



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Korosi Pada Pipa *Mine Line Cargo Heater System* Tipe SUS/SS 316 L Pada Kapal MT SUPRIME STAR

Tomi Ahmad Maulana¹⁾, Sarjito Joko Sisworo¹⁾, Ari Wibawa Budi Santosa¹⁾

¹⁾Laboratorium Las Material

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*}e-mail : tomiaahmad910@gmail.com, jito_sar@yahoo.com, arikapal75@gmail.com

Abstrak

Korosi diklasifikasikan menjadi dua yaitu korosi suhu tinggi dan suhu rendah. Korosi suhu tinggi merupakan proses korosi yang terjadi pada logam yang berada dalam kondisi suhu tinggi dimana asam berada di titik embun atau dalam fase gas. Meskipun sebagian besar reaksi korosi suhu tinggi terjadi pada suhu di atas 500 ° C, namun Korosi suhu tinggi juga ditemukan dalam banyak kasus pada suhu di bawah 500 ° C. Pada penelitian ini menggunakan pipa mine line cargo heater sytem yang dioperasikan pada suhu 85 – 95 ° C. pengujian korosi menggunakan analisis SEM, Metalografi, EDX dan XRD. Dari hasil pengamatan SEM dan Metalografi Pipa Mine Line mengalami Pitting Corotion pada permukaan dalam yang disebabkan pecahnya lapisan pasir oleh ion klorin yang agresif, serta mengalami intergranular corrosion yang disebabkan kecacatan pada proses manufacture. Berdasarkan hasil pengamatan unsur menggunakan EDX dan XRD ditemukan lapisan oksida yang cukup tebal pada permukaan dalam pipa yang berupa unsur Fe₂O₃, NiO₃Ti, MgTiO₃, V₂O₃ yang memiliki nilai FoM masing-masing diatas 0,6 yang berarti keberadaanya cukup dominan. disebabkan terjadinya reaksi kimia antara unsur-unsur penyusun pipa teroksidasi oleh udara didalam pipa. Dari hasil pengamatan disimpulkan bahwa pipa mineline mengalami beberapa ciri korosi suhu tinggi namun masih ditemukan ciri korosi suhu rendah.

Kata Kunci : Korosi Suhu Tinggi, SEM, Metalografi, EDX, dan XRD

1. PENDAHULUAN

Proses pengiriman minyak dunia sebagai besar menggunakan moda transportasi kapal tangker yang dilengkapi *Cargo Tank Heater system* yang bertujuan untuk menjaga viscositas berada pada tingkat yang efektif untuk melakukan proses bongkar muat.[1]*Cargo Tank Heater system* menggunakan fluida untuk mengalirkan panas dari boiler menuju ruang kargo. Fluida yang biasa digunakan berupa minyak atau air. Ide ini pertamakali diperkenalkan oleh Grove pada tahun 1964.[2]

Adanya fluida yang mengalir dalam pipa menyebabkan terjadinya kerusakan material yang biasanya berupa korosi. Korosi adalah proses penurunan kualitas suatu benda logam kembali ke bentuk aslinya. Korosi diklasifikasikan dengan cara yang berbeda-beda. Salah satunya membagi korosi dalam suhu tinggi dan suhu rendah. Korosi suhu tinggi merupakan proses korosi yang terjadi pada logam yang berada dalam kondisi suhu tinggi dimana asam berada di titik embun atau dalam fase

gas. Meskipun sebagian besar reaksi korosi suhu tinggi terjadi pada suhu di atas 200 ° C, namun Korosi suhu tinggi juga ditemukan dalam banyak kasus pada suhu di bawah 200 ° C. Pada korosi temperatur tinggi reaksi yang terjadi adalah reaksi kimia langsung, korosi pada temperatur rendah reaksi yang terjadi adalah reaksi elektrokimia.[3]

Dalam penelitian Ardhi Sudradjat pada tahun 2014 yang dilakukan di Teknis Mesin Universitas Diponegoro dengan judul “ Analisis Korosi dan Kerak Pipa Nickel Alloy N06025 Pada Waste Heat Boiler “ dalam penelitian tersebut beliau menggunakan tiga jenis uji yaitu Uji SEM, uji EDX dan uji XRD. Hasil penelitian yang beliau lakukan dapat disimpulkan terjadi Penebalan dan Penipisan pada beberapa bagian pipa yang disebabkan temperature tinggi.[4]

Dalam penelitian M. Ananda Rao pada tahun 2018 yang dilakukan di CSRI, Nasional Metalurgy Laboratory Madras Center, India dengan judul “ Stress Corrosion Cracking Failure Of a SS 316L

