, aluminium, besi tuang, baja karbon dan baja paduan [1].

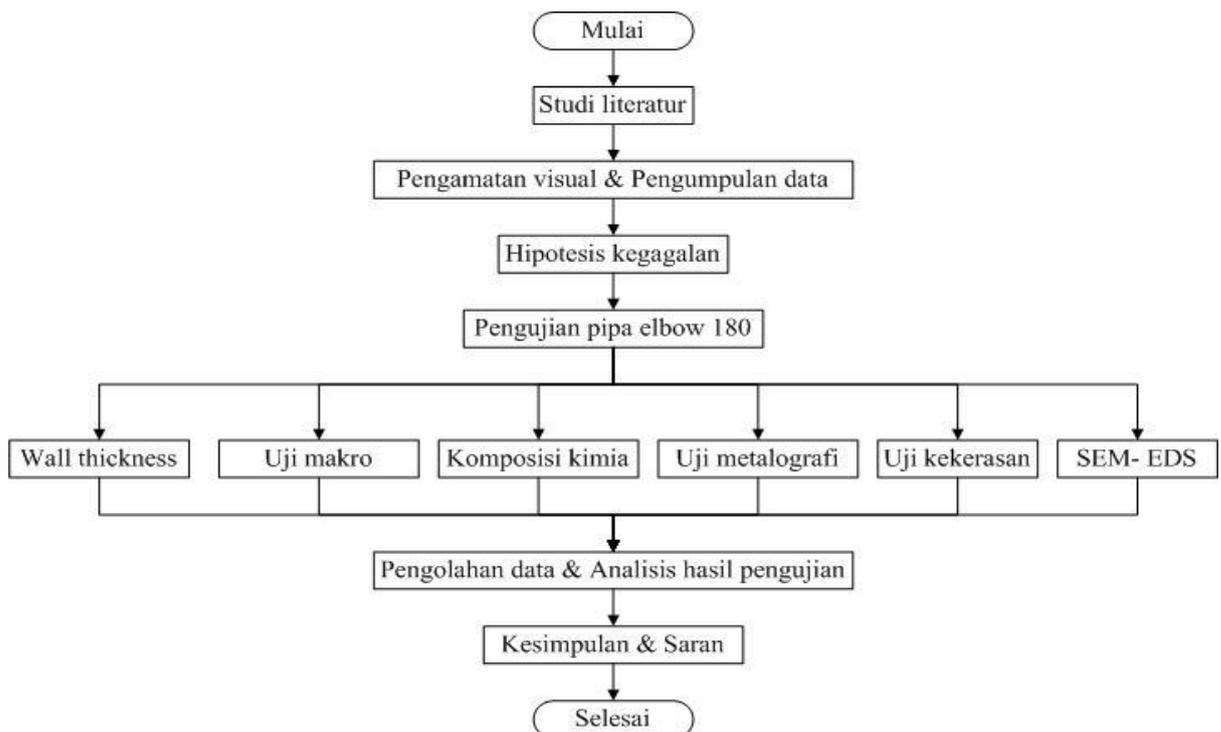
Dalam dunia *engineering* fungsi dan kegunaan dari pipa sangat vital sebagai pendistribusi substansi fluida baik fluida gas maupun fluida cair. Secara khususnya pada industri *oil & gas* fungsi pipa sebagai sarana bagi pendistribusian aliran minyak dari kilang melalui proses pengolahan hingga sampai kepada tangki penyimpanan akhir maupun langsung diterima oleh konsumen. Seluruh perusahaan perminyakan di dunia tentunya menggunakan pipa sebagai sarana pengalir minyak meskipun jenis, ukuran, maupun material pipa yang digunakan berbeda-beda bergantung pada kebutuhan masing-masing perusahaan. Dikarenakan fungsi pipa yang sangat vital dan material yang digunakan bisa beragam, maka studi lebih lanjut dalam pengaplikasian memilih material pipa.

