



TUGAS AKHIR – TL141584

**ANALISA KEGAGALAN U-TUBE ECONOMIZER
SA210-A1 B-1102 DI PABRIK 1
PT. PETROKIMIA GRESIK**

**GUSTI UMINDYA NUR TAJALLA
NRP. 2711100078**

**Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc**

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**



FINAL PROJECT – TL141584

**FAILURE ANALYSIS ON ECONOMIZER U-TUBE
SA210-A1 B-1102 OF PT. PETROKIMIA GRESIK
PLANT 1**

**GUSTI UMINDYA NUR TAJALLA
NRP. 27111100078**

Advisor

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc

**DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICALS
ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015**

**ANALISA KEGAGALAN U-TUBE ECONOMIZER
SA210-A1 B-1102 DI PABRIK 1 PT. PETROKIMIA
GRESIK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Korosi Dan Analisa Kegagalan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**GUSTI UMINDYA NUR TAJALLA
NRP. 2711100078**

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Rochman Rochman, M.Sc.  (Pembimbing)



Surabaya

Januari 2015

KATA PENGANTAR

Terima kasih atas rahmat yang diberikan oleh Allah SWT sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul :

“Analisa Kegagalan U-Tube Economizer SA210-A1 B-1102 di Pabrik 1 PT. Petrokimia Gresik”

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri (FTI) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulisan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan, bimbingan, dan saran dari semua pihak. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT
2. Bapak Dr. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
3. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memotivasi penulis
4. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T. M.Sc., dan Bapak Mas Irfan P. H, S.T., M.Sc, Phd, selaku dosen yang telah berbaik hati untuk diajak berdiskusi
5. Bapak Ir. Teguh Rachmadi, M.T., yang telah banyak membantu penulis dalam melakukan penelitian di PT. Petrokimia Gresik
6. Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si, Bapak Ir. Moh. Farid, DEA, dan Ibu Vania Mitha, S.T, M.Sc selaku dosen penguji sidang akhir yang telah memberikan saran demi perbaikan ke depan

7. Bapak Agus Karyono dan Ibu Kanti Hartutik, terima kasih atas pengertian dan kasih sayang, serta doa yang tidak pernah putus
8. Bapak dan Ibu dosen, serta karyawan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, maka dari itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga tulisan ini dapat memberi manfaat.

Surabaya, Januari 2015
PENULIS

**ANALISA KEGAGALAN U-TUBE ECONOMIZER
SA210-A1 B-1102 DI PABRIK 1
PT. PETROKIMIA GRESIK**

Nama : Gusti Umindya Nur Tajalla
NRP : 2711 100 078
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi, ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc

ABSTRAK

Economizer merupakan komponen penting dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas hingga 4-6% di dalam sistem boiler pipa air. Kegagalan pada pipa u-tube economizer SA210-A1 Boiler-1102 PT. Petrokimia terjadi pada lengkung dalam pipa. Untuk menanggulangi hal yang serupa, analisa kegagalan pada u-tube economizer ini perlu dilakukan. Beberapa pengujian dilakukan untuk mendukung hasil analisa. Secara visual, terdapat *branching* di permukaan *water-side tube*, tidak terdapat *lateral corrosion* pada perambatan *crack*, dan morfologi *crack* yang lebar. Hasil OES menunjukkan bahwa sample material memenuhi standar ASTM A210-A1. Namun perhitungan persentase regangan menunjukkan 33,33%,. Persentase ini melebihi standar yang telah ditentukan, yaitu 30%. Selain itu terdapat *residual stress* di dalam tube akibat proses *strain hardening*. pH *feedwater* boiler sempat mengalami penurunan beberapa kali, walaupun tidak begitu signifikan, namun dapat melarutkan lapisan pelindung magnetite [Fe₃O₄], sehingga reaksi antara Fe dan O mempercepat perambatan crack. Ketiga faktor tersebut merujuk pada *stress corrosion cracking* (SCC) yang memiliki morfologi campuran intergranular-transgranular (IG-TG).

Kata kunci : u-tube, economizer, kebocoran, SCC, IG-TG

**FAILURE ANALYSIS ON ECONOMIZER U-TUBE
SA-A210-A1 B-1102 OF
PT. PETROKIMIA GRESIK PLANT 1**

Name : Gusti Umindya Nur Tajalla
NRP : 2711 100 078
Department : *Materials and Metallurgical Engineering, ITS*
Advisor : **Ir. Rochman Rochiem, M.Sc**

ABSTRACT

Economizer is an important component for improving the efficiency of heat transfer up to 4-6% inside the boiler systems. The failure of u-tube economizer SA210-A1 pipe of Boiler-1102 of PT. Petrokimia happened on the curve of the pipe. To anticipate it from re-occurring, a failure analysis on the u-tube economizer is needed. A few tests were conducted to support the analysis results. Visually, branching was found on the surface of water-side tube, there were no lateral corrosion on crack propagation area, and the wide crack morphology. OES results showed that the sample material had fulfilled the ASTM A210 standard. However, the calculation on strain percentages was resulting in 33,33%. This percentages was above the allowable strain in the standard, which is 30%. Other than that, there was residual stress inside the tube as the aftermath of strain hardening. The boiler's pH feedwater had dropped a few times even though it wasn't to significant, it still could dissolve the magnetite protective layer [Fe_3O_4], so that reaction between Fe and O exacerbate the crack propagation. These three factors referred to stress corrosion cracking (SCC) that have mix intergranular-transgranular (IG-TG) morphology.

Keywords: *u-tube, economizer, leakage, SCC, IG-TG*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN	2
1.4 BATASAN MASALAH	2
1.5 MANFAAT PENELITIAN	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 BOILER PIPA AIR (<i>WATER TUBE BOILER</i>).....	5
2.2 ECONOMIZER	6
2.3 ANALISA KEGAGALAN	10
2.4 BAJA KARBON (<i>CARBON STEEL</i>).....	13
2.5 KEGAGALAN PADA <i>THERMAL POWER PLANT</i> ..	16
2.6 KOROSI	17
2.7 FAKTOR-FAKTOR MEDIA AIR YANG BERPENGARUH TERHADAP LAJU KOROSI.....	21
2.7.1 Komposisi Air	21
2.7.2 Nilai pH.....	23
2.7.3 Temperatur	23
2.7.4 Kecepatan dan Agitasi Air	24

2.8	<i>STRESS CORROSION CRACKING</i>	25
2.9	<i>STRAIN MEASUREMENT</i>	32
2.10	PENELITIAN SEBELUMNYA	33

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	DIAGRAM ALIR PENELITIAN	35
3.2	METODE PENELITIAN	36
3.3	BAHAN PENELITIAN.....	36
3.4	ALAT-ALAT PENELITIAN	37
3.5	TAHAPAN PENELITIAN.....	38
3.5.1	Data Operasional Lapangan	38
3.5.2	Preparasi Spesimen.....	38
a.	Pengamatan Visual.....	38
b.	Pengujian Komposisi <i>Optical Emission Spectroscopy</i> (OES).....	39
c.	Pengujian Fraktografi SEM/EDX	40
d.	Pengujian Mikroskopik Mikroskop Optik	41
e.	Pengujian Kekerasan Vickers	42
3.6	RANCANGAN PENELITIAN	43

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1	ANALISA DATA	45
4.1.1	Data Operasi Lapangan	45
4.1.2	Analisa Komposisi Kimia	48
4.1.3	Analisa <i>Strain Measurement</i>	49
4.1.4	Analisa Strukturmikro	49
4.1.5	Analisa Nilai Kekerasan.....	52
4.1.6	Analisa Fraktografi.....	54
4.1.7	Analisa EDX.....	59
4.2	PEMBAHASAN	63
4.2.1	Faktor-Faktor Penyebab Kegagalan	63
4.2.2	Mekanisme Kegagalan	66

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	KESIMPULAN	69
5.2	SARAN	69
	DAFTAR PUSTAKA	xxiii
	LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sirkulasi air/uap pada boiler.....	5
Gambar 2.2 (a) Economizer coil dan (b) profil temperatur gas buang dan air.....	7
Gambar 2.3 Section x-y pada Gambar 2.3 (a) tinggi saluran (duct) economizer	10
Gambar 2.4 Efek penambahan tembaga terhadap uniform atmospheric corrosion pada baja.....	14
Gambar 2.5 Efek penambahan unsur-unsur yang lain terhadap uniform industrial atmospheric corrosion pada baja, (a) krom, (b) silikon, (c) fosfor, (d) nikel.	15
Gambar 2.6 Sel korosi yang terjadi pada logam	18
Gambar 2.7 Rangkaian sel korosi	19
Gambar 2.8 Pengaruh pH terhadap korosi baja karbon	23
Gambar 2.9 Pengaruh temperatur pada korosi besi di dalam air yang mengandung oksigen terlarut (<i>oxygen dissolved</i>)..	24
Gambar 2.10 Pengaruh kecepatan aliran air pada korosi baja. Pada awalnya, peningkatan oksigen akan meningkatkan korosi, kemudian terjadi passivasi oksigen yang menurunkan korosi.....	24
Gambar 2.11 Tiga faktor utama penyebab <i>stress corrosion</i> <i>cracking</i> (SCC)	26
Gambar 2.12 <i>Branching crack</i> pada SCC, (a) transgranular dan (b) intergranular	27
Gambar 2.13 Pengaruh faktor elektrokimia dan mekanik relatif terhadap terjadinya korosi dan SCC.....	31
Gambar 2.14 Pengaruh <i>stress intensity factor</i> terhadap kinetik SCC	32
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	35
Gambar 3.2 (a) Tube baru dan (b) tube gagal.....	37

Gambar 3.3 Pengamatan secara makro dilakukan dengan dua alat, yaitu, (a) mikroskop stereo <i>Stemi DV 4</i> dan (b) kamera digital <i>Canon 60D</i>	39
Gambar 3.4 <i>Shimadzu GVM - 514S</i>	40
Gambar 3.5 <i>Scanning Electron Microscope (SEM) Inspect S50</i>	41
Gambar 3.6 Mikroskop optik <i>Olympus BX51M-RF</i>	42
Gambar 3.7 <i>Universal Hardness Tester HBRV 187.5A</i>	43
Gambar 4.1 Kebocoran yang terjadi pada u-tube economizer	46
Gambar 4.2 Desain Economizer B-1102 PT. Petrokimia Gresik (tampak atas).....	47
Gambar 4.3 Dimensi u-tube	47
Gambar 4.4 Ilustrasi pengambilan sample strukturmikro pada tube baru.....	50
Gambar 4.5 Perbandingan strukturmikro tube baru yang dibagi menjadi dua daerah, yaitu (a) daerah X dengan perbesaran 50× dan (b) daerah Y dengan perbesaran 50×.....	51
Gambar 4.6 Perbandingan strukturmikro tube baru dan tube gagal di daerah X dan Y dengan perbesaran 500×. Tube baru (a) daerah X dan (c) daerah Y. Tube gagal (b) daerah X dan (d) daerah Y	52
Gambar 4.7 Ilustrasi lokasi indentasi pengujian vickers pada tube baru	53
Gambar 4.8 Grafik distribusi nilai kekerasan tube baru	53
Gambar 4.9 Skema pengambilan sample pada tube yang gagal .	55
Gambar 4.10 Sample yang telah dipotong melintang memperlihatkan <i>crack</i> pada bagian dalam tube	56
Gambar 4.11 Kedalaman <i>crack</i> yang dapat dilihat setelah dipotong melintang (tampak samping) dengan menggunakan mikroskop stereo	57
Gambar 4.12 Morfologi <i>crack</i> yang lebar memanjang hingga kedalaman diameter luar sehingga mengalami kebocoran	58

Gambar 4.13 Dua daerah pada <i>crack</i> yang dianalisa dengan menggunakan EDX	60
Gambar 4.14 Topografi daerah A	60
Gambar 4.15 Topografi daerah B	61
Gambar 4.16 Produk korosi Fe-H ₂ O yang berwarna merah-kecoklatan	63
Gambar 4.17 Rata-rata pH feedwater boiler tahun 2011-2012 ...	64
Gambar 4.18 Skema penyebab kegagalan <i>stress corrosion cracking</i>	65
Gambar 4.19 Skema mekanisme terjadinya SCC	67

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin (Brook & Choudury, 2002).....	11
Tabel 2.2 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin (Brook & Choudury, 2002).....	12
Tabel 2.3 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin (Brook & Choudury, 2002).....	13
Tabel 2.4 Macam-macam kegagalan pada thermal power plant (Bamrotwar & Deshpande, 2014).....	17
Tabel 2.5 <i>Electromotive force series</i> (Davis, 1999).....	20
Tabel 2.6 Anion dan Kation yang terdapat di perairan alami (Nikanorov & Brazhnikova, 2010).....	22
Tabel 2.7 Analisa <i>tipe-tipe</i> perairan alami (Craig, dkk., 2006)..	22
Tabel 2.8 Lingkungan-Baja karbon yang menimbulkan SCC (Stansburry & Buchanan, 2000)	29
Tabel 3.1 Komposisi u-tube economizer berdasarkan ASTM A210	36
Tabel 3.2 Sifat mekanik SA210-A1 berdasarkan ASTM A210..	36
Tabel 3.3 Rancangan penelitian.....	43
Tabel 4.1 Data statistik kebocoran yang terjadi pada economizer	45
Tabel 4.2 Spesifikasi tube	47
Tabel 4.3 Data operasi pada economizer	48
Tabel 4.4 Hasil pengujian <i>Optical Emission Spectroscopy</i>	48
Tabel 4.5 Ukuran R dan r tube dalam perhitungan % <i>strain</i>	49
Tabel 4.6 Presentase unsur di daerah A dan B.....	61

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

PT. Petrokimia Gresik merupakan produsen pupuk di Indonesia yang pada tahun 2012 ini, dipercaya oleh pemerintah untuk meningkatkan kapasitas produksi menjadi 5,4 juta ton, atau meningkat 1,6 juta ton dibandingkan tahun 2011. Hal ini menjadikan PT Petrokimia Gresik sebagai produsen pupuk yang memasok 50% kebutuhan pupuk subsidi nasional (koran.republika.co.id).

Dalam upaya penyediaan pupuk tersebut, PT. Petrokimia Gresik terbagi menjadi tiga pabrik utama, yaitu Pabrik 1 (Pabrik pupuk Nitrogen), Pabrik 2 (Pabrik pupuk Phospat), dan Pabrik 3 (Pabrik penunjang).

Salah satu hal yang menunjang dari seluruh aktifitas produksi adalah peran *boiler*. Boiler atau ketel uap adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada di dalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Uap ini yang akan digunakan untuk menjalankan proses produksi di Pabrik 1, yaitu Pabrik Pupuk Nitrogen.

Salah satu komponen penting dalam boiler adalah *economizer*. Economizer terdiri dari pipa-pipa yang menghubungkan *feed water* dan *steam drum* guna memanaskan air hingga hampir mencapai titik didih. Pada Boiler-1102 di Pabrik 1 PT. Petrokimia Gresik, sejak beroperasi pada tahun 2008 hingga saat ini, telah tercatat 4 kebocoran yang terjadi pada lengkung dalam u-tube economizer. Padahal, economizer berperan penting dalam meningkatkan efisiensi panas hingga 4-6% (Eoff, 2008). Kebocoran ini menyebabkan mesin harus dimatikan dan penanganan segera dilakukan. Padahal, melakukan *start-up*

dan *shut down* dapat menyebabkan *oxygen corrosion*, jika tidak melakukan prosedur yang benar (Imran, 2014). Selain itu, penanganan ini membutuhkan waktu yang dapat memengaruhi kinerja produksi pabrik. Untuk menanggulangi hal yang serupa, analisa kegagalan pada u-tube economizer ini perlu dilakukan.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang akan dikaji dalam analisa kegagalan ini adalah menganalisa yang terjadi pada boiler dengan perumusan masalah sebagai berikut:

1. Apa saja faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan pada u-tube economizer?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan yang terjadi pada u-tube economizer?
3. Apa saja langkah-langkah penanggulangan yang perlu dilakukan agar kebocoran pada u-tube economizer dapat ditanggulangi?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Sesuai dengan permasalahan yang telah disebutkan, maka tujuan penelitian ini antara lain:

1. Menganalisa faktor-faktor penyebab kegagalan yang terjadi pada u-tube economizer
2. Menganalisa mekanisme kegagalan yang terjadi pada u-tube economizer
3. Menganalisa langkah-langkah penanggulangan yang perlu dilakukan agar kebocoran pada u-tube economizer dapat ditanggulangi

1.4 BATASAN MASALAH

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisa permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan, yaitu:

1. Desain seluruh komponen boiler sudah memenuhi standar operasional
2. Fluida yang mengalir di dalam tube dianggap homogen
3. Tekanan dan temperatur yang bekerja pada boiler tidak melebihi kemampuan material
4. Parameter dan hasil lasan pada kebocoran diabaikan

1.5 MANFAAT PENELITIAN

Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberi manfaat kepada seluruh pihak yang berkaitan, yaitu mahasiswa sebagai pelaksana penelitian mampu memahami serta mengaplikasikan ilmu yang telah didapat khususnya cabang ilmu material dan metalurgi, PT. Petrokimia Gresik sebagai pihak utama yang menyokong penelitian dapat menerapkan hasil penelitian untuk:

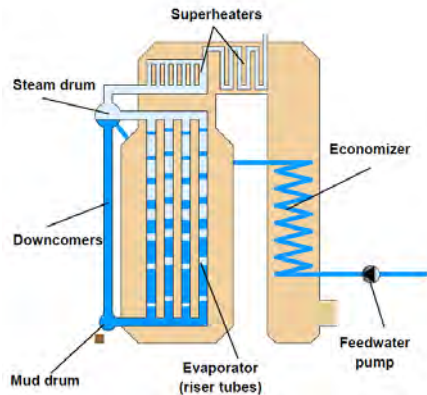
1. Menentukan faktor-faktor penyebab terjadinya kebocoran pada u-tube economizer
2. Masukan untuk langkah-langkah perawatan dan penanggulangan agar kasus kegagalan serupa dapat diminimalisir

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 BOILER PIPA AIR (*WATER TUBE BOILER*)

Fungsi utama dari boiler adalah mengubah air menjadi uap panas (*superheated steam*) sebagai penggerak turbin. Proses yang terjadi di dalam boiler merupakan sebuah siklus tertutup dengan media utama air dan uap panas (Effendi, 2008).



Gambar 2.1 Sirkulasi air/uap pada boiler (Teir & Kulla, 2002)

Berbeda dengan boiler pipa api (*fire tube boiler*), air/uap pada boiler pipa air yang dipanaskan mengalir di dalam tube dan mendapatkan panas dari gas buang (*flue gas*) hasil pembakaran eksternal. Sirkulasi ini dimulai ketika air dipompa dari tanki air-umpan (*feedwater tank*). Tekanan pada pompa *feedwater tank* harus mencapai tekanan yang dibutuhkan boiler. Pada kenyataannya, tekanan akhir uap harus di bawah 170 bar agar sirkulasi dapat berjalan dengan baik.

Pertama-tama, *feedwater* memasuki economizer dan dianaskan hingga hampir mencapai titik didih air pada tekanan tertentu. Untuk mencegah mendidihnya air,

temperatur di dalam economizer dijaga agar tetap 10° di bawah titik didihnya.

Dari economizer, *feedwater* mengalir menuju tanki uap (*steam drum*). Di dalam *steam drum*, terjadi pencampuran dengan air yang berada di tanki uap untuk mengurangi tegangan akibat panas (*thermal stresses*).

Ketika telah mencapai titik jenuh (*saturated water*), air mengalir dari tanki uap melewati *downcomer tube* menuju *mud drum (header)*. Biasanya, di luar boiler terdapat sepasang *downcomer tubes* dingin.

Setelah itu, *saturated water* memasuki *riser tubes* dan sebagian mengalami penguapan. *Riser tube* diletakkan pada dinding boiler sebagai pendingin dinding tungku (*furnace*) agar efisien. *Riser tube* biasanya disebut *generating tubes* karena dapat menyerap panas secara efisien dalam pencampuran air/uap. *Riser tube* membentuk *evaporator unit* di dalam boiler.

Setelah melewati *riser*, campuran air/uap kembali ke tanki uap. Di dalam tanki uap, terjadi pemisahan antara air dan uap; *saturated water* akan kembali *downcomer tubes* dan uap jenuh (*saturated steam*) akan menuju *superheater tube*. Tujuannya adalah untuk menghilangkan pengotor (*impurities*) di dalam *superheater tubes* dan turbin.

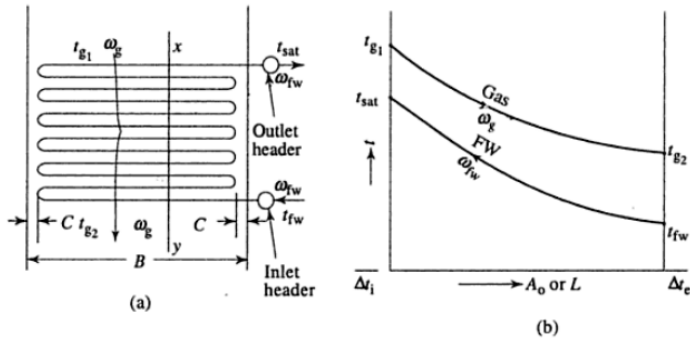
Di dalam *superheater*, uap akan dipanaskan hingga mencapai titik jenuh. Kemudian uap akan keluar menuju boiler. Sirkulasi air/uap pada boiler pipa air secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.1 (Teir & Kulla, 2002).

2.2 ECONOMIZER

Economizer adalah komponen boiler yang berfungsi memanaskan air hingga hampir mencapai titik didihnya. Economizers menggunakan sisa gas buang yang berasal dari *superheating* atau *reheating* pada temperatur antara 370-

540°C. Di dalam sebuah proses, membuang gas bertemperatur tinggi berarti membuang energi yang sangat banyak. Dengan menggunakan sisa gas buang untuk memanaskan *feedwater* inilah, efisiensi energi dan ekonomi dapat tercapai. Sehingga komponen ini dinamakan “*economizer*”.

Tube economizer biasanya memiliki diameter luar sebesar 45-70 mm dan disusun secara vertikal, yang setiap *tubenya* dihubungkan dengan u-tube (dipasang vertikal) sehingga economizer ini menghubungkan antara *inlet* dan *outlet headers*. Perakitan antar tube satu dengan yang lainnya berjarak sekitar 45-50 mm tergantung pada *tipe* bahan bakar dan karakteristik abu (*ash*). Gambar 2.3 menunjukkan rangkaian economizer dan profil temperatur gas buang dan air panas (*water heated*) hingga mencapai temperatur jenuh.



Gambar 2.2 (a) Economizer coil dan (b) profil temperatur gas buang dan air (Nag, 2006)

Laju perpindahan panas (*heat transfer*) dari gas buang hingga *feedwater* adalah,

$$\begin{aligned}
 Q_{ECO} &= \omega_g c_{p_g} (t_{g1} - t_{g2}) \\
 &= \omega_{fw} c_{p_{fw}} (t_{sat} - t_{fw}) \\
 &= U_o A_o \Delta t_{l,m}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

dimana $\Delta t_{l,m}$ = log-mean perbedaan temperatur

$$= \frac{\Delta t_i - \Delta t_c}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_c}}$$

$$\Delta t_i = t_{g1} - t_{sat}, \Delta t_c = t_{g2} - t_{fw} \quad \text{and}$$

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_{sc} A_i} + \frac{1}{h_i A_i} + \frac{x_w}{k_w A_{l.m}} + \frac{1}{h_{fo} A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.2)$$

dimana U_o = koefisien keseluruhan perpindahan panas (*heat transfer*), h_{sc} = koefisien *heat transfer* akibat terbentuknya *scale* di dalam tube, h_i = koefisien *heat transfer* di dalam tube (*water side*), k_w = konduktivitas termal dinding tube, $A_i = n\pi d_i l$, $A_o = n\pi d_o l$, l = panjang satu *coil*, n = jumlah seluruh *coil*, $A_{l.m} = \log\text{-mean area} = (A_o - A_i) / (\ln A_o / A_i)$, X_w = ketebalan tube, h_{fo} = koefisien *heat transfer* akibat adanya solid (*ash* dan *doot*) di permukaan luar tube, dan h_o = koefisien *heat transfer* di luar tube (*gas side*). Jika resistan akibat *scale* ($1/h_{sc}A_i$) dan *fouling* ($1/h_{fo}A_o$) diabaikan (dianggap bersih), dan ketebalan tube dianggap kecil, maka keseluruhan koefisien *heat transfer* adalah,

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_i} + \frac{x_w}{k_w} + \frac{1}{h_o} \quad (2.3)$$

Koefisien *heat transfer* pada sisi gas lebih kecil dibandingkan dengan sisi air, $h_o \ll h_i$. Untuk mengimbangi hal ini, permukaan luar tube diberi fin untuk memperluas area *heat transfer*. Baik aliran gas maupun air mengalami proses konveksi, seperti

$$Nu = f(Re, Pr)$$

dimana, Nu = nusselt number = h_d/k_f , Re = Reynolds number = $V_{ave} d/\nu_f$, ν_f = viskositas kinematis fluida, Pr = Prandtl number = $(C_p \mu_f)/k_f$, μ_f = viskositas dinamis fluida, dan k_f = konduktivitas termal fluida. Jika aliran bersifat turbulen, persamaan Dittus Boiler dapat digunakan untuk menghitung

koefisien *heat transfer* yang ditunjukkan persamaan di bawah ini,

$$\text{Nu} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^n \quad (2.4)$$

dimana $n = 0,4$ jika fluida panas dan $n = 0,3$ jika fluida dingin

Dengan adanya persamaan (2.3) dan persamaan (2.4), U_o dapat dicari, dan dari persamaan (2.1) luas area A_o dapat dibuktikan, dimana $A_o = n\pi d_o l$.

Karena *feedwater* mengalir melewati tubes, pada saat keluar dari economizer, dengan *saturated water*,

$$\omega_{tw} = \left(n \frac{\pi}{4} d_i^2 \right) \frac{V_{fw}}{v_f} \quad (2.5)$$

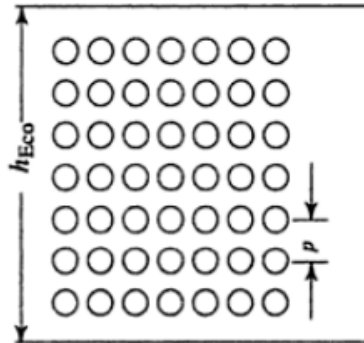
dimana V_{fw} = kecepatan fluida saat keluar dan v_f = volume spesifik dari *saturated water*.

Semakin tinggi kecepatan air (atau *Reynold number*), semakin berkurang ketebalan tube dan semakin besar koefisien *heat transfer* yang dibutuhkan. Tetapi semakin tinggi kecepatan berarti semakin tinggi tenaga yang dibutuhkan untuk memompa fluida, i.e. tenaga yang tinggi dibutuhkan untuk fluida ($V' \Delta p$), dimana V' adalah volume aliran fluida ($= \omega_{tw} v_f = A_i V_{fw}$) tenaga yang dibutuhkan sebanding dengan kuadrat kecepatan fluida ($\Delta p \propto V_{fw}^2$). Dua hal ini berbanding terbalik dengan tingginya *heat transfer* dan tenaga yang dibutuhkan untuk memompa kecepatan fluida agar optimal. Di sisi gas, kecepatan gas buang berkisar antara 10-12 m/s dan di sisi air, kecepatan air tidak boleh lebih dari 1-1,2 m/s. Jika kecepatan air V_{fw} sesuai, dari persamaan (2.5), jumlah tube yang disusun secara paralel mengakomodasi aliran yang telah diperkirakan, A_o sudah dapat dihitung, sehingga panjang satu *coil* dapat ditentukan.

Jika C adalah jarak antara dua sisi dengan lebar B seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, maka, jumlah

lengkungan, n_t , dalam satu *coil* dapat dihitung dengan persamaan di bawah,

$$n_t = \frac{l}{B - 2C} \quad (2.6)$$



Gambar 2.3 Section x-y pada Gambar 2.3 (a) tinggi saluran (duct) economizer (Nag, 2006)

Jika *vertical pitch* atau jarak antar titik pusat pada penyusunan horizontal tube yang berurutan membentuk *coil*, p , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, tinggi saluran yang dibutuhkan economizer dapat dihitung dengan persamaan di bawah,

$$h_{ECO} = n_t \times p \quad (2.7)$$

Economizer diletakkan diantara *superheater* dan *air preheater* (Nag, 2006).

2.3 ANALISA KEGAGALAN

Analisa kegagalan adalah kegiatan pemeriksaan/pengujian terhadap suatu komponen yang mengalami kerusakan untuk mencari penyebab terjadi permasalahan yang sifatnya spesifik. Didukung dengan berbagai referensi, pengamatan, dan pengujian laboratorium untuk memperkuat dugaan permasalahan. Kegagalan bisa saja berasal dari manufaktur, perakitan ataupun pengoperasian yang tidak

sesuai dengan prosedur, dan tujuan analisa kegagalan untuk mengetahui mekanisme kegagalan. Manfaat yang dihasilkan dari analisa kegagalan dalam jangka pendek adalah perbaikan desain dan proses fabrikasi juga pengoperasian. Untuk jangka panjang bisa dijadikan acuan pengembangan material dan evaluasi untuk memperkirakan kerja suatu material dan memperbaiki sistem perawatan dari material tersebut.

Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makroskopis dan mikroskopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brook & Choudury, 2002), faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan:

Faktor kesalahan Pemilihan Material. Tabel 2.1 di bawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam masalah kegagalan material

Tabel 2.1 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin (Brook & Choudury, 2002)

Permasalahan	%
Kesalahan pemilihan material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5
Material yang tidak jelas	2

Perawatan Komponen yang Kurang Baik. Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.2 menunjukkan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

Tabel 2.2 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin (Brook & Choudury, 2002)

Permasalahan	%
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6

Kesalahan dalam Perancangan Komponen. Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

- Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
- Kegagalan getas akibat beban kejut
- Kegagalan pada temperature tinggi (pemuluran)
- *Static delayed fracture*
- Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
- Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*
- Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.

Kondisi Kerja yang Ekstrim. Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.3 berikut ini:

Tabel 2.3 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin (Brook & Choudury, 2002)

Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan (fatigue)	25
Kegagalan getas (brittle fracture)	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperatur tinggi	7
Korosi SCC, korosi leleh penggetasan hidrogen	6
Pemuluran	3
Abrasi, erosi	3

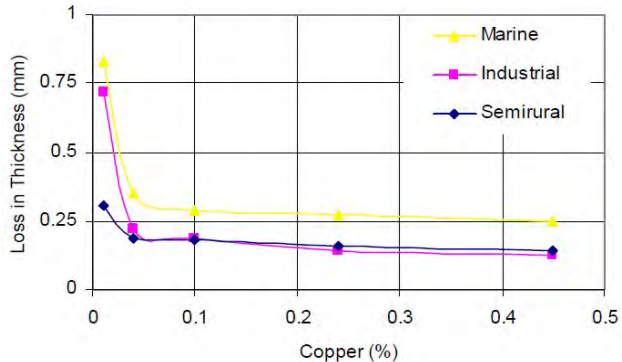
2.4 BAJA KARBON (*CARBON STEEL*)

Baja karbon sering digunakan sebagai elemen struktural yang efektif beberapa tahun terakhir ini di lingkungan non-korosif, jika memiliki paduan dan metode proteksi yang tepat. Namun, baja karbon ini merupakan logam yang rentan terhadap semua jenis korosi, pemeliharaan yang intensif sangat dibutuhkan apabila berada di lingkungan korosif.

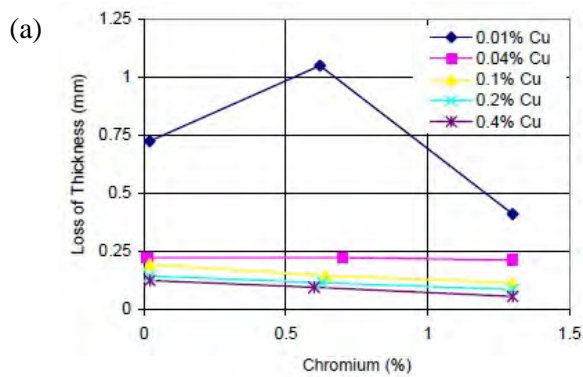
Baja karbon telah digunakan sebagai struktur di lingkungan non-air laut. Baja akan terkorosi dengan cepat saat pertama kali terkena udara dan segera membentuk lapisan oksida dimana lapisan ini akan mengurangi laju korosi secara signifikan.

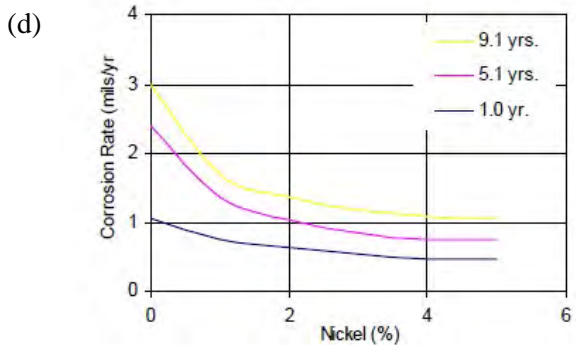
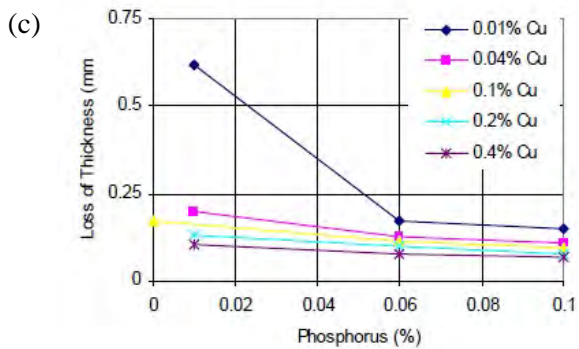
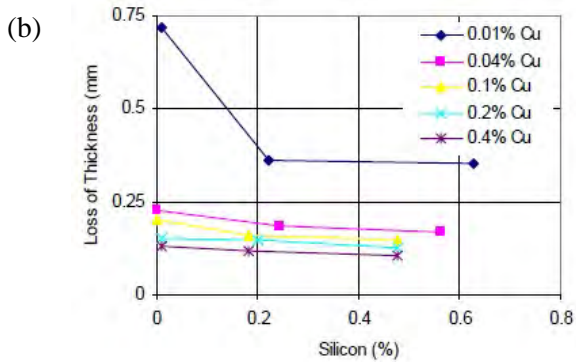
Untuk baja paduan, penambahan tembaga sebanyak 0,01 - 0,05% memiliki efek yang besar dalam meningkatkan ketahanan korosi, seperti yang terlihat pada Gambar 2.4. Sedangkan hubungan dengan unsur yang lain terhadap ketahanan korosi ditunjukkan Gambar 2.5. Sedikit penambahan kromium dapat meningkatkan kekuatan tensile

secara signifikan dan ketahanan korosi. Kromium, nikel, dan tembaga memberikan sifat yang bagus tanpa harus menggunakan *coating* di lingkungan non-air laut (Craig, dkk., 2006).



Gambar 2.4 Efek penambahan tembaga terhadap uniform atmospheric corrosion pada baja (Craig, dkk., 2006)





Gambar 2.5 Efek penambahan unsur-unsur yang lain terhadap uniform industrial atmospheric corrosion pada baja, (a) krom, (b) silikon, (c) fosfor, dan (d) nikel (Craig, dkk., 2006)

Karbon berperan penting dalam pembentukan presipitasi karbida. Penurunan kadar karbon dapat membatasi pembentukan karbida yang berbahaya, seperti kromium karbida yang dapat mengendapkan kromium di batas butir.

Molibdenum ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan baja terhadap serangan intergranular. Selain itu juga dapat meningkatkan resistansi terhadap korosi *pitting* dan *crevice*.

Kromium dapat meningkatkan ketahanan korosi.

Titanium ditambahkan untuk memberikan stabilisasi dalam menghadapi presipitasi yang berbahaya, seperti kromium karbida. Unsur ini dikombinasikan dengan karbon dan nitrogen, dan tidak diperbolehkan membentuk karbida dan nitrida yang dapat memicu korosi intergranular. Temperatur optimal dalam pembentukan TiC (karbida titanium) adalah 900 – 950 °C.

Silikon ditambahkan untuk meningkatkan resistansi korosi di lingkungan asam sulfur.

Sulfur dapat meningkatkan *machinability*, namun menurunkan resistansi terhadap korosi (Ahmad, 2006).

2.5 KEGAGALAN PADA *THERMAL POWER PLANT*

Pada *thermal power station*, boiler berperan penting dalam memproