

Analisis Kegagalan *Boiler Tube* PT. Pertamina Kilang Internasional

*Muhammad Fahmi Ilham Septiananda¹, Susilo Adi Widyanto², Sulardjaka²

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: fahmi.ilham12@gmail.com

Abstrak

Boiler adalah salah satu komponen penting dalam dunia industri yang berfungsi sebagai penghasil uap, yang nantinya uap tersebut dapat dikonversikan menjadi energi listrik untuk keperluan industri tersebut. Biasanya *boiler* digunakan pada industri pembangkit dan kilang minyak. Atas dasar pentingnya komponen ini maka diperlukan kondisi *boiler* yang optimal dan perawatan yang bagus untuk menghindari kerusakan dan kerugian pada saat pengoperasian. Pada penelitian ini terdapat *boiler* yang mengalami kegagalan berupa munculnya retak yang diakibatkan kelalahan material dan korosi yang terjadi di area *tubenya*, Sehingga penelitian ini bertujuan untuk mencari tau mekanisme kegagalan yang terjadi pada *boiler tube* dengan beberapa metode diantaranya pengujian makrografi, mikrografi, komposisi kimia, *Boiler* yang diteliti adalah jenis material ASTM A178 dan ASTM A192. Hasil pengamatan visual didapati bahwa material mengalami kegagalan disebabkan adanya retak yang menjalar baik itu dari permukaan luar ataupun pada beberapa material dari permukaan dalam. Retak ini terjadi dikarenakan korosi yang awalnya berbentuk sumur dengan ukuran kecil ditambah beban kerja yang diterima oleh *boiler* merubah sisi lain menjadi retak yang menembus sisi lain dari material. Dari pengujian komposisi kimia terdapat beberapa komposisi yang diindikasikan sebagai senyawa korosif. Sedangkan pada pengujian kekerasan terdapat beberapa titik disepanjang material yang mengalami kenaikan kekerasan akibat pengaruh pengelasan. Dari pengujian metalografi menunjukkan bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa ferit dan perlit.

Kata Kunci : analisis kegagalan; *boiler*

Abstract

Boiler is one of the important components in the industrial world which functions as a steam generator, which steam can later be converted into electrical energy for the industrial needs. Usually boilers are used in the power industry and oil refineries. On the basis of the importance of this component, optimal boiler conditions and good maintenance are needed to avoid damage and losses during operation. In this study there were boilers that failed in the form of the appearance of cracks caused by material fatigue and corrosion that occurred in the tube area. So this study aims to examine the failure mechanism that occurs in the boiler tube with several methods including macrographic, micrographic, chemical composition testing, the boiler being studied is a type of material ASTM A178 and ASTM A192. The results of visual observations found that the material failed due to cracks that spread either from the outer surface or in some materials from the inner surface. This crack occurs due to corrosion which was originally in the form of a well with a small size plus the workload received by the boiler turning the well into a crack that penetrates the other side of the material. From the chemical composition test, there are several compositions which are indicated as corrosive compounds. While in the hardness test there are several points along the material that experience an increase in hardness due to the influence of welding. The metallographic test showed that the phases formed were ferrite and pearlite.

Keywords : *boiler*; failure analysis

1. Pendahuluan

Tabung *boiler* merupakan salah satu komponen penting dalam setiap pabrik atau kilang karena memiliki fungsi yang sangat diperlukan [1]. Tabung *boiler* berfungsi untuk menghasilkan uap. Dalam operasinya struktur *boiler* mengalami siklus beban *thermal* maupun beban mekanis yang sifatnya dinamik. Kondisi operasi tersebut berdampak pada besarnya potensi kegagalan yang mungkin terjadi. Oleh karena itu aspek kehandalan operasi berbasis maintenance harus dikelola dengan baik. Banyak kasus kegagalan dalam sistem *boiler tube* dikarenakan *overheating* yang terjadi dalam

jangka waktu pendek maupun panjang, korosi, erosi, dan kerapuhan hidrogen [2].