Salah satu cara yang efisien untuk dapat memilih material yang tepat adalah dengan menganalisis kegagalan pada material tersebut apabila komponen atau material tersebut ternyata tidak memenuhi umur pakai yang telah direncanakan. Analisis kegagalan memerlukan pemahaman tentang berbagai aspek, seperti: fungsi komponen sebagai bagian dari suatu sistem peralatan, kondisi operasi dan gejala yang teramati menjelang terjadinya kegagalan. Pengumpulan data material komponen serta proses pengerjaannya akan banyak membantu dalam menentukan penyebab kegagalan. Sampel yang diambil sedapat mungkin dapat memberikan gambaran mengenai analisa kegagalan oleh karenanya lokasi pengambilan harus tepat, serta keadaannya harus sesegera mungkin [2].

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui penyebab awal dan mekanisme terjadinya kegagalan dan memberikan solusi agar tidak terjadi lagi kegagalan komponen pipa *elbow*. Dapat menganalisis terjadinya kegagalan pada pipa *elbow* dengan berdasarkan pengamatan visual, pengukuran ketebalan dinding, uji kekerasan, uji metalografi, uji komposisi, dan uji SEM – EDS. Terakhir untuk mengetahui dan mengidentifikasi adanya korosi pada patahan.

2. Metodologi Penelitian

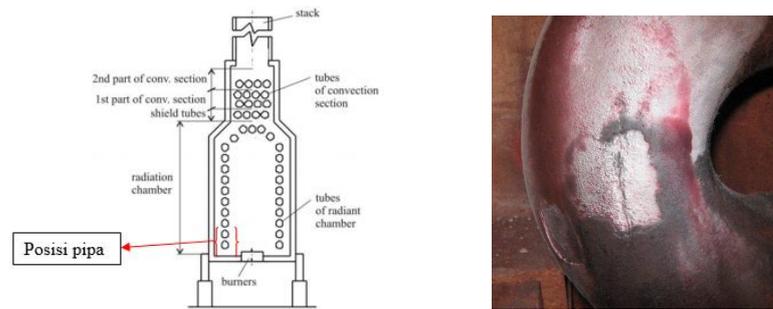
2.1 Diagram alir penelitian



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

2.2 Data lapangan

Pipa *elbow* adalah NPS 4 STD dengan tipe SR (*short radius*) NPS 4 dengan diameter luar (do) = 11.5 cm, diameter dalam (di) = 10 cm, dan jarak antar pusat jari-jari pipa = 20 cm, dan ketebalan pipa (t) = \pm 6 mm. Pipa *elbow* yang akan dianalisis beroperasi di dalam *furnace heater* yang digunakan untuk memanaskan atau meningkatkan temperatur dari minyak mentah (*crude oil*) yang dialirkan menuju proses destilasi. Posisi dan kegagalan dari pipa *elbow* dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. a) Posisi pipa *elbow* pada *furnace* b) *crack* pada pipa *elbow* [4].

Furnace heater beroperasi pada suhu antara 454 – 540 °C hingga pipa *elbow* tersebut mengalami kegagalan berupa *crack* sepanjang ± 9 cm setelah beroperasi selama 2 tahun setelah instalasi yang menyebabkan mengalir keluarnya fluida minyak mentah. Posisi *elbow* tersebut berada pada ruang radiasi *furnace* (*radiation chamber*) yang mengalami kontak dengan sumber pemanasan dari *furnace* (komponen *burner*) dan terletak pada dasar dari *furnace* pada ruang radiasi, yang mengakibatkan pipa *elbow* tersebut mengalami temperatur tertinggi dibandingkan pipa *elbow* lain.

Menurut standar API (*American Petroleum Institute*) *Recommended* 530 suhu pengoperasian dari *furnace* tersebut telah sesuai dengan suhu operasi yang direkomendasikan dan dapat beroperasi mencapai 100.000 jam (± 12 tahun). Dari data di lapangan didapatkan hipotesis antara lain, *corrosion fatigue* karena pengaruh dari senyawa hidrocarbon dari *crude oil* yang mengalir, erosi yang terjadi pada belokan pipa *elbow* yang membentuk *turn-over* arah pipa, dan *carburization* atau *decarburization* yang terjadi pada ion karbon yang terdapat pada pipa *elbow* [4].

