

Analisa Kegagalan *Superheater Tube Boiler* Berpelapis Baja Tahan Karat Pendekatan Metalografi dan Komposisi Kimia

Mukhlis^{1*}, Moh. Miftachul Munir¹, Muhamad Ari¹, Hendri Budi K.¹, Imam Khoirul R.¹

¹ Program Studi Teknik Pengelasan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia
mukhlis.adam@ppns.ac.id

Abstract—Kegagalan tube boiler merupakan masalah klasik yang belum dapat diselesaikan dengan baik, khususnya kebocoran akibat korosi pada temperatur tinggi. Salah satu upaya untuk mencegah kegagalan tube boiler oleh proses korosi pada temperatur tinggi yakni dengan melakukan pelapisan tube dengan baja tahan karat. Dari data operasional salah satu perusahaan pembangkit listrik yang telah menerapkan metode pelapisan untuk mengurangi kegagalan tube, ternyata masih dijumpai kegagalan tube khususnya pada tertiary superheater boiler yakni pada segmen tube bend. Dari data operator boiler, material tube adalah baja ASTM A213 T11 yang berpelapis SS304. Penelitian ini dilakukan dengan observasi pada area yang mengalami kegagalan menggunakan teknik OES, SEM - EDX dan metalografi. Dari pengamatan visual terlihat adanya scratch pada tube bend. Hasil Optical emission Spectroscopy (OES) menunjukkan adanya ketidaksesuaian spesifikasi material tube dan pelapis dengan standar baku material. Hasil SEM-EDX menunjukkan adanya produk korosi dan agen korosi seperti klor dan fluor. Dan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa kegagalan tube tersebut dimulai dari korosi lokal pada scratch, rendahnya kualitas air umpan dan ketidaksesuaian spesifikasi material.

Keywords—*tube, superheater, korosi, kegagalan, OES, SEM, metalografi*

I. PENDAHULUAN

Dari kapasitas listrik terpasang sebesar 58.390 MW, mayoritas dipasok dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan kapasitas 29.021 MW atau 61,82 persen dari total kapasitas pembangkit yang beroperasi (Wicaksono,2019). Oleh karena itu, unjuk kerja normal fasilitas pembangkit merupakan hal penting bagi kelangsungan operasional perusahaan pembangkit listrik dalam rangka mendukung ketahanan energi nasional. Disamping itu, kegagalan peralatan pembangkit membutuhkan biaya yang besar untuk penggantian dan *downtime*. Segala macam cara diupayakan untuk mencegah kerusakan peralatan pembangkit terutama untuk peralatan yang beroperasi pada kondisi kritis; temperatur tinggi, tekanan tinggi, banyak agen korosi, seperti halnya tube superheater boiler.

Kegagalan tube boiler dari material baja biasanya dengan mekanisme overheating, korosi dan erosi serta creep (Adrian, 2016). Overheating merupakan masalah yang dominan terjadi pada kegagalan tube boiler. Overheating terjadi karena terhambatnya perpindahan panas akibat keberadaan oksida besi pada tube (Vakhguelt, 2017). Untuk mencegah terbentuknya oksida besi, maka tube baja di beri pelapis dari baja tahan karat tipe austenitik.

Dalam penelitian ini, dilakukan observasi pada kegagalan tube superheater boiler yang sudah diaplikasikan logam pelapis yang memiliki unjuk kerja baik pada temperatur 500 – 700 °C yakni baja tahan karat tipe austenitik (Bahrami,2019). Pelapisan dilakukan menggunakan baja tahan karat seri 304 pada tube baja T11.

Dari hasil penelitian diharapkan diketahui mekanisme terjadinya kebocoran, sehingga dapat diupayakan langkah – langkah untuk mencegah terjadinya hal yang sama.

II. METODOLOGI

A. Tinjauan kebocoran *tube boiler*

Di PT.X yang merupakan salah satu operator pembangkit listrik. Seringkali *tube* yang terpasang pada boiler mengalami beberapa kali kebocoran. Boiler yang terpasang diperusahaan tersebut beroperasi sejak tahun 1998. *Tube-tube* yang digunakan terbuat dari material T11. Karena sering mengalami kebocoran, oleh pihak operator dimodifikasi dengan penambahan lapisan stainless steel untuk mencegah kebocoran. Modifikasi ini mampu mengurangi kebocoran dalam jumlah yang signifikan. Namun, akhir-akhir ini sering terjadi kebocoran pada bagian *tube bend*.