Melakukan investigasi penyebab dari kegagalan pada *boiler tube* sangat penting untuk dilakukan untuk mengetahui penyebab kegagalannya dalam melakukan tindakan preventif supaya tidak terjadi kegagalan yang serupa dan untuk menjaga performa dari *boiler* tersebut[3]. Keamanan dari setiap bagian yang ada pada *boiler* sangat penting, karna jika terjadi kegagalan bisa berdampak ke berbagai area, yang mana kegagalan ini bisa mempengaruhi kehandalan pada komponen – komponen pada *boiler* maupun peralatan lain di sekitarnya [4]. Dalam keberjalanan perindustrian di PT Kilang Pertamina Internasional seringkali terjadi kegagalan pada bagian *boiler tube*. Kegagalan ini dapat menyebabkan terganggunya kehandalan pada zona disekeliling *boiler*. Oleh karena itu pada penelitian kali ini penulis melakukan analisis kegagalan terhadap *boiler tube* PT. Pertamina Kilang Internasional yang mengalami kebocoran guna mencegah terjadinya kegagalan serupa dimasa yang akan datang untuk menjaga performa dari *boiler tube* Pertamina Kilang Internasional.

2. Dasar Teori dan Metode Penelitian

2.1 Boiler Tube

Boiler memiliki fungsi sebagai alat penghasil uap panas. Di dalam *boiler* sendiri terdapat dua bagian, yang pertama dapur pemanas yang mana pemanas ini didapat dari hasil pembakaran bahan bakar. Sedangkan bagian kedua adalah *boiler proper* yaitu bagian yang mengubah air menjadi uap panas. Uap panas inilah yang akan didistribusikan ke berbagai sektor industri[5]. Industri *oil* dan gas dapat memasok berbagai produk bahan bakar jadi ke berbagai sektor seperti otomotif, dirgantara, tribologi dan kelistrikan rumah tangga. Ini mencakup berbagai aplikasi seperti memasok bahan bakar untuk pembakaran internal, penerbangan, pelumasan, memasak rumah tangga dan pembangkit listrik. minyak mentah yang dipasok ini mengandung berbagai senyawa korosif dan melewati pipa yang menjadi sebuah tantangan bagi kilang minyak sektor hulu. Kandungan senyawa yang bersifat korosif inilah yang menjadi salah satu penyebab kegagalan pada sistem pipa dan *boiler* pada industri *oil* dan gas[6]. Selain itu penyebab kegagalan yang sering terjadi pada *boiler tube* adalah bagian suhu pada *boiler* yang lebih tinggi daripada suhu standar operasi yang seharusnya. Kenaikan suhu ini mungkin terjadi karena kemunculan kerak pada permukaan dalam atau luaryang terjadi dalam jangka waktu yang lama pada paparan suhu yang tinggi [7].

2.2 Material Boiler

Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah ASTM A178 dan ASTM A192 yang merupakan material *boiler* yang dipakai di PT. Pertamina Kilang Internasional. Pada Tabel berikut merupakan spesifikasi mekanis dan kimia dari material ASTM A178 dan A192

Tabel 1. Spesifikasi Mekanis Material *Boiler*.

No.	Properties	Nilai	Unit
1.	Tensile Strength	325	MPa
2.	Yield Strength	180	MPa
3.	Maximum Hardenss	137	HRV
4.	Elongasi	Min 35	%

Tabel 2. Sepsifikasi Unsur Kimia Material *Boiler*

No.	Unsur	Nilai
1.	Carbon	0,06%-0,18%
2.	Manganese	0.27% - 0.63%
3.	Fosfor	0.035%
4.	Sulfur	0.035%