2.3 Pengujian komposisi kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia dari pipa *elbow* 180° yang mengalami kegagalan. Kemudian hasil pengujian akan di bandingkan dengan standar yang di keluarkan oleh *American Standart and Testing Materials* ASTM A234 yaitu “*Standard Specification for Piping Fittings of Wrought Carbon Steel and Alloy Steel for Moderate and High Temperature Service*”. Pengujian komposisi kimia ini merupakan hasil dari pipa *elbow* yang dilakukan pada penelitian sebelumnya di Laboratorium Logam Politeknik Ceper, Klaten.

Tabel 1. Perbandingan komposisi kimia pipa *elbow* dengan ASTM A234 WPB [3].

Unsur	Fe	C	P	Mn	S	Si	Cr	Mo	Ni	Co	V
Pipa <i>elbow</i> [7]	98,6	0,141	0,0208	0,546	0,0071	0,212	0,0388	0,0328	0,0072	0,0222	0,0127
ASTM A234 WPB [3]	<i>Balance</i>	0,30 max	0,050 max	0,29- 1,06	0,058 max	0,1 min	0,40 max	0,15 max	0,40 max	0,40 max	0,08 max

Berdasarkan hasil perbandingan komposisi kimia pipa *elbow* 180° yang mengalami kegagalan dengan standar ASTM A234 WPB pada Tabel 1 dapat disimpulkan material pipa *elbow* yang diuji ini masih memenuhi dalam standar ASTM A234 WPB yang berlaku.

3. Hasil Pengujian dan Pembahasan

3.1 Pengamatan visual

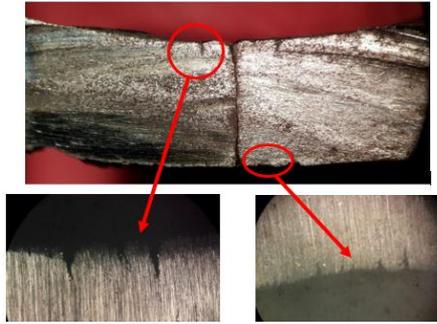
Melakukan pengamatan secara visual merupakan salah satu metode dalam analisis kegagalan. Metode ini bertujuan untuk melihat bentuk dan juga pola patahan yang terjadi pada komponen. Dilihat dari pola dan arah *crack* yang mengikuti bentuk lengkungan dari pipa *elbow* kegagalan material pipa *elbow* 180° terjadi karena erosi dari fluida yang mengalir mengikuti kontur belokan pada pipa *elbow*.



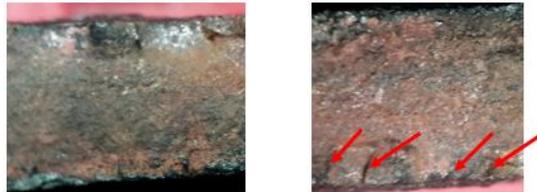
Gambar 3. Pola retakan pada permukaan dalam pipa.

3.2 Pengujian makro

Dengan melakukan pemotretan pada daerah kegagalan pada pipa *elbow* dan dilakukan perbesaran pada spesimen pipa. Patah yang terjadi merupakan patahan yang disebabkan oleh *microcrack* yang merambat dari permukaan diameter luar pipa maupun dari permukaan diameter dalam pipa. *Microcrack* ini merupakan inisiasi retakan atau tahap awal dari penyebab patah yang dialami oleh material pipa. dari tahap pertama ini akan menjadi perambatan retakan yang terakhir akan mengakibatkan patah akhir pada material.



Gambar 4. Patahan yang terjadi pada pipa *elbow* dan *microcrack* yang terlihat pada bagian permukaan.



Gambar 8. Permukaan pipa *elbow* yang mengalami kegagalan.

Permukaan patahan terlihat terdapat awal terjadinya patahan dari permukaan dalam pipa yang berwarna lebih terang dibandingkan dengan bagian patahan akhir yang berwarna lebih gelap. Selain itu pada permukaan patahan beberapa terlihat *ratchet marks* atau ciri-ciri terjadinya patah lelah pada material. Ha ini membuktikan bahwa bentuk patah yang terjadi pada material pipa *elbow* adalah patah lelah (*fatigue fracture*) [6].