High Pressure Heater “ dalam penelitian tersebut beliau melakukan pengamatan pada korosi retakan dengan SEM. Hasil penelitiannya, dapat disimpulkan bahwa material steal pipe satinle 316 L mengalami kegagalan akibat retak korosi pada tabung bertekanan tinggi.[5]

Dalam penelitian H. Zhang pada tahun 1999 yang dilakukan di Departement of Mechanical Engineering, Najing University of Chemical Technology dengan judul “ Corrosion Failures Of High Temperatur Heat Pipe “ dalam penelitian tersebut beliau menggunakan dua spesimen yaitu baja feritik paduan rendah dan baja stainless steal dengan logam alkali. Hasil penelitian yang dilakukan menunjukan penggunaan baja feritik paduan rendah lebih mampu memberi masa pakai yang lebih lama dibanding stainless steal dengan logam alkali.[2]

Pada penelitian ini menganalisis korosi pada pipa *Mine Line Cargo Heater System* tipe SS/SUS 316 L pada kapal MT SUPRIME STAR yang mengalirkan fluida berupa uap air dengan suhu 85 – 95 °C dengan tekanan kerja 0,7 MPa. Penelitian yang sudah ada menggunakan sempel yang mengalirkan fluida di atas 200°C.

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui jenis korosi yang terjadi pada pipa *Mine Line Cargo Heater System* tipe SS/SUS 316 pada kapal MT SUPRIME STAR
- Mengetahui perbedaan korosi pada suhu 85 – 95°C dengan korosi pada suhu di atas 200°C
- Mengetahui ketahanan material SS/SUS untuk digunakan pada *Mine Line Cargo Heater System*

2. METODE

Data pada penelitian ini diperoleh dari jurnal, buku-buku referensi, modul serta pengujian langsung. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental dengan

menggunakan analisis SEM EDX, analisis XRD dan analisis Metalurgrafi untuk mengetahui kondisi material uji di laboratorium, dengan mengacu pada jurnal penelitian dengan tema yang serupa.

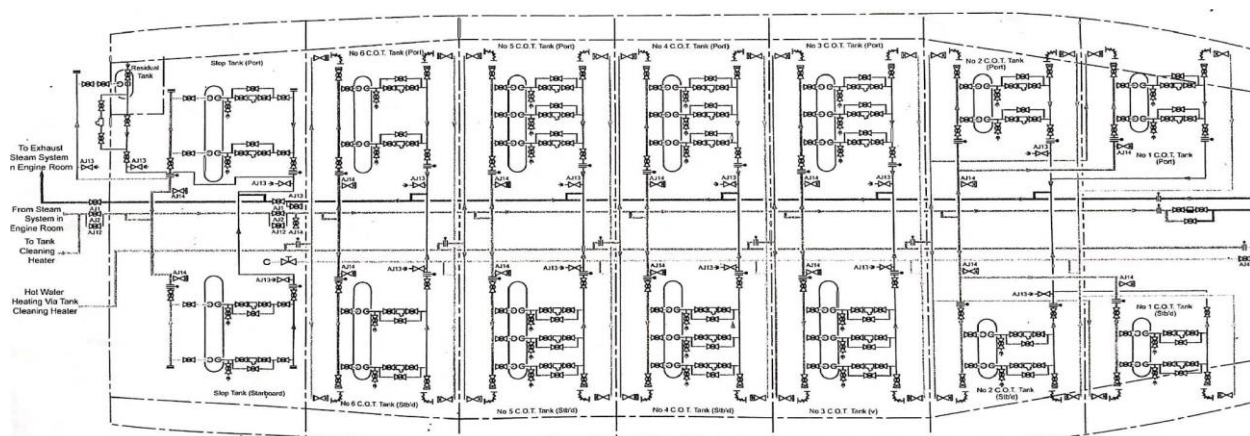
2.1. Objek Penelitian

Objek yang dipakai pada penelitian tugas akhir ini adalah pipa *mine line heater system* yang menggunakan bahan SS/SUS 316 L yang mengalami kebocoran seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Pipa *mine line heater system* kapal mt supreme start

Mine line heater system meruapakan pipa yang digunakan pada *cargo heater system* kapal tangker yang mengalirkan uap bertekanan 0,7 MPa pada suhu 85 – 95 °C yang dialirkan kedalam ruang muat untuk menjaga suhu tetap pada angka ideal seperti gambar 2. Pipa ini di oprasikan pada kapal milik PT. Waruna Nusa Sentana MT SUPRIME START yang telah di *lauching* february 2004 dan mengalami kebocoran pada September 2019.