Pada tahun 2016, kebocoran terjadi beberapa kali diantaranya pada bulan Maret, Mei (sampel yang diuji), dan terakhir pada bulan Juli. *Tube* terbuat terdiri atas 5,5 mm baja karbon T11 dan dilapisi dengan material *stainless steel* 304 dengan ketebalan rata-rata $\pm 1,6$ mm, sehingga total tebal material sekitar 7,1 mm. Dari pengamatan visual yang dilakukan diketahui bahwa kebocoran tersebut disebabkan oleh korosi eksternal. Adapun bentuk korosi yang terjadi adalah *pitting corrosion* sebagaimana yang terlihat pada **Error! Reference source not found.** berikut.





Gambar 1. Tube end bocor

Tube bend yang diobservasi dalam penelitian ini merupakan boiler tube yang berasal dari tert SH (red: tertiary superheater). Superheater adalah salah satu komponen pada Boiler yang berfungsi untuk memanaskan uap lebih lanjut sehingga menghasilkan uap yang memenuhi persyaratan untuk memutar turbin. Superheater memproduksi uap air yang kering. Uap air ini menyimpan lebih banyak energi panas daripada uap air yang masih air basah. Agar Temperatur uap yang masuk ke turbin dapat terjaga dengan tetap, maka operator boiler harus menjaga agar temperatur uap yang dihasilkan superheater tetap berkualitas. Spray Temperature berfungsi untuk mengontrol temperatur uap di Superheater agar tidak terlalu dingin dan juga tidak terlalu panas. Spray temperatur biasanya diambilkan dari air pengisi boiler (Feed Water)

Di bawah ini adalah data kondisi operasional boiler yang ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Kondisi operasional boiler

No	Data	Nilai	Satuan
1	HBL Firing	50 – 58	m ³ /jam
2	Steam Flow	130 – 175	ton/jam
3	Operating Temperature	380 – 480	°C
4	Operating Pressure	64	kg/cm ²
5	Total firing air	232	ton/jam
6	Shoot blowing	6 – 9	times/day

Sumber: PT.X

B. Metode observasi dan analisa

Untuk mengetahui kondisi akar permasalahan dari kebocoran tube end pada tertiary superheater tersebut, telah dilakukan observasi dan analisa berdasarkan data –data dari hasil OES, SEM EDX dan metalografi di Lab Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

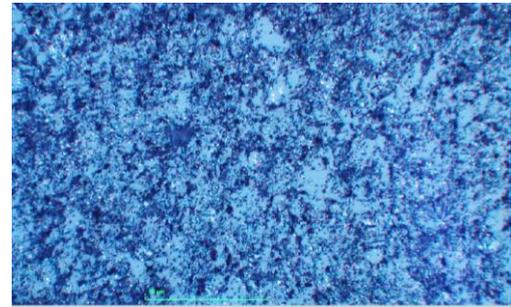
III. ANALISA DATA PENGUJIAN

A. Metalografi tube bend

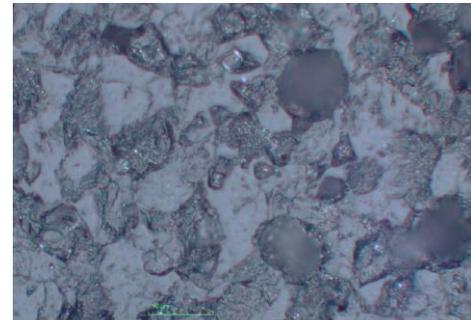


Gambar 2. Foto makro tube boiler berpelapis

Dari gambar 2 diatas terlihat bahwa tube tersebut terdiri dari dua lapisan, bawah dan atas. Lapisan atas adalah material pelapis dan lapisan bawah adalah material tube.



(a)



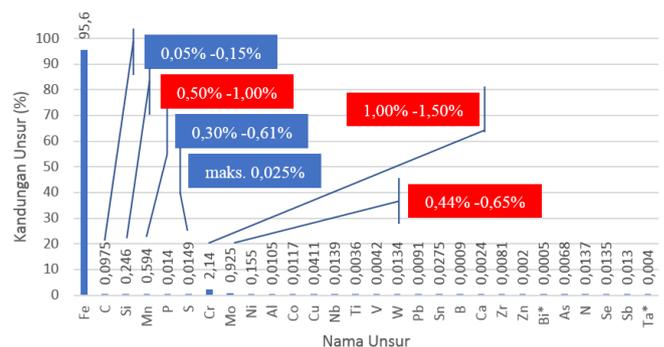
(b)

Gambar 3. Foto mikro SS 304 (a) dan tube T11 (b)

Foto mikro pada gambar 3 diatas terlihat bahwa lapisan SS 304 sulit di foto dengan baik sehingga tidak dapat diidentifikasi, sementara foto mikro tube menunjukkan butiran perlit yang terlihat lebih gelap dari ferit.