2.3 Pengujian Spesimen

Dalam proses untuk menganalisis kegagalan pada spesimen *boiler tube* terdapat beberapa pengujian yang dilakukan. Adapun jenis – jenis pengujiannya adalah :

a. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi adalah pengujian untuk mengetahui kondisi mikroskopik dari sebuah material. Pengujian metalografi sendiri terbagi menjadi dua yaitu pengujian mikrografi dan pengujian makrografi Yang membedakan pengujian makro dan mikro ini adalah perbesaran lensa pada mikroskop. Pengujian makro adalah pengujian yang dilakukan menggunakan bantuan lensa mikroskop dengan perbesaran lensa maksimal sebanyak 15 kali. hasil pengamatan dari makrografi disebut makrostruktur. Tujuan dari pengujian makrografi ini sendiri adalah untuk mengamati butir kristal pada logam dan mengamati retakan pada logam [8]. Pengujian mikro adalah pengujian yang dilakukan menggunakan lensa mikroskop dengan perbesaran lensa yang dimulai dari 20 kali sampai 2000 kali. Hasil dari pengamatan ini disebut mikrostruktur. Tujuan dari pengujian mikro adalah untuk mengamati kandungan unsur kimia yang terdapat dalam logam, menentukan ukuran beserta bentuk butir kristal. Selain itu pengujian ini juga bisa dilakukan untuk mendeteksi kegagalan mikro pada logam [8].

b. Pengujian Sifat Mekanis Material

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sifat – sifat mekanis dari material yang mengalami kegagalan. Pengujian yang dilakukan seperti uji kekerasan dan uji tarik pada material. Dari kedua pengujian ini nantinya akan memberikan

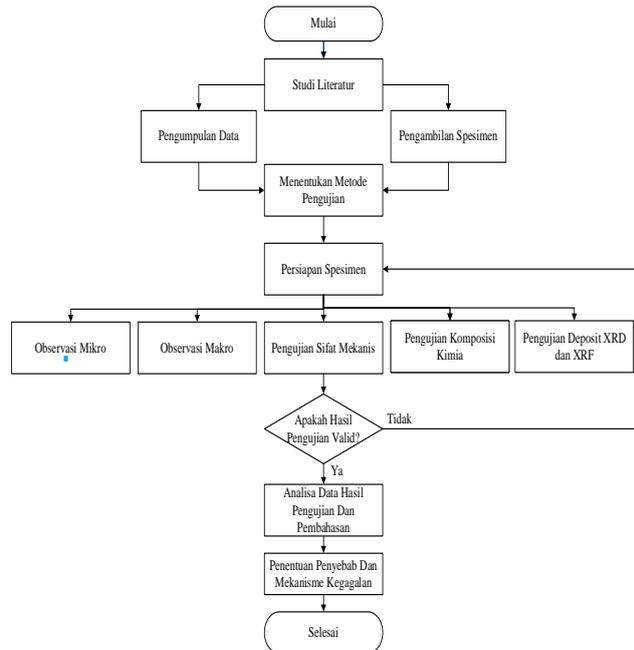
informasi terkait sifat dan kondisi operasional dari spesimen. Biasanya dalam mengetahui sifat mekanis material, terdapat beberapa percobaan yang dapat dilakukan, seperti uji kekerasan, uji tarik, dan uji impak.

c. Pengujian Komposisi Kimia[9].

Pengujian komposisi kimia bertujuan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur pada material. Pengujian ini bisa dilakukan dengan metode spektrometri, *XRD* dan *XRF*. Pada pengujian *XRD* dan *XRF* memanfaatkan difraksi dan emisi pada sinar-x. Prinsipnya adalah sinar-x akan dipancarkan ke arah material sehingga akan membuat interaksi dengan atom pada material. Sehingga dapat diketahui struktur kristal dan komposisi kimia pada material[10].

2.4 Diagram Alir

Pada penelitian ini terdapat langkah-langkah penelitian mengacu pada diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.

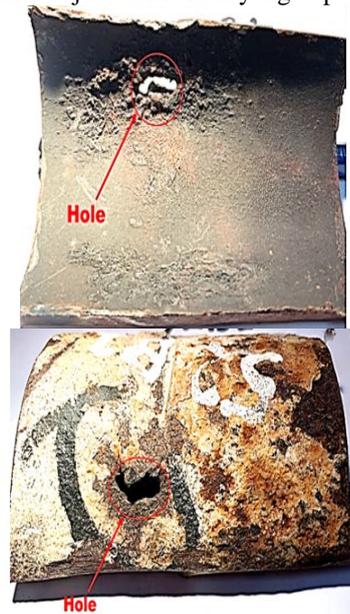


Gambar 1. Diagram Alir

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengamatan Visual

Untuk Pada material dengan kode 52B1 terjadi kebocoran yang dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Pengamatan visual spesimen.