Gambar 2. Layout *cargo heater* kapal mt supreme start

Sempel kemudian di potong menjadi bagian kecil untuk mempermudah proses penelitian seperti ditunjukkan pada gambar 3.



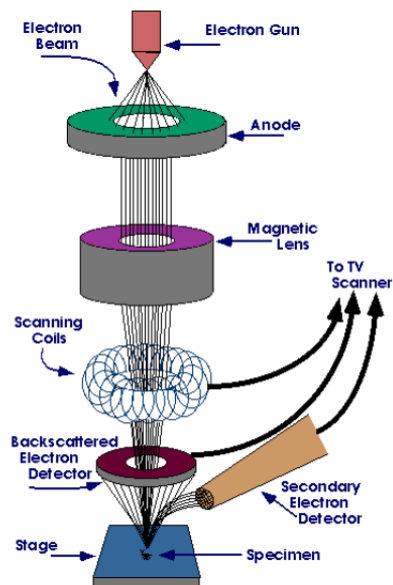
Gambar 3. Spesimen yang telah di potong

2.2. Scanning Electron Microscope (SEM)

Mikroskop electron pemindai merupakan jenis mikroskop yang dirancang untuk mengidentifikasi sampel dengan memanfaatkan electron ber-energi tinggi. Electron berinteraksi dengan atom-atom sempel sehingga menghasilkan gelombang yang memuat informasi topografi permukaan, kandungan, dan karakteristik lain seperti konduktivitas.[4]

Bagian-bagian sem terdiri dari *electron gun* yang berfungsi menghasilkan berkas electron dengan tegangan mulai 2 sampai 30 kV. Berkas electron selanjutnya melewati lensa magnetic untuk menghasilkan gambar berukuran sub- 10 nm dari sempel yang selanjutnya dibaca oleh *scanning electron* dan *elektron detector* kemudian ditampilkan pada layar monitor.[6]

Mekanisme kerja SEM diawali dengan electron gun yang mengeluarkan berkas electron. Berkas electron kemudian dipusatkan oleh lensa pemfokus yang memiliki diameter 0,4 nm sampai 5 nm (Gambar 4). Berkas electron kemudian melalui sepasang kumparan pemindai atau pelat defleksi pada lajur electron. Deflektor ini membengkokkan berkas electron pada sumbu x dan sumbu y kemudian raster memindai area permukaan sampel. Saat berkas electron dipancarkan pada sampel energi pada electron berkurang karena hamburan acak berulang dan penyerapan oleh sampel.

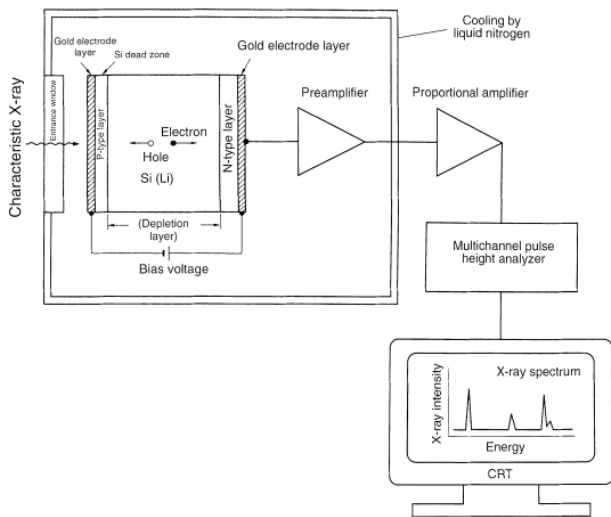


Gambar 4. Sketsa SEM

2.3. Energy Dispersive X-ray (EDX)

EDX adalah teknik analisis unsur atau karakteristik sempel, dimana electron yang diarahkan pada sampel, sehingga electron keluar dari kulit sampel yang menyebabkan ejeksi dan membuat lubang electron pada struktur unsur electron. Prinsip dasarnya adalah bahwa setiap elemen memiliki fitur struktural yang unik, struktur atom, yang merupakan atom dari suatu elemen yang dapat diidentifikasi oleh sinar-X. [7]