B. Material Chemical Composition

Komposisi kimia material didapatkan dengan pengujian Optical Emission Spectroscopy (OES). Pengujian komposisi kimia dilakukan pada material tube bend T11 dan pelapisnya. Penembakan dilakukan sebanyak 3 kali di beberapa titik yang berbeda. Komposisi kimia material dapat di lihat pada lampiran. Adapun komposisi kimia rata-rata tube bend material T11 dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4 Komposisi Kimia Rata-Rata Material Tube Bend (baja T11) dan Chemical Composition Limit sesuai dengan Table 1 pada ASTM Specification A213

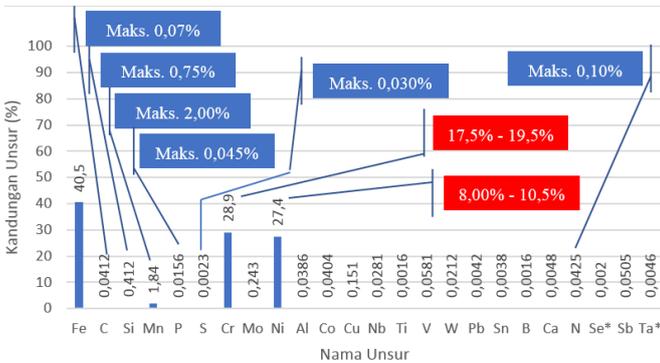
Berdasarkan Gambar di atas, komposisi kimia rata-rata tube bend tidak sesuai dengan komposisi kimia material A213 Grade T11 yang telah ditentukan oleh Table 1 Chemical Composition Requirements dalam ASTM Specification A213, diantaranya adalah unsur silicon (Si), kromium (Cr), dan molybdenum (Mo).

Kandungan silicon (Si) pada material memiliki nilai yang lebih rendah dari range yang telah ditentukan yaitu 0,246% (standard range 0,50%-1,00%). Silikon berfungsi sebagai oksidator di dalam material dan bersama unsur paduan lain mampu meningkatkan ketangguhan dan kekerasan pada material (Maalekian,2007). Kromium yang terkandung di dalam material lebih tinggi dari range yang telah ditentukan 2,14% (standard range 1,00%-1,50%). Kromium dapat meningkatkan ketahanan material dari serangan korosi dan bersama dengan molybdenum (Mo) dapat meningkatkan ketahanan korosi.



meningkatkan kekerasan material (Maalekian,2007). Molibdenum yang terkandung di dalam material lebih tinggi dari *range* yang telah ditentukan 0,925% (*standard range* 0,44%-0,65%). Molibdenum dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik material pada temperatur yang tinggi (Maalekian,2007).

Selanjutnya, komposisi kimia rata-rata pelapis *tube bend* dapat dilihat pada Gambar . Berdasarkan Gambar di bawah, komposisi kimia rata-rata yang dimiliki oleh pelapis *tube bend* tidak sesuai dengan komposisi kimia material *austenitic stainless steel* tipe 304. Hal ini dikarenakan kandungan kromium (Cr) dan Nikel (Ni) melebihi batas *range* yang telah ditentukan oleh *Table 1 Chemical Composition Requirements* dalam ASTM *Specification A240*. Namun, material tersebut lebih cocok dengan *austenitic stainless steel* dengan *UNS Number S35045*.

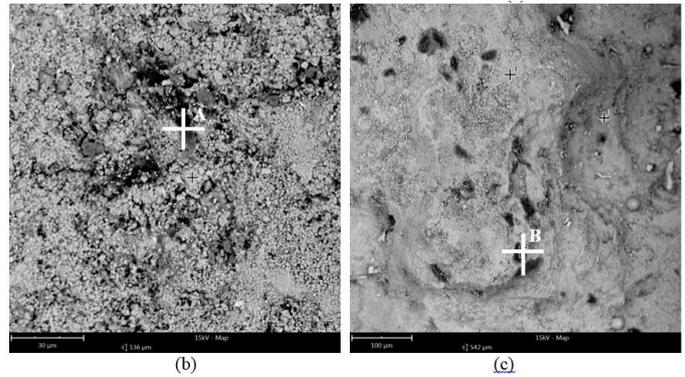
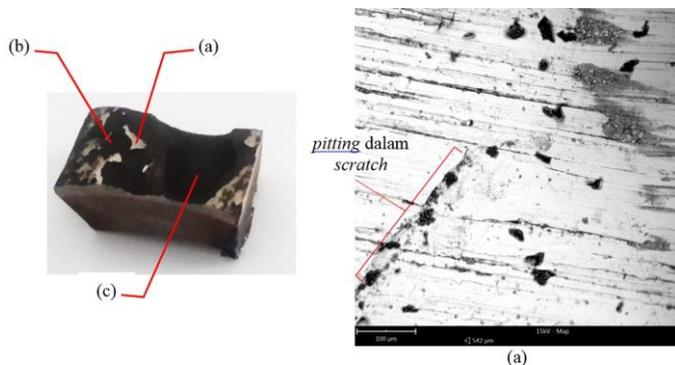


Gambar 5 Komposisi Kimia Rata-Rata Pelapis *Tube Bend* (*Stainless Steel* Tipe 304) dan *Chemical Composition Limit* sesuai dengan *Table 1* pada *ASTM Specification A240*

Material UNS S35045 adalah material *super austenitic stainless steel* yang kandungan kromium dan nikelnya relatif lebih tinggi dari beberapa jenis *stainless steel* yang lain. Material ini memiliki menunjukkan resistansi yang baik terhadap beberapa jenis korosi akibat *oxidation*, *carburization* dan *sulfidation*. Selain itu, UNS S35045 menunjukkan resistansi yang baik terhadap timbulnya *stress corrosion cracking*. Namun kelemahan dari material ini adalah mudah mengalami *sensitization* (pembentukan karbida kromium) bila mengalami eksposur temperatur pada *range* 540 – 760 °C dan rentan terhadap *intergranular cracking* pada beberapa media cair atau gas (Aesteiron,2016).

C. Morfologi kebocoran dan komposisi kimia produk korosi

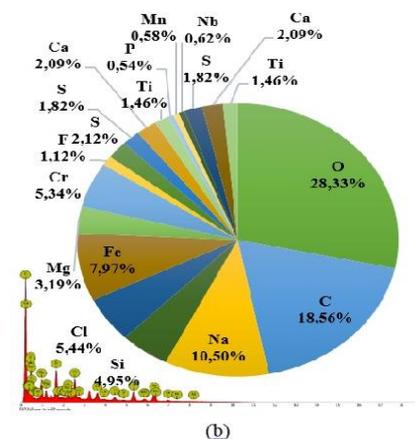
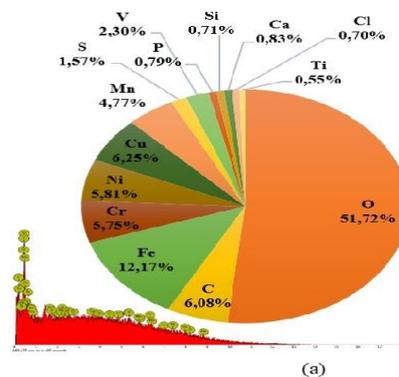
Data morfologi segmen *tube end* bocor dan komposisi kimia produk korosi didapatkan dengan menggunakan pengujian *Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX)* sehingga diperoleh gambaran yang jelas terkait bentuk *pitting* yang terjadi dan unsur-unsur yang terkandung di dalam produk korosi-nya. Morfologi permukaan bocor ternyata dalam bentuk korosi sumuran (*pitting corrosion*) seperti ditunjukkan pada Gambar berikut.



Gambar 6 Morfologi segmen *tube end* bocor ; Permukaan *Tube Bend* berpelapis SS 304 (a), produk korosi (*Rust*) pada Pipa *Carbon Steel* (a) dan pada pelapis SS 304 (b) dengan perbesaran 500X

Berdasarkan Gambar .(a) dapat diketahui bahwa *pitting* timbul pada daerah yang mengalami goresan (*scratch*). Hal ini sesuai dengan reaksi **Error! Reference source not found.** yang menjelaskan awal mula terbentuknya *pitting*. *Scratch* membuat daerah disekitarnya bersifat lebih anodik sedangkan daerah yang bebas cacat bersifat katodik.

Sementara itu, unsur-unsur yang terkandung di dalam produk korosi (*rust*) ditunjukkan pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7 Unsur-Unsur yang Terkandung dalam produk korosi (*rust*): (a) Pada Titik A & (b) Pada Titik B

Analisa pembentukan senyawa dari unsur-unsur hasil pengujian SEM-EDX diperlukan untuk untuk mengetahui senyawa apa saja yang terkandung pada produk korosi (*rust*). Hasilnya digunakan untuk menjustifikasi reaksi korosi yang terjadi sehingga *pitting* timbul pada *tube bend*. Analisa dilakukan dengan mereaksikan unsur satu dengan unsur yang lain. Adapun tahap-tahap melakukan analisa dan perhitungan senyawa ini adalah sebagai berikut.

a. Menentukan jumlah unsur dalam mol dengan r



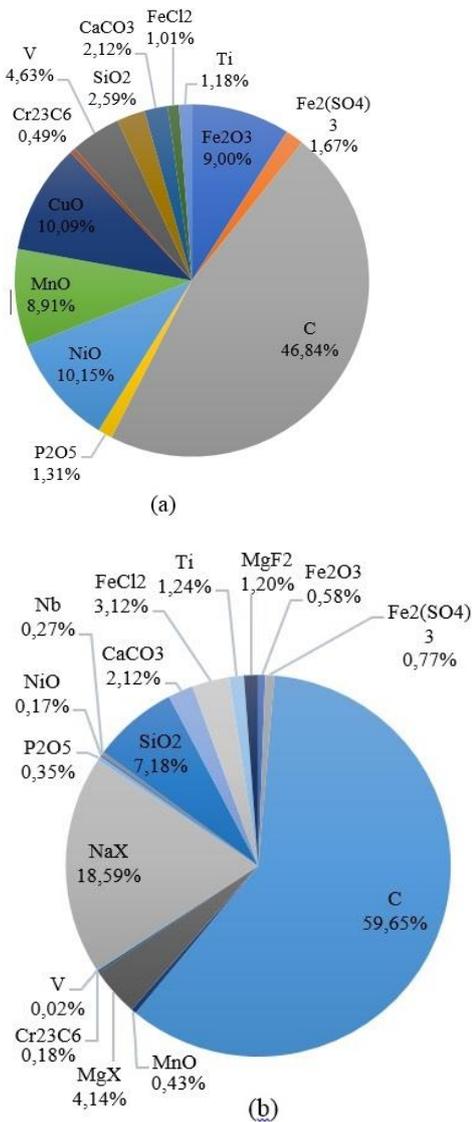
b. Mereaksikan beberapa unsur dan menentukan jenis senyawanya sesuai dengan jumlah mol.

Adapun reaksi pembentukan beberapa senyawa ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Reaksi Pembentukan Senyawa dari Beberapa Unsur

No	Nama Senyawa	Rumus Senyawa	Reaksi Pembentukan
1	Besi karbonat	FeCO ₃	Fe + C + 3/2 O ₂ → FeCO ₃
2	Besi (III) oksida	Fe ₂ O ₃	2Fe + 3/2 O ₂ → Fe ₂ O ₃
4	Besi (III) klorida	FeCl ₂	Fe + Cl ₂ → FeCl ₂
5	Besi (II) sulfida	FeS	Fe + 1/8 S ₈ → FeS
6	Nikel (II) oksida	NiO	Ni + 1/2 O ₂ → NiO
7	Tembaga (II) oksida	CuO	Cu + 1/2 O ₂ → CuO
8	Mangan (II) oksida	MnO	Mn + 1/2 O ₂ → MnO
9	Silikon dioksida	SiO ₂	Si + O ₂ → SiO ₂
10	Kromium Karbida	Cr ₂₃ C ₆	23Cr + 6 C → Cr ₂₃ C ₆
11	Kalsium karbonat	CaCO ₃	Ca + H ₂ O + CO ₂ → CaCO ₃ + H ₂
12	Kalsium hidroksida	CaOH	2Ca + 2H ₂ O → 2CaOH + H ₂
13	Magnesium florida	MgF ₂	Mg + F ₂ → MgF ₂
14	Magnesium+	MgX	Mg + X → MgX
15	Natrium+	NaX	Na + X → NaX
16	Difosfor pentaoksida	P ₂ O ₅	1/2 P ₄ + 5/2 O ₂ → P ₂ O ₅

Hasil dari analisa senyawa yang telah dilakukan, ditunjukkan pada Gambar 8 berikut.



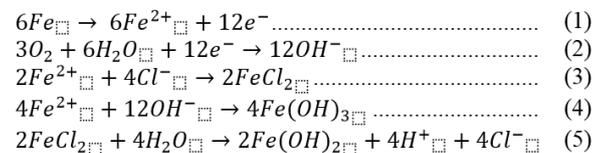
Gambar 8 Senyawa-Senyawa yang Terkandung dalam produk korosi (rust): (a) Pitting pada Pipa Carbon Steel T11 dan (b) Pitting pada Layer Stainless Steel 304

Untuk diketahui bahwa hasil unsur yang dikeluarkan oleh pengujian SEM-EDX sangat bergantung pada proses *sampling* dan persiapan spesimen yang dilakukan. Sedangkan hasil analisa senyawa yang dilakukan berfungsi untuk membantu mengilustrasikan senyawa-senyawa dari unsur-unsur yang terpisah dengan catatan bahwa jumlah presentase senyawa bukan jumlah yang mutlak.

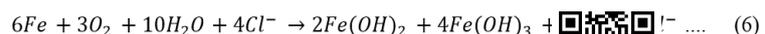
Dari Gambar 77 dan Gambar 8 di atas, ada beberapa poin penting yang perlu menjadi perhatian, diantaranya adalah sebagai berikut.

1. *Pitting corrosion* terjadi salah satu penyebabnya karena keberadaan unsur-unsur halida yang dalam lingkungan seperti Cl dan F. Ion-ion halida ini akan mengkatalis reaksi *pitting* yang terjadi. Berikut adalah salah satu contoh mekanisme korosi *pitting* yang terjadi akibat ion klorida (Cl):

- Pitting* diawali oleh adanya cacat permukaan / *scratch* pada Gambar 8.(a) yang membuat daerah tersebut bersifat anodik sedangkan daerah yang bebas *scratch* bersifat katodik, sehingga logam Fe terurai menjadi ion Fe⁺ dan electron seperti pada persamaan **Error! Reference source not found.**, akibatnya terbentuklah lubang-lubang *pitting* di permukaan *logam***Error! Reference source not found.**
- Uap air yang ada di atas permukaan logam akan tereduksi oleh gas oksigen dan elektron yang berasal dari hasil penguraian Fe seperti pada persamaan **Error! Reference source not found.** membentuk ion-ion OH⁻. Oksigen berasal dari fluida yang mengalir melalui *flowline*. Oksigen pasti akan selalu ada dalam gas walaupun dalam jumlah yang sedikit. Apalagi kelarutan gas oksigen dalam air memang hanya dalam jumlah sedikit, yaitu maksimal sekitar 10 ppm.
- Ion-ion OH⁻ hasil reaksi **Error! Reference source not found.** akan berikatan dengan ion-ion Fe⁺ hasil reaksi **Error! Reference source not found.** berikatan membentuk oksida besi Fe(OH)₃ di atas permukaan logam seperti pada reaksi **Error! Reference source not found.**
- Akibat reaksi **Error! Reference source not found.**, larutan di dalam *pitting* bermuatan lebih positif dibandingkan di atas permukaan logam, sehingga ion-ion Cl⁻ akan masuk ke dalam *pitting* membentuk FeCl₃ seperti pada reaksi **Error! Reference source not found.**
- FeCl₂ yang terbentuk akan terhidrolis oleh uap air membentuk larutan basa lemah Fe(OH)₂ dan ion H⁺ seperti yang ditunjukkan pada reaksi **Error! Reference source not found.**. Karena ion H⁺ memiliki sifat asam lebih kuat dibandingkan Fe(OH)₂, maka daerah di dalam *pitting* bersifat asam sehingga korosi yang terjadi lebih hebat.



Berdasarkan reaksi **Error! Reference source not found.** sampai dengan reaksi **Error! Reference source not found.** di atas, maka reaksi mekanisme *pitting* secara keseluruhan ditunjukkan pada reaksi **Error! Reference source not found.** berikut :



2. Terdapat senyawa karbida kromium di dalam *corrosion rust* pada pipa *carbon steel* T11 dan *layer stainless steel*. Senyawa ini terbentuk akibat proses pengikatan antara Cr dan C pada suhu 500 °C – 900°C. Ada 2 kemungkinan muasal terbentuknya karbida kromium ini, diantaranya adalah akibat proses *sensitization* dalam material *layer stainless steel* atau proses reaksi antara karbon (C) yang berasal dari jelaga pembakaran yang menempel di permukaan *tube bend* dan kromium yang berasal dari material *tube bend layer stainless steel*
3. Pada permukaan *corrosion rust*, terdapat sejumlah unsur-unsur alkali dan alkali tanah yang relatif banyak diantaranya adalah Mg dan Na. Unsur-unsur ini biasanya berikatan dengan unsur-unsur halida membentuk garam. Hal ini menjadi penting karena garam dengan konsentrasi yang tinggi akan meningkatkan laju korosi pada material.

IV. PEMBAHASAN

A. Scratches on Tube Bend Layer External Surface

Scratch atau goresan yang terdapat pada permukaan *tube bend layer* menyebabkan timbulnya korosi *pitting* sesuai dengan reaksi **Error! Reference source not found.** *Scratch* ini kemungkinan besar timbul pada saat proses *bending* pada material *tube*. Proses *bending* akan menyebabkan timbulnya permukaan material tertarik dan meregang. Bagian yang memiliki kemungkinan mengalami *scratch* terbesar adalah pada bagian yang paling besar mengalami tegangan yaitu pada siku *tube bend* bagian luar. Hal ini sesuai dengan bukti tempat korosi *pitting* yang terjadi.

Scratch juga dapat menyebabkan kotoran-kotoran pada lingkungan terperangkap di dalamnya, salah satunya adalah aerosol padat berupa debu karbon yang terbawa akibat proses pembakaran/ pemanasan *super heater*. Apabila karbon menempel pada permukaan *tube bend layer*, maka pada temperatur tinggi karbon dapat berdifusi ke dalam *sub-surface* material *layer* sehingga ketahanan korosi pada daerah tersebut menurun.

Kemungkinan *scratch* timbul saat proses *bending* untuk membentuk *tube bend*. Oleh karena itu sangat disarankan untuk melakukan *polishing* pada permukaan *tube bend layer* dengan alat yang benar-benar mampu untuk menciptakan permukaan poles yang halus. Hal ini dikarenakan kesalahan metode *polishing* dapat memperburuk kualitas kekasaran material yang pada akhirnya akan menimbulkan goresan-goresan baru yang lebih banyak

B. Halide Content in Environment

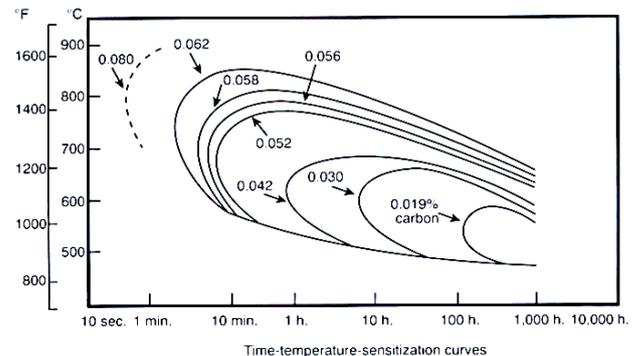
Sesuai dengan pengujian SEM-EDX pada Gambar 77, terbukti pada *corrosion rust* mengandung unsur-unsur halida seperti klorida (Cl) dan fluorida (F). Sesuai dengan reaksi **Error! Reference source not found.** sampai dengan **Error! Reference source not found.**, unsur-unsur tersebut berperan sebagai katalisator (mempercepat laju korosi). Kandungan unsur-unsur halida tersebut kemungkinan berasal dari air yang biasanya digunakan disemprotkan ke dalam *superheater* untuk mengontrol suhu *tube-tube* di dalamnya.

Apabila benar bahwa pendinginan *superheater* dilakukan dengan proses *water spraying*, maka *water treatment* sangat diperlukan untuk mengurangi kandungan unsur-unsur yang dapat menyebabkan korosi *pitting*, terutama kandungan ion-ion dari unsur halida (seperti ion Cl⁻, F⁻), ataupun ion-ion lain seperti SO_x dan NO_x.

C. Sensitization at Elevated Temperature

Sensitization adalah proses pembentukan karbida pada daerah *grain boundaries* yang terjadi pada material *stainless steel*

atau *alloy* yang biasanya *intergranular corrosion*. Pada *stainless steel*, karbida kromium Cr₂₃C₆ akan terbentuk pada temperatur sekitar 500°C – 900°C (Gooch,1996). Berdasarkan Tabel 1, *operating temperature* yang diterima *tube bend* berada pada range 380°C – 480°C. Nilai *operating temperature* tersebut secara aktual dapat lebih tinggi dari 480°C. Karena apabila temperatur diukur pada dari sistem boiler secara umum, maka hal ini tidak mencerminkan temperatur yang diterima pada bagian tertentu dari sistem, terutama *tube-tube* yang berfungsi sebagai media penghantar panas. Sehingga besar kemungkinan material *tube* memiliki temperatur 500°C lebih. Berikut adalah kurva *Time-Temperature-Sensitization* pada *stainless steel* berdasarkan kandungan karbonnya yang ditunjukkan pada Gambar 9 berikut (ASM,2003).



Gambar 9 Kurva *Time-Temperature-Sensitization* pada *Stainless Steel* berdasarkan Kandungan Karbon (ASM,2003).

Kurva di atas menjelaskan bagaimana pengaruh temperatur dan lama material terpapar dengan temperatur tersebut sehingga proses *sensitization* dapat terjadi. Sesuai dengan komposisi kimia pelapis *tube bend* pada Gambar 5, dapat diketahui bahwa kandungan karbon (C) yang dimiliki sebesar 0,0412 %. Misalkan apabila *tube bend* memiliki temperatur 550°C selama 5 jam, maka *sensitization* akan terjadi. Lebih cepat lagi apabila material berada pada temperatur 600°C, hanya diperlukan waktu sekitar 1 jam untuk mengalami *sensitization*. Apabila *sensitization* ini terjadi maka ada beberapa kerugian yang akan ditimbulkan diantaranya adalah turunnya ketahanan korosi, munculnya *intergranular corrosion* dan naiknya nilai kekerasan material.

Operating temperature untuk material pelapis *tube bend* perlu di jaga agar berada di luar range temperatur proses *sensitization* yang dapat memiliki beberapa kerugian yaitu turunnya ketahanan korosi, munculnya *intergranular corrosion* dan naiknya nilai kekerasan material.

D. Inappropriate of Tube Bend Layer Material

Sesuai dengan komposisi kimia hasil pengujian *optical emission spectroscopy (oes)* yang ditunjukkan pada Gambar 5, material pelapis tidak sesuai dengan *chemical composition requirements* untuk *austenitic stainless steel* tipe 304, namun cocok/sesuai dengan jenis material *stainless steel* UNS S35045 yang memiliki sifat sensitif terhadap terjadinya *sensitization*.

Penggantian jenis material *stainless steel* yang digunakan diperlukan untuk mencegah timbulnya proses *sensitization*. Material yang dapat digunakan adalah material *stainless steel* yang memiliki kandungan karbon rendah diantaranya adalah tipe 304L dan 316L

V. KESIMPULAN

Kegagalan atau kebocoran *tube bend tertiary superheater* terjadi dengan mekanisme *pitting corrosion* dengan agen korosi unsur halida dan diinisiasi oleh *scratch* pada pelapis *tube bend*, material *tube bend layer* yang tidak tahan terhadap proses *sensitization* pada temperatur yang tinggi. Adapun yang dapat dilakukan untuk mencegah kerusakan tersebut adalah



dengan cara melakukan proses pemolesan pada permukaan luar *tube bend layer* sebelum di instalasi, melakukan *water treatment* pada air yang digunakan untuk mendinginkan *tube-tube superheater*, memelihara *operating temperature* material dan mengganti jenis material *tube bend layer* menjadi tipe 304L dan 316L yang tahan terhadap proses sensitisasi.

kapasitas-listrik-nasional-58390-mw-terbesar-disumbang-dari-pltu.html. [Accessed 1 Oktober 2019].

T. G. Gooch, "Corrosion Behavior of Welded Stainless Steel," in *Welding Journal May 1996*, AWS, 1996, pp. 135-154.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Bahrami and P. Taheri, "A Study on the Failure of AISI 304 Stainless Steel," 2019.
- American Society for Metals, *Corrosion - Fundamental Testing and Protection*, vol. 13A, S. D. Cramer and B. S. Covino, Jr., Eds., USA: ASM, 2003, p. 2260.
- Aesteiron Steel PVT Ltd., "Incoloy 803, Alloy 803, UNS S35045," 2016.
- A. Vakhguel, S. D. Kapayeva, M. J. Bergander and S. I. Khairaliyev, "Nondestructive Evaluation of Creep and Overheating Damage in Low-Carbon Steel Boiler Tubes," 2017.
- J. Adrian, N. Latif, L. Noerochim and B. A. Kurniawan, "Analisa Kerusakan Superheater Tube Boiler Tipe ASTM A213 Grade T11 pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap," vol. 5, no. 2, 2016.
- M. Maalekian, *The effect of alloying elements on steel*, Technische Universitat Graz, 2007.
- Pebrianto Eko Wicaksono, Merdeka, 27 Juni 2019. [Online]. Available: <https://www.merdeka.com/uang/pln-catat->