3.2 Hasil Pengujian Makrografi

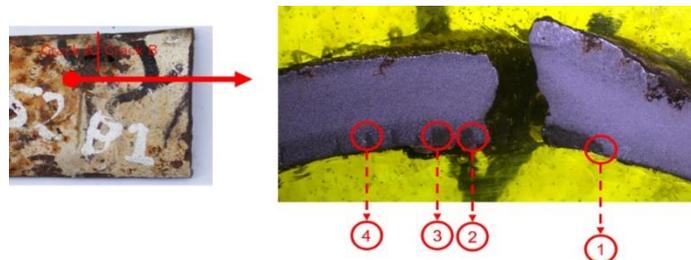
Pada uraian dibawah ini akan dijelaskan mengenai hasil pengujian makrografi yang dilakukan pada spesimen 52B1. Pengamatan yang dilakukan adalah pengamatan menggunakan alat bantu mikroskop dengan 7x perbesaran. Hasil pengamatannya dapat dilihat pada Gambar 3 observasi makro pada permukaan luar spesimen 52B1.



Gambar 3. Pengamatan makrografi spesimen.

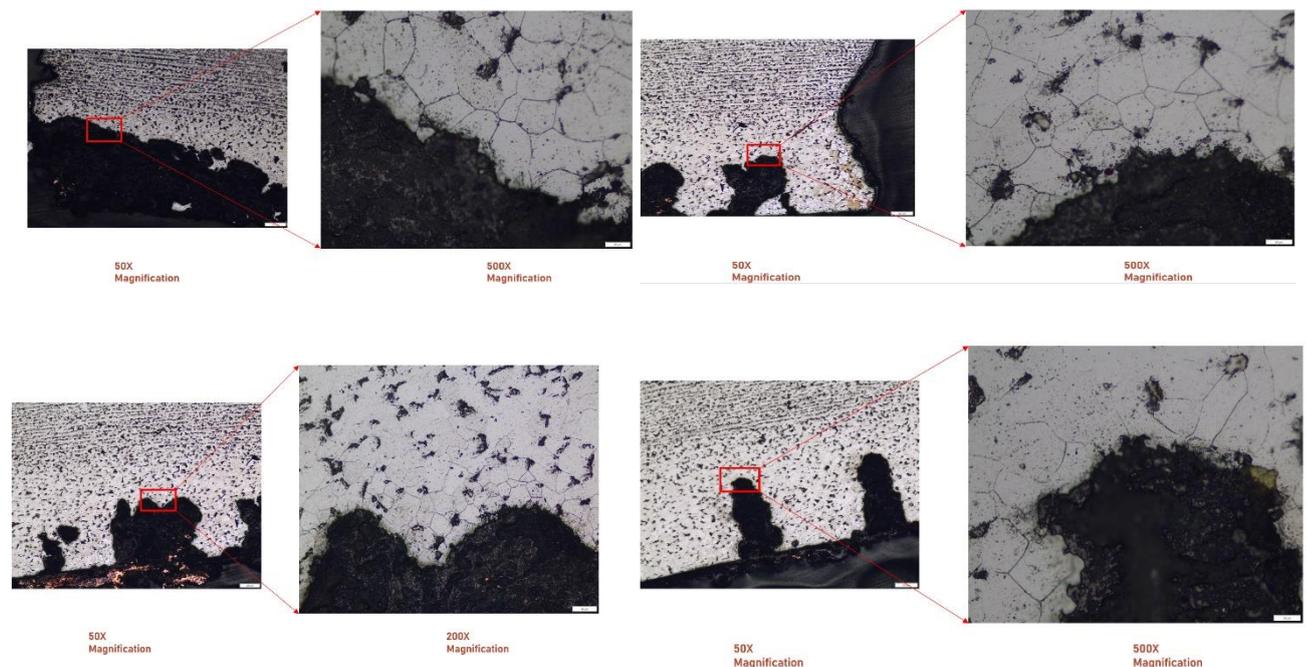
3.3 Hasil Pengujian Mikro

Untuk menyelidiki lebih lanjut mengenai penyebab kegagalannya, perlu diamati kondisi mikroskopik dari lokasi tersebut. Untuk itu pada Gambar 4 berikut dapat dilihat hasil pengamatan secara mikrografi lokasi terjadinya kecacatan..