Berkas sinar -X yang dipancarkan dari sempel melewati kolimator dan masuk ke detektor. Setelah memasuki detektor sinar x melewati kotak ionisasi keadaan padat dimana energi listrik akan mengubah sinar x menjadi produk yang sesuai dengan sifat sinar x sample. Produk di kumpulkan dengan *Field Effect Transistor* (FET) dan dikonversi ke frekuensi di mana produk dianalisis untuk multi-saluran. Multichannel menganalisis kecocokan frekuensi dan menampilkannya dalam bentuk data di layar.[8]



Gambar 5. Diagram sistem EDX

2.4. Metalografi

Metalografi adalah studi tentang struktur mikro logam dan sifat-sifatnya. Metalografi diperlukan untuk menentukan ukuran butir, distribusi fasa, dan keberadaan inklusi (pengotor) dalam logam. Metalografi dapat dibagi menjadi dua bidang, yaitu Makrografi dan Mikrografi.[9]

Makrografi mengamati struktur logam dan paduan dengan mata telanjang atau dengan lensa hingga perbesaran 15x. Tujuan pengamatan makrografi adalah untuk:

- a. Mengetahui ukuran, bentuk butir Kristal
- b. Mengetahui tentang retakan yang terjadi pada proses manufaktur
- c. Mengetahui tentang serat/alur logam yang mengalami perubahan bentuk
- d. Mengetahui tentang penyusutan, prositas, dan adanya lubang akibat gas yang terperangkap selama proses manufaktur

Mikrografi adalah pengamatan struktur logam dan paduannya menggunakan mikroskop pada perbesaran dari 20x hingga 2000x. Tujuan pengamatan ini adalah:

- a. Mengetahui cacat mikro
- b. Menentukan ukuran dan bentuk butiran Kristal
- c. Menentukan unsur-unsur kimia yang ada di dalam paduan tersebut
- d. Mengetahui kualitas proses perlakuan panas yang terjadi

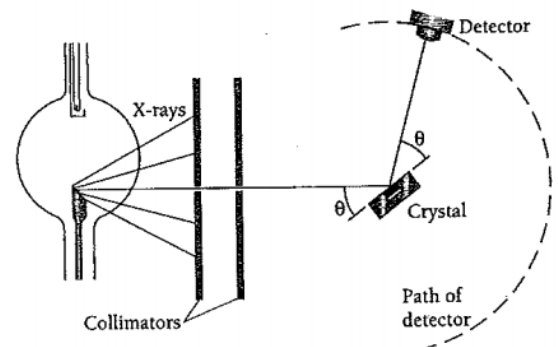
2.5. X-ray Diffraction (XRD)

XRD adalah metode tertua yang umum digunakan untuk menganalisis karakteristik material. Metode ini memanfaatkan difraksi sinar -X untuk menganalisis fasa krintal dari

suatu material. Metode ini didasari persamaan Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta ; n = 1, 2, \dots$$

Dimana λ merupakan panjang gelombang sinar-X, d merupakan jarak antar bidang kisi, θ merupakan sudut diantara sinar datang dan bidang normal, dan n merupakan orde pembias (bilangan bulat). Difraktor merupakan alat yang digunakan untuk mengukur dan mempelajari difraksi sinar x. difraktor dibagi menjadi 3 yaitu difraktor neutron, difraktor sinar x, dan difraktor elektron. [10] penerapan persamaan Bragg bisa di lihat pada sekema desain *x-ray spectrometer* yang menggunakan persamaan bragg sebagai dasarnya ditunjukkan pada gambar Gambar 5. *x-ray spectrometer*



Gambar 6. X-ray spectrometer

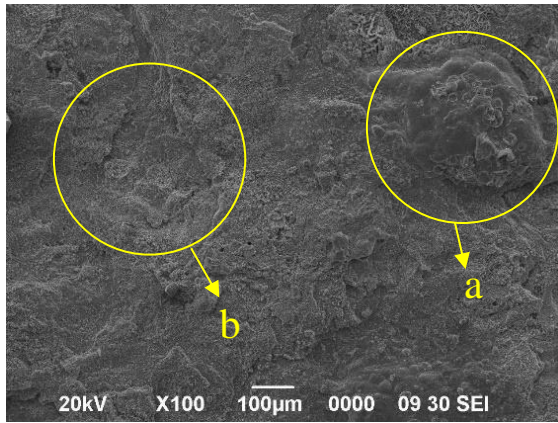
2.6. Lokasi Penelitian

Proses pengujian SEM, EDX dan Metalografi dilakukan di laboratorium metalurgi lembaga ilmu pengetahuan indonesia. Sedangkan pengujian XRD dilaksanakan di laboratorium fisika LIPI serpong Tangerang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

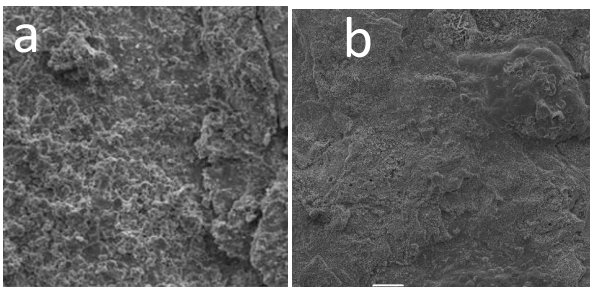
3.1. Hasil Pengujian SEM

Pengujian Mikrostruktur permukaan pipa untuk menganalisis korosi yang terjadi pada permukaan pipa SS 316 L dilakukan di Laboratorium metalurgi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia Serpong menggunakan Scanning Elektron Microscopy (SEM).



Gambar 7. Hasil SEM pembesaran 50 x

Terdapat kerak yang ditunjukkan pada huruf (a) yang cukup tebal yang disebabkan adanya uap air yang mengandung unsur oksigen bereaksi dengan kulit logam bagian dalam pipa yang menimbulkan lapisan oksida. Huruf (b) menunjukan penurunan ketebalan yang disebabkan korosi pada bagian dalam pipa.

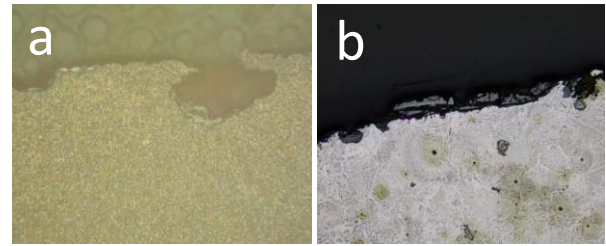


Gambar 8. Hasil uji SEM (a) Hasil penelitian Ardhi Sudrajat (b) Pipa SS/SUS 316 L

Dari hasil pengamatan SEM kerak yang dihasilkan memiliki kemiripan dengan kerak korosi pada temperature tinggi yang menghasilkan lapisan oksidasi. Hasil penelitian Ardhi Sudrajat yang melakukan analisis korosi temperature tinggi seperti ditunjukan huruf (a) terbentuk kerak tak beraturan yang disebabkan oksidasi temperature tinggi sama seperti pengujian pipa SS 316 L.[4]

3.2. Hasil Pengujian Metalografi

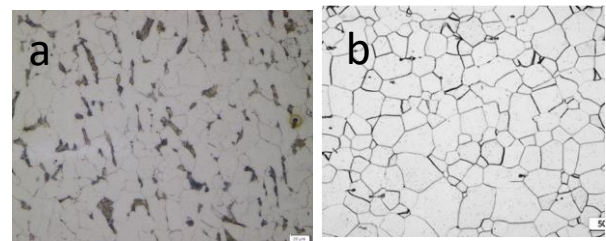
Pengujian metalografi ditunjukkan untuk mengetahui jenis korosi dan kedalaman penembusan korosi pada struktur dalam. Pengujian metalurgrafi dilakukan di laboratorium Metalurgi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia di serpong. Berikut hasil pengujian metalogarfi pada sampel pipa SS 316.



Gambar 9. Strukturmikro potongan melintang (a) Hasil penelitian Hadi Sunandrio (b) Pipa SS/SUS 316 L

Dari hasil metalografi struktur mikro pipa SS/SUS 316 L yang dipotong secara melintang memiliki kemiripan dengan hasil metalografi penelitian Hadi Sunandrio yang mengalami *Pitting Corotion* atau korosi sumur seperti ditunjukan huruf (a) yang disebabkan pecahnya lapisan pasif pada permukaan dalam pipa Pecahnya lapisan pasir disebabkan ion klor yang agresif.[11] Pencegahanya dapat dilakukan dengan langkah-langkah berikut ini

- Mengurangi kandungan ion agresif seperti klor serta menaikkan PH fluida menuju basah.
- Menggunakan fluida air tanah murni dari gunung pada boiler.
- Perlindungan menggunakan cat anti korosi



Gambar 10. Strukturmikro basemetal (a) Pipa SS/SUS 316 L (b) Hasil penelitian J. Kim

Strukturmikro basemetal pipa ss/sus 316 l memiliki bercak pada batas butirnya seperti ditunjukkan pada gambar 4.15 (a) memiliki kesama seperti hasil penelitian J. Kim yang mengalami intergranular korosi atau korosi batas butir.[12]

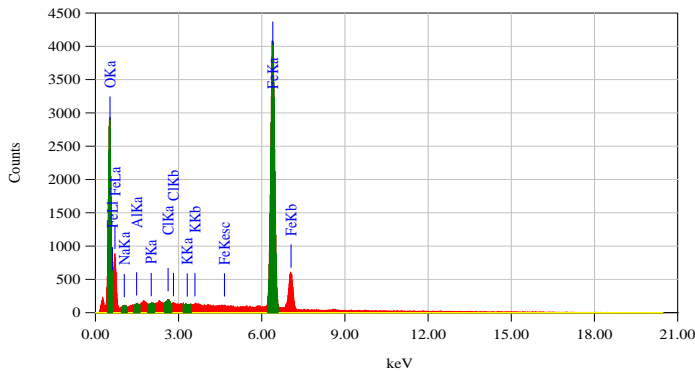
Korosi batas butir terjadi karena adanya perbedaan unsur paduan dalam proses fabrikasi membentuk endapan atau batasan yang sangat rentan terkena korosi pada lingkungan yang agresif. Korosi batas butir menyebabkan butiran menjadi lemah sehingga logam kehilangan kekuatan dan daktilitasnya.

Pencegahanya dapat dilakukan menggunakan langkah berikut :

- Menggunakan unsur yang homogeny.
- Menambahkan unsur-unsur yang memiliki sifat anti korosi seperti kromium.
- Menurunkan kadar karbo.

3.3. Hasil Pengujian EDX

Pengujian EDX dilakukan untuk mengetahui komposisi kerak pada bagian dalam pipa. Pengujian EDX dilakukan di laboratorium Metalurgi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia di serpong. Berikut hasil pengujian EDX pada pipa



SUS 316 L.

Gambar 11. Grafik EDX

Dari grafik pada gambar 4.4 didapatkan komposisi permukaan pipa SS 316 L yang mengalirkan aap air pada *heater system* kapal MT Suprime start yaitu sebagai berikut:

Tabel 1. Komposisi permukaan pipa SS 316 L

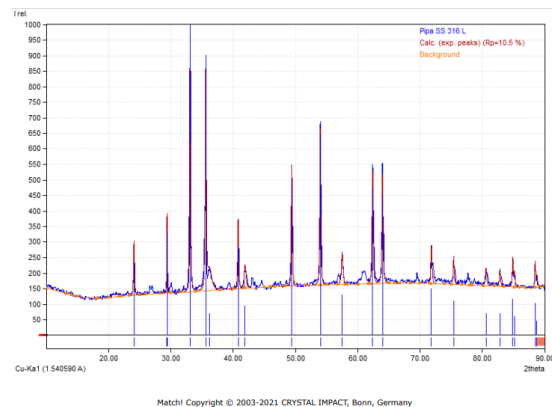
No	Element	Wt%
1.	O	44,18
2.	Na	0,56
3.	Al	0,24
4.	P	0,13
5.	Cl	0,41
6.	K	0,01
7.	Fe	54,47
Total		100,00

Dari data EDX menunjukan unsur paling dominan dalam permukaan dalam pipa adalah unsur Fe sebesar 54,47% dan diikuti unsur O sebesar 44,18%. Kandungan unsur O bersumber dari fluida yang mengalir dalam pipa dalam bentuk uap air yang kemudian bereaksi dengan Fe untuk mencapai bentuk paling stabil yaitu Fe_2O_3 yang merupakan bentuk biji besi di alam. Unsur lain yang cukup dominan berikutnya adalah Natrium sebesar 0,56 %. Natrium adalah logam reaktif yang lunak, ringan dan putih keperakan yang tak berwujud di alam.

Cl juga unsur dominan pada sampel SS/SUS 316 L ion Cl berasal dari air laut yang masuk pada boiler, saat ion Cl bereaksi dengan permukaan dalam pipa menyebabkan larutnya lapisan pasir membentuk $FeCl_3$ mengakibatkan terjadinya korosi sumur dimana Fe^{+3} sebagai pasivator kuat dan Cl_3^- sebagai *pitting agent*.

3.4. Hasil Pengujian XRD

Uji XRD dilaksanakan untuk menganalisis kandungan mineral yang terbentuk pada kerak pipa. Uji XRD dilakukan di Laboratorium Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Berikut hasil XRD.



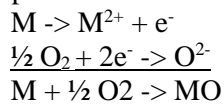
Gambar 12. Grafik XRD

Tabel 2. Hasil XRD Pipa SS 316 L

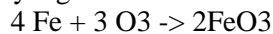
No	Nama	Rumus Kimia	FoM
1.	Iron (III) Oxide	Fe_2O_3	0,9067
2.	Nickel Titanium Oxide	NiO_3Ti	0,8528
3.	Magnesium Titanium Oxide	$MgTiO_3$	0,7391
4.	Vanadium Oxide	V_2O_3	0,6269
5.	Fluorine	F_2	0,6681
6.	Dicadium Triphosphide Iodide	$Cd_2 I P_3$	0.659
7.	Fluorine	F_2	0,6735
8.	Sodium Chromium Digermanate	$CrGe_2Na O_6$	0,6301
9.	Diyprosium AluminiumDiger manide	$AlDy_2Ge 2$	0,6340
10.	Dicadmium Triphosphide Iodida	Cd_2IP_3	0,6590
11.	KH_3F_4	F_4H_3K	0,6106

Salah satu perbedaan besar antara korosi basah dan korosi kering (High Temperature

Corotion) adalah reaksi yang terjadi pada proses korosi. Pada korosi basah reaksi yang terjadi adalah reaksi elektrokimia dimana salah satu senyawa melepas elektron dan yang lain menerimanya untuk mencapai kesetabilan senyawa.



Sedangkan pada korosi kering reaksi yang terjadi awal reaksi kimia dimana unsur akan berikatan dengan unsur lain yang memiliki energi ikatan yang rendah untuk mencapai kestabilan.[13]



Berdasarkan data XRD menunjukan sampel Pipa SS 316 mengalami High Temperature Corotion jenis Oxide hal ini terlihat dari terbentuknya lapisan scale oxide yang berikatan dengan mineral pipa SS 316.

3.5. Analisis Korosi

Berdasarkan uji SEM yang dilakukan sampel SS/SUS 316 L mengalami kesamaan ciri korosi berupa adanya kerak tak beraturan yang disebabkan adanya pembentukan lapisan oksidasi dan terjadinya korosi pada permukaan pipa. Namun pada sampel SS/SUS 316 L tidak ditemukan kerak berwarna putih yang mengandung natrium tinggi seperti pada penelitian adi sudrajat. Hal ini disebabkan fluida yang mengalir pada pipa SS/SUS 316 L memiliki temperature 85 - 95 C suhu ini jauh berbeda dengan penelitian adisudrajat yang mengalirkan fluida pada suhu 960 C.

Dari hasil uji EDX dan XRD menunjukan terbentuknya lapisan oksida yang menjadi ciri dari korosi temperature tinggi. Dimana jenis korosi yang terjadi adalah korosi temperature tinggi jenis oksidasi yang ditunjukkan dengan terbentuknya senyawa Fe₂O₃, NiO₃Ti, V₂O₃, dan MgTiO₃ yang merupakan hasil reaksi kimia. Namun pada pengujian EDX ditemukan reaksi elektrokimia antara Cl dan Fe membentuk FeCl₃ yang mengakibatkan terjadinya korosi sumur.

Dari hasil metalografi pipa SS/SUS 316 L mengalami korosi sumur yang disebabkan adanya ion Cl yang larut bersama lapisan pasir. Serta mengalami korosi batas butir.

Namun pipa SS/SUS 316 L tergolong material tahan korosi temperature tinggi ini bisa dilihat dari hasil metalografi yang tidak menunjukan cacat berarti pada basemetal Pipa SS/SUS 316 L bekas kapal Suprime Start.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan pada Pipa *Mine Line* SS/SUS 316 L kapal MT Suprime Start yang dioperasikan pada suhu 85 – 95°C dan tekanan kerja 0,7 MPa menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

- Pipa *Mine Line* tipe SS/SUS 316 L MT Suprime Start melalui pengujian metalografi mengalami *Pitting Corotion* atau korosi sumur pada permukaan dalam pipa. Serta mengalami korosi *intergranular* atau korosi batas butir pada basemetal pipa. Melalui pengujian EDX dan XRD pipa *mine line* mengalami *Heat Temperature Corotion* jenis Oxida. Hal ini ditunjukkan dengan hasil EDX dan XRD yang menunjukan terbentuknya kerak oksida berupa unsur Fe₂O₃, NiO₃Ti, MgTiO₃, V₂O₃ dengan nilai FoM masing-masing diatas 0,6 yang menunjukan keberadaan yang cukup dominan pada kerak pipa. Kerak oksida terbentuk karena adanya reaksi kimia antara besi dan udara dalam pipa untuk menuju unsur yang stabil.
- Pada Pipa SS/SUS 316 L yang dioperasikan pada suhu 85 – 95°C terdapat beberapa ciri-ciri *Heat temperature corotion* seperti terjadinya reaksi kimia yang membentuk lapisan oksida. Namun kerak yang dihasilkan secara visual berwarna ungu kecoklatan berbeda dengan penelitian *Heat temperature corotion* pada penelitian Ardhi Sudradjat yang berwarna silver. Serta masih ditemukan reaksi elektrokimia antara ion Fe⁺ dan ion Cl⁻ yang mengakibatkan terjadinya korosi sumur.
- Material SS 316 L cukup baik untuk digunakan pada heater kapal tangker. Ditunjukkan dengan hasil uji metalografi yang menunjukan hanya sedikit cacat yang terjadi setelah pipa digunakan selama 15 tahun.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmat dan nikmat yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat diberi kemampuan untuk menyelesaikan penelitian ini. Dalam menyelesaikan karya tulis ini penulis dibantu oleh banyak pihak tanpa mereka tentu penulis tak mampu menyelesaikan karya tulis ini. Oleh karena itu, dengan sepuh hati penulis ingin mengucapkan terimakasih banyak kepada:

1. Wiranto ST selaku owner surveyor PT. Waruna dan seluruh awak kapal MT. SUPRIME START yang telah memberi izin untuk melakukan penelitian pada pipa *mine line*. Terimakasih atas sambutan ramah serta fasilitas yang diberikan sangat membantu penulis menyelesaikan penulisan skripsi ini.
2. Ghalih Senopati ST, MT selaku staf Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI serta seluruh insan LIPI yang telah memberikan fasilitas, bimbingan, ilmu metalurgi yang sangat bermanfaat untuk menyelesaikan skripsi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Magazinović, “Vertical arrangement of coils for efficient cargo tank heating,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 662–670, 2019, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.02.004.
- [2] S. T. Tu, H. Zhang, and W. W. Zhou, “Corrosion failures of high temperature heat pipes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 6, no. 6, pp. 363–370, 1999, doi: 10.1016/S1350-6307(98)00057-0.
- [3] G. Y. Lai, “Challenges in Materials Applications for High-Temperature Service,” *High-Temperature Corros. Mater. Appl.*, pp. 3–4, 2020, doi: 10.31399/asm.tb.htcma.t52080003.
- [4] A. Sudradjat *et al.*, “Analisis Korosi Dan Kerak Pipa Nickel Alloy N06025 Pada Waste Heat Boiler,” *J. Tek. Mesin*, vol. 1, no. 4, pp. 40–45, 2013.
- [5] M. Ananda Rao, R. Sekhar Babu, and M. V. Pavan Kumar, “Stress corrosion cracking failure of a SS 316L high pressure heater tube,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 90, no. March, pp. 14–22, 2018, doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.03.013.
- [6] C. H. Cornelius Klein, *Manual Of Mineralogy*. 1993.
- [7] F. Y. Polini, “Physicochemical characterization of nanofiber composites,” *Elsevier*, pp. 97–115, 2017, doi: 10.1016/B978-0-08-100173-8.00005-3.
- [8] D. Shindo . T. Oikawa, *Analytical Electron Microscopy for Materials Science*. Sendai, Japan, 2002. doi: 10.1007/978-4-431-66988-3.
- [9] V. Manurung, Y. Tri, and S. Yudi, *Panduan metalografi*. 2020. [Online]. Available: <https://lppm.polman.astra.ac.id/wp-content/uploads/2020/08/Panduan-Metalografi.pdf>
- [10] A. Beiser, *Concepts of Modern Physics*. 2002.
- [11] H. Sunandrio and L. N. Sari, “Serangan Korosi Sumuran (Pitting Corrosion) Pada Pipa Roll Bearing Distribusi,” *Mater. Kompon. dan Konstr.*, vol. 11, no. 2, pp. 123–130, 2019, doi: 10.29122/mkk.v11i2.556.
- [12] J. K. Kim, Y. H. Kim, S. H. Uhm, J. S. Lee, and K. Y. Kim, “Intergranular corrosion of Ti-stabilized 11 wt% Cr ferritic stainless steel for automotive exhaust systems,” *Corros. Sci.*, vol. 51, no. 11, pp. 2716–2723, 2009, doi: 10.1016/j.corsci.2009.07.008.
- [13] S. Sulistijono, “Pengenalan Korosi dan Korosi Temperatur Tinggi,” *paper*, vol. 3, no. April, pp. 49–58, 2015.