3.3 Pengujian *wall thickness*

Pengujian *wall thickness* atau ketebalan pipa dilakukan dengan menggunakan alat ukur mikrometer sekrup untuk mengetahui dimensi ketebalan dari pipa *elbow* yang mengalami kegagalan. Kemudian hasil pengujian akan di bandingkan dengan standar yang di keluarkan oleh *American Standart and Testing Materials ASME 16.9-2012 "Factory-Made Wrought Butt welding Fittings"* [5]. Sehingga dapat diketahui umur dari pipa *elbow* yang telah beroperasi.

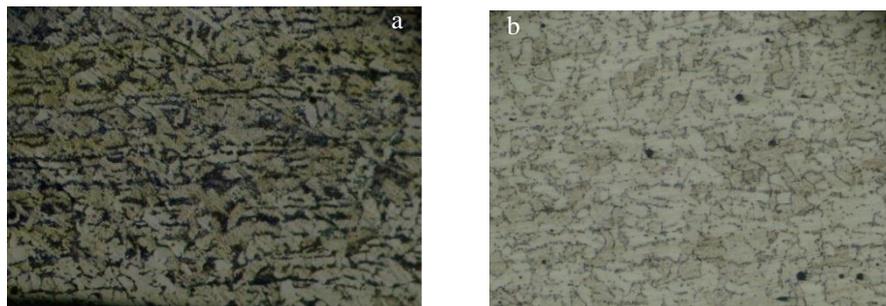
Tabel 2. Hasil pengujian *wall thickness*.

	<i>Crack Area</i> (mm)	Jauh dari <i>crack 1</i> (mm)	Jauh dari <i>crack 2</i> (mm)
1	6.12	6.33	6.33
2	6.09	6.31	6.34
3	6.11	6.35	6.32
Rata-rata	6.11	6.33	6.33

Dapat disimpulkan bahwa pipa *elbow* ini seharusnya masih dalam taraf aman dioperasikan dan umurnya masih pendek. Hal ini dapat terlihat dari standar ketebalan pipa menurut ASME B16.9-2012 [5] adalah 6,35 dengan hasil pengujian rata-rata pada daerah jauh dari retakan sebesar 6,33. Sedangkan jika dilihat dari tabel 2 pada spesimen daerah patahan memiliki nilai rata-rata ketebalan pipa yang menurun yaitu 6,11, hal ini disebabkan karena terjadi peluruhan pada dinding pipa *elbow* daerah patahan yang disebabkan oleh pengaruh erosi dari fluida *crude oil* yang kemudian akan memicu terjadinya kegagalan pipa atau *crack*.

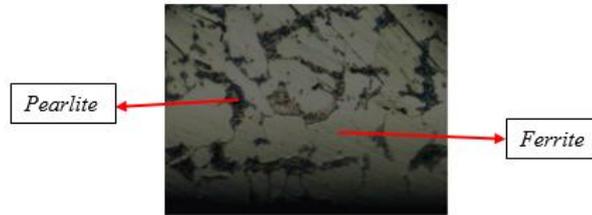
3.4 Pengujian metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari material pipa *elbow* 180 dengan mengambil dua spesimen yaitu pada daerah patahan dan bagian jauh dari patahan dari pipa *elbow* yang mengalami kegagalan. Pengujian mikrografi spesimen pipa *elbow* dilakukan dengan menggunakan Mikroskop Optik di Laboratorium Metalurgi Fisik UNDIP dengan perbesaran 100x dan 200x dengan menggunakan etsa *Nital*.



Gambar 5. Hasil pengujian mikrografi perbesaran 50x a) daerah jauh dari *crack* b) daerah *crack*.

Fenomena lain yang terjadi pada daerah patahan adalah *decarburization* yakni terjadi pelepasan atom-atom karbon ke udara dan berikatan dengan unsur lain, sehingga terjadi pengurangan fasa *pearlite* pada hasil mikrografi pipa *elbow* 180°. Perubahan struktur mikro ini akan mempengaruhi dari sifat mekanis dari pipa *elbow* 180° itu sehingga dapat mengakibatkan kegagalan.



Gambar 6. Fasa yang terdapat pada struktur mikro pipa *elbow* perbesaran 200x.

3.5 Pengujian kekerasan

Pengujian ini dilakukan dengan dua cara yaitu menggunakan metode *Rockwell* skala A dengan indenter yang digunakan 1/16 bola intan kerucut dengan beban mayor 60 kg selama 30 detik untuk mencari kekerasan makro material, dan menggunakan metode *Vickers* dengan indenter yang digunakan berupa intan berbentuk piramida dengan pembebanan sebesar 0,3 N selama 15 detik untuk mendapatkan nilai kekerasan mikro material pipa *elbow* 180°. posisi pengujian kekerasan seperti terlihat pada gambar 7. Kemudian hasil yang didapat dari hasil pengujian akan dikonversikan ke nilai kekerasan *Brinell* seperti terlihat pada Tabel 3 berikut [8].

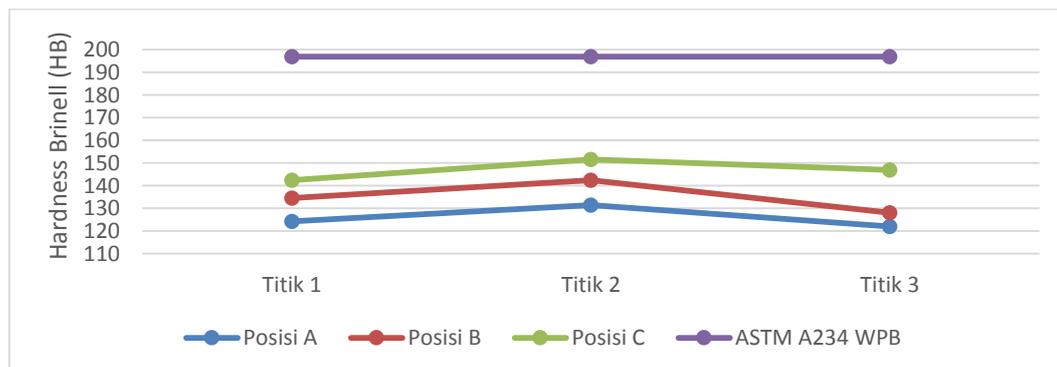


Gambar 7. Pembagian posisi dan titik pengujian kekerasan.

Tabel 3. Hasil pengujian kekerasan HRA dan HV dikonversikan ke HB [8].

	Titik	Posisi			ASTM A234 WPB
		A	B	C	
Hasil Konversi HRA	1	126	135	144	197 HB Maksimum
	2	130	144	153	
	3	122	130	148	
Hasil Konversi HV	1	122,5	134,1	141	
	2	132,8	141	150,1	
	3	121,9	126,2	145,9	
Rata - rata		126	141	146,5	

Berdasarkan data hasil pengujian kekerasan yang dilakukan pada spesimen pipa *elbow* daerah patahan dan spesimen pipa *elbow* jauh dari patahan dapat dilihat bahwa rata-rata angka kekerasan material tertinggi terdapat pada posisi C pada spesimen jauh dari patahan yaitu 146,5 , dan rata-rata angka kekerasan material paling rendah didapat dari spesimen pipa *elbow* daerah patahan pada posisi A yang sangat dekat dari patahan yaitu 126. Disimpulkan hasil dari pengujian baik rata-rata angka kekerasan tertinggi dan paling rendah memiliki nilai kekerasan di bawah nilai maksimum dari standar ASTM A234 tipe WPB yaitu 197 HB.



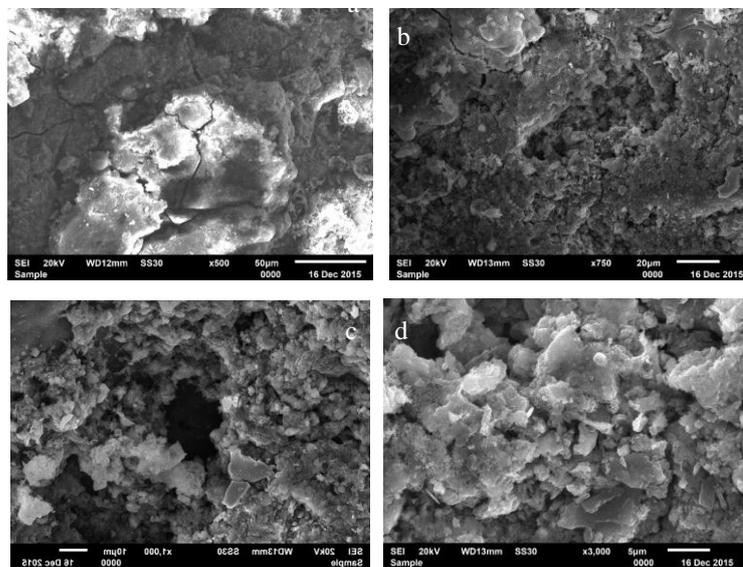
Gambar 8. Grafik hasil pengujian kekerasan.

Berdasarkan data hasil pengujian kekerasan ditinjau dari titik-titik pengujian tiap posisi dari kedua spesimen dapat disimpulkan bahwa selalu didapat angka kekerasan tertinggi berada pada titik 2, dimana titik 2 berada pada bagian tengah. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian mikrografi dimana banyak terdapat fasa *pearlite* pada bagian tengah, fasa *pearlite* cenderung lebih keras dibandingkan fasa *ferrite*.

Dari pengujian pada titik 1 dan 3 terdapat angka kekerasan yang lebih rendah dibanding pada bagian tengah, hal ini disebabkan oleh *decarburizing* material yang menyebabkan lepasnya atom karbon di permukaan material pipa untuk berikatan dengan senyawa lain di udara sehingga menyebabkan pada titik 1 dan 3 fasa *pearlite* yang menghilang dan fasa *ferrite* yang mendominasi. Karena fasa *pearlite* menghilang mengakibatkan lebih lunaknya kekerasan pada titik 1 dan 3 dibandingkan dengan pada titik 2.

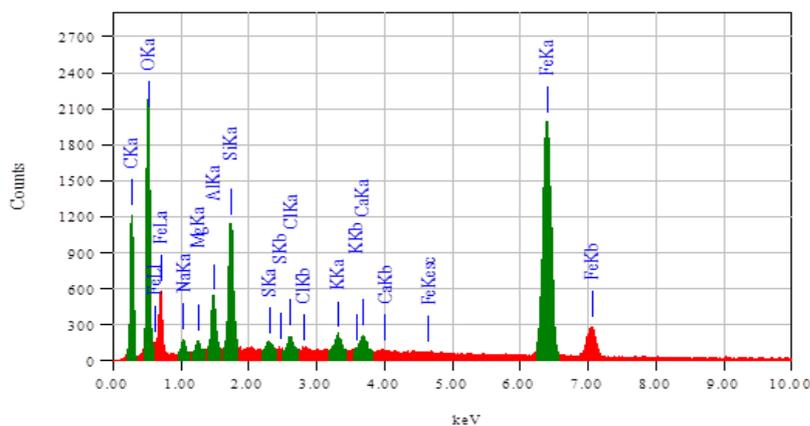
3.6 Pengujian SEM - EDS

Pengujian SEM – EDS dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro Semarang menggunakan mesin *Scanning Electron Microscope* dan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* di laboratorium SEM dan XRD. Pelaksanaan pengujian ini untuk mengetahui adanya korosi pada patahan dari material pipa *elbow* 180° dan mengetahui bentuk patahan yang terjadi secara mikroskopis. Pengujian dilakukan dengan mengambil foto mikro dengan perbesaran 500x, 750x, 1000x, dan 3000x, kemudian pada perbesaran 3000x dilakukan uji EDS untuk mendapatkan unsur-unsur yang terkandung di pada daerah patahan.



Gambar 9. Hasil uji SEM permukaan patahan perbesaran (a) 500x (b) 750x (c) 1000x (d) 1500x.

Dari hasil pengujian tidak tampak adanya *striation* ataupun *beachmarks* yang merupakan ciri-ciri umum dari patah lelah (*fatigue*), hal ini kemungkinan disebabkan karena pengujian yang tidak langsung dilakukan setelah kegagalan terjadi dan pengaruh korosi lingkungan dapat menghilangkan bukti-bukti dari *striation* atau *beachmarks*. Walau demikian, terlihat bentuk patahan pada spesimen pengujian SEM-EDS sesuai dengan bentuk hasil mikroskop electron untuk patah lelah (*fatigue fracture*). Ditambah dari hasil pengujian SEM-EDS ini terlihat hasil yang didapatkan bahwa patahan ini adalah patah intergranular atau patahan terjadi melewati batas-batas butir.



Gambar 10. Grafik hasil uji EDS.

Tabel 4. Hasil pengujian EDS.

Element	Fe	C	Si	Al	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO
Mass (%)	26,03	34,19	3,00	1,39	1,16	3,19	7,83	40,49
Atom (%)	8,32	50,81	1,91	0,92	-	-	-	-

Dari hasil pengujian produk korosi pada bagian patahan pipa *elbow* 180° dengan menggunakan alat *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS) dari Tabel 5 dan grafik Gambar 10 didapatkan hasil bahwa pada patahan material pipa *elbow* 180° terbukti adanya korosi pada patahan dengan terdapatnya adanya produk-produk korosi. Produk korosi yang terdapat dari hasil uji EDS ini adalah unsur Oksigen (O) paling banyak terdapat pada permukaan patahan yaitu 32,67 (%Massa) pada pengujian unsur murni. Sedangkan pada pengujian senyawa didapatkan besi oksida (FeO) paling banyak terdapat pada permukaan patahan yakni 40,49 (%Massa). Sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat korosi pada patahan material dengan produk penyebab korosi yang mengakibatkan kegagalan pada pipa *elbow* 180° adalah Oksigen (O) dan Oksigen yang berikatan dengan besi (Fe) membentuk senyawa besi oksida (FeO).

4. Kesimpulan

Berdasarkan data dan analisa pengujian pada pipa *elbow* maka dapat diambil kesimpulan bahwa penyebab kegagalan pipa *elbow* dikarenakan fenomena *decarburization* yang terjadi pada permukaan material. Dan mekanisme awal terjadinya kegagalan disebabkan inisiasi retakan yang dipercepat lajunya oleh pengaruh erosi fluida *crude oil* hingga menjadi patah. Inisiasi retakan disebabkan adanya *thermal fatigue* yang disebabkan beban panas yang bersifat fluktuatif diterima material menyebabkan terjadi patah lelah. Terakhir adanya korosi yang terjadi pada permukaan patahan berupa produk oksida (besi oksida).

5. Daftar Pustaka

- [1] Data mengenai pipa. [https://en.wikipedia.org/wiki/Pipe_\(fluid_conveyance\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pipe_(fluid_conveyance)) (diakses 18 Januari 2016)
- [2] Data mengenai analisis kegagalan. Vander Voort, George F, 1997, *Use of Failure Analysis in Material Selection*, Buehler Ltd.
- [3] ASTM A234, 1997, *Standard Specification for Piping Fittings of Wrought Carbon Steel and Alloy Steel for Moderate and High Temperature Service*, USA.
- [4] May 2001, *Fired Heaters for General Refinery Service*, API Standard 560 Third Edition. American Petroleum Institute.
- [5] ASME B16.9-2012, 2013, *Factory-Made Wrought Butt Welding Fittings*, ASM International, ASTM International, USA.
- [6] Bagnoli, D.L et al., 1987, *Fractography Vol 12*, ASM International, USA.
- [7] Fauzie, M.M., Rusnaldy, 2013, *Analisa Kegagalan terhadap Tube Crude Oil Heater (Furnace)*, Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia.
- [8] ASTM E140, 1987, *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*, ASTM International, USA.