Gambar 4. Retakan yang terjadi pada spesimen.

Dari hasil pengamatan diatas dapat diamati terjadinya retakan yang menembus hingga permukaan luar dan terdapatnya beberapa lokasi *pitting* pada permukaan dalam spesimen. Terdapat 4 lokasi *pitting* yang perlu diamati struktur mikronya untuk menyelidiki penyebab terbentuknya *pitting*. Pada Gambar 5 berikut adalah struktur mikro spesimen menggunakan alat bantu mikroskop dengan perbesaran hingga 500x perbesaran.

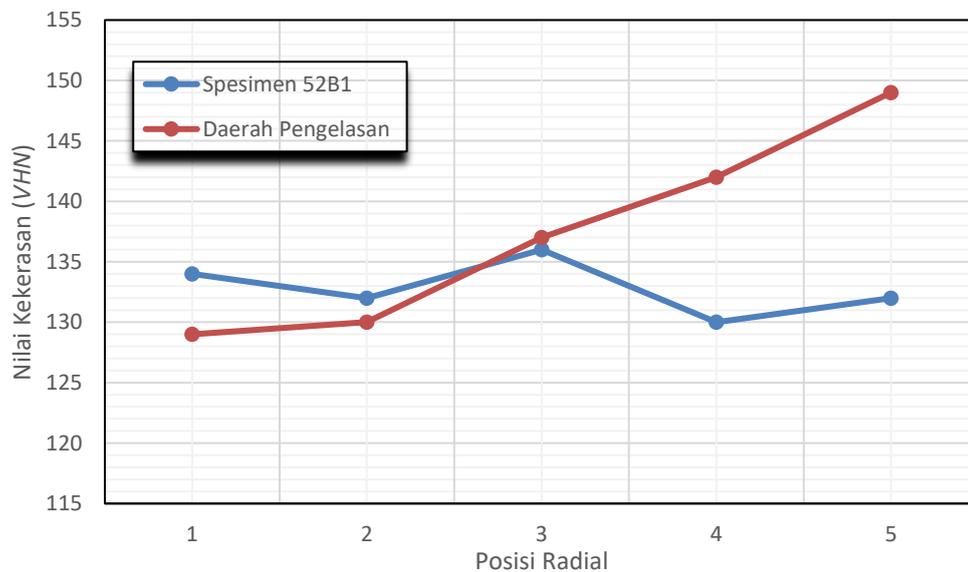
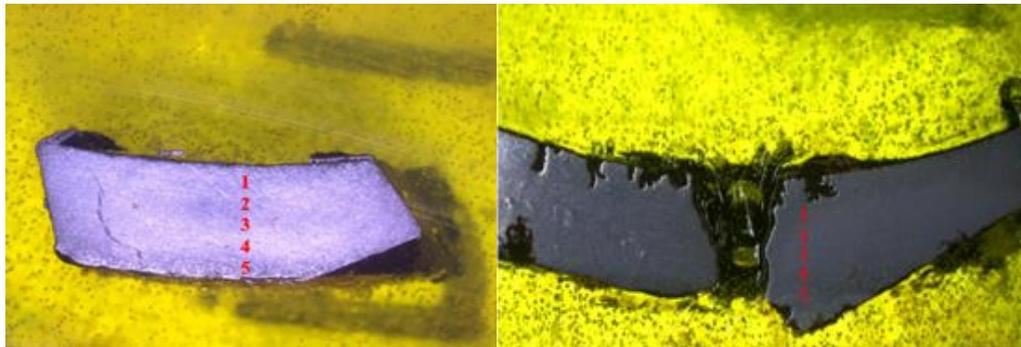


Gambar 5. Hasil pengamatan lokasi terbentuknya lubang.

Dari hasil pengamatan kondisi butir diatas bahwa terdapat perbedaan kondisi butirnya. Pada salah satu lokasi kondisi butirnya lebih halus dibanding yang lain, hal ini dikarenakan lokasi tersebut merupakan lokasi terdekat dengan daerah pengelasan yang menyebabkan terjadinya perubahan terhadap kondisi mikronya.

3.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode *Vickers* yang dilakukan di dua lokasi berbeda untuk dijadikan bahan perbandingan yang pertama di daerah pengelasan untuk mengetahui apakah terjadi perubahan kekerasan akibat pengelasan dan permukaan material. Pada Gambar 6 berikut merupakan grafik hasil pengujian kekerasannya.



Gambar 6. Grafik hasil pengujian kekerasan pada permukaan dan lokasi pengelasan spesimen.

Berdasarkan grafik tersebut didapati bahwa nilai kekerasan spesimen berada di rentang nilai 132 *VHN* – 136 *VHN*. Yang mana nilai kekerasan ini jika dibandingkan dengan nilai normal dari *raw material* spesimen yaitu sekitar 137 *VHN* masih dikatakan normal, dalam artian tidak ada perubahan kekerasan yang signifikan akibat pengoperasian dari material tersebut. Sedangkan pada grafik berwarna merah terdapat kenaikan nilai kekerasan yaitu dalam rentang nilai 130 *VHN* – 149 *VHN*. Hal ini disebabkan karena daerah tersebut merupakan daerah hasil pengelasan.

3.5 Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pada Tabel 2 berikut adalah hasil pengujian komposisi kimia spesimen 52B1.

Tabel 2. Hasil pengujian komposisi kimia spesimen

Unsur	Sampel Uji	
	Komposisi	Standar Deviasi
C	0,148	0,0044
Si	<0,0100	0,00000
Mn	0,307	0,0077
P	0,052	0,0011
S	0,021	0,0004
Cr	0,022	0,0006
Mo	<0,0100	0,0009
Ni	0,032	0,0010
Cu	0,019	0,0003
Al	<0,0050	0,00000
Co	<0,0050	0,00000
Mg	<0,0050	0,00004
Nb	0,013	0,0004
Ti	<0,0030	0,00007
V	<0,0050	0,0003
W	<0,100	0,0010
Fe	99,35	0,0039

Berdasarkan hasil pengujian diatas perlu dilakukan perbandingan komposisi kimia spesimen uji dengan kondisi *raw* materialnya. Pada Tabel 3 berikut adalah hasil perbandingannya.

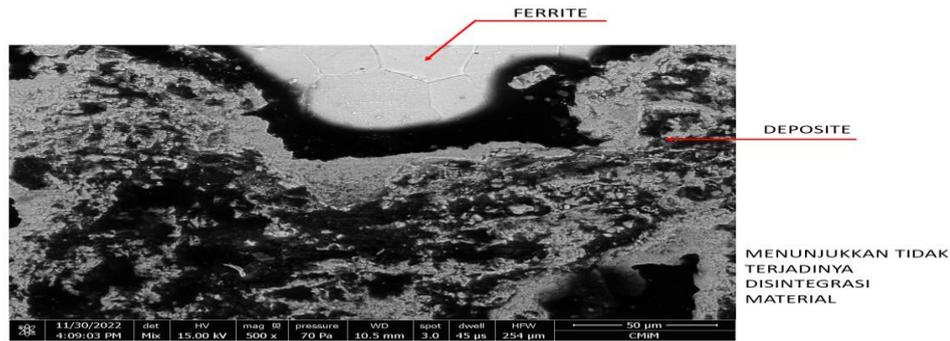
Tabel 3. Perbandingan komposisi spesimen.

Unsur	Komposisi <i>Raw</i> Material (%)	Komposisi Spesimen (%)	Keterangan
C	0,06-0,18	0,148	Memenuhi
Mn	0,27-0,63	0,307	Memenuhi
P	Maksimum 0,035	0,052	Tinggi
S	Maksimum 0,035	0,021	Memenuhi

Berdasarkan tabel diatas didapati bahwa terdapat kandungan unsur P yang lebih tinggi daripada kondisi standarnya. Kandungan unsur fosfor (P) berpengaruh kepada keuletan dari logam. Tetapi jika kandungan fosfor yang berlebih juga akan berakibat buruk kepada keuletan logam tersebut yang mengakibatkan turunnya ketangguhan impaknya. Walaupun memiliki kandungan fosfor yang lebih tinggi tapi masih didalam batas wajar sehingga tidak termasuk salah satu indikasi penyebab kegagalan pada material.

3.6 Hasil Pengujian SEM

Hasil observasi SEM pada Gambar 7 menunjukkan bahwa tube tidak terjadi degradasi material. Struktur mikro terdiri dari fase Ferrite dan pearlite. Tidak terjadi diintegrasikan pearlite yang ditunjukkan dengan adanya grafit pada batas butirnya.



Gambar 7. Hasil pengujian SEM spesimen 52B1.

3.7 Hasil Pengujian XRF

Hasil pengujian XRF komposisi deposit sampel 1 ditunjukkan dalam Gambar 8 berikut.

SQX Calculation Result						
Sample : Deposit pipa 1			Date analyzed : 2022- 9-15 10:08			
Application : Powder			Sample type : Oxide Powder			
Balance : Estimate						
Matching library :						
Density : 321.2242 mg/cm2			Sample film corr. : P.P.Film		Impurity corr. :	
Helium corr. : Yes			File : Deposit pipa 1		Diameter : 30.0 mm	
Weight : 2.2706 g			Height : 2.0 mm			
No.	Component	Result	Unit	El. line	Intensity	Analyzing depth
1	Total	321	mg/cm2			
2	MgO	3.13	mass%	Mg-KA	0.2740	0.0051
3	Al2O3	0.429	mass%	Al-KA	0.2340	0.0073
4	SiO2	0.935	mass%	Si-KA	0.4244	0.0080
5	P2O5	11.4	mass%	P -KA	6.9845	0.0102
6	SO3	0.0739	mass%	S -KA	0.0784	0.0127
7	K2O	0.155	mass%	K -KA	0.3163	0.0361
8	CaO	4.42	mass%	Ca-KA	12.3877	0.0472
9	TiO2	0.0758	mass%	Ti-KA	0.0480	0.0692
10	Cr2O3	0.125	mass%	Cr-KA	0.2232	0.1090
11	MnO	0.632	mass%	Mn-KA	1.4735	0.1357
12	Fe2O3	52.5	mass%	Fe-KA	158.6806	0.1695
13	NiO	0.375	mass%	Ni-KA	0.9857	0.0904
14	CuO	2.75	mass%	Cu-KA	9.0410	0.1094
15	ZnO	0.557	mass%	Zn-KA	2.4362	0.1312
16	SrO	0.0525	mass%	Sr-KA	0.6973	0.4630
17	ZrO2	0.0137	mass%	Zr-KA	0.3145	0.6082
18	Balance	22.3	mass%	Pd-KAC	1.9376	

Gambar 8. Hasil pengujian XRF deposit spesimen.

Dari hasil uji yang diperoleh ditunjukkan bahwa deposit mengandung produk korosi dalam jumlah yang dominan (75,4 mass%) dan kandungan yang tidak diketahui relatif kecil yaitu 6,7 mass%. Hasil tersebut bisa diterima dan mengkonfirmasi bahwa telah terjadi korosi pada sisi permukaan dalam keempat spesimen yang diuji.

3.8 Pembahasan

Berdasarkan Pengujian yang sudah dilakukan pada spesimen 52B1 didapatkan bahwa penyebab kegagalan spesimen tersebut adalah :

- Korosi yang merata terjadi hampir di seluruh permukaan spesimen
- Pada daerah pengelasan terdapat kecacatan pada material berupa sebuah lubang yang salah satu penyebabnya adalah korosi.
- Korosi yang terjadi dapat menyebabkan retakan yang biasa disebut retak korosi atau *pitting corrosion*. *Pitting* yang semula kecil dapat membesar dan dapat menginisiasi terbentuknya lubang.
- Lubang sisi dalam yang memiliki ukuran lebih besar daripada sisi luar mengindikasikan bahwa retak korosi berawal dari sisi dalam.

4. Kesimpulan

Setelah dilakukan beberapa pengujian untuk menganalisis penyebab kegagalan spesimen, didapati bahwa penyebab kegagalan tersebut dapat disimpulkan bahwa:

- a. Terbentuknya lubang pada spesimen bukan hanya disebabkan karena adanya degradasi (penurunan kualitas) material. Tapi banyak penyebab terbentuknya kecacatan tersebut seperti adanya kesalahan dalam proses pengelasan dan proses *corrosion* yang terjadi secara terus menerus. Hal ini dapat dilihat dari kondisi mikrografi spesimen yang membuktikan terjadinya kecacatan didaerah pengelasan dan tingkat korosi yang terjadi menguatkan faktor kegagalan yang disebabkan *corrosion failure*.
- b. kegagalan terjadi akibat diawali cacat pengelasan yang kemudian membentuk celah korosi, tingkat korosi yang tinggi sehingga membentuk daerah *pitting corrosion* yang kemudian merambat hingga menembus sisi lainnya, dan *corrosion fatigue* yang disebabkan tegangan siklik yang terjadi sehingga menembus lapisan oksida yang berperan sebagai pelindung permukaan spesimen. Dan tegangan siklik ini akan merambat sehingga membentuk retakan yang memiliki karakteristik runcing pada ujung rambatannya.
- c. Penyebab kegagalan yang terjadi pada spesimen yaitu *corrosion fatigue*, cacat pengelasan, *pitting corrosion*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dev Choudhury S, Saini N, Lyu Z, Ravikiran K, Tervonen Z, Li L. Effects of hydrostatic preload on strain hardening and strain aging of boiler tubes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2022 Dec 1;200.
- [2] Khedr M, Abd_Elaziem W, Newishy M, Abdel-Aleem H. Metallurgical analysis of ASME SA213 T12 boiler vertical water-wall tubes failure. *Eng Fail Anal*. 2023 Mar 1;145.
- [3] Ibrahim AO, Ighodaro OO, Fasogbon SK, Orumwense EF, Waheed MA. Failure investigation of the tube of a dual fired steam boiler in a western nigerian food and beverage manufacturing plant. *Eng Fail Anal*. 2023 Jan 1;143.
- [4] Kumar S, Tadge P, Mondal A, Hussain N, Ray S, Saha A. Boiler tube failures in thermal power plant: Two case studies. *Mater Today Proc*. 2022 Jan 1;66:3847–52.
- [5] Wilastari S, Studi Teknik P, Bumi Akpelni Semarang JIPawiyatan Luhur PI, Duwur B. FAKTOR-FAKTOR PENYEBAB MENURUNNYA KINERJA BOILER DI PT. PAPERTECH INDONESIA [Internet]. Vol. 24, *Majalah Ilmiah Gema Maritim*, e-issn. 2022. Available from: www.e-journal.akpelni.ac.id,
- [6] Subramanian C, Ghosh D, Reddy DS, Ghosh D, Natarajan R, Velavan SP. Stress corrosion cracking of U tube heat exchanger used for low pressure steam generation in a hydrogen unit of petroleum refinery. *Eng Fail Anal*. 2022 Jul 1;137.
- [7] Roy RK, Das SK, Panda AK, Mitra A. Analysis of superheater boiler tubes failed through non-linear heating. In: *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd; 2014. p. 926–32.
- [8] Tri Y, Wibowo J, Yudi Baskoro S. PANDUAN METALOGRAFI Disusun oleh : Vuko AT Manurung.
- [9] Hill R, Zdunek AB. A Theoretical Study of the Brinell Hardness Test [Internet]. Vol. 423, Source: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1989. Available from: <https://www.jstor.org/stable/2398559>
- [10] Munasir M, Triwikantoro T, Zainuri M, Darminto D. UJI XRD DAN XRF PADA BAHAN MENERAL (BATUAN DAN PASIR) SEBAGAI SUMBER MATERIAL CERDAS (CaCO₃ DAN SiO₂). *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*. 2012 Jun 14;2(1):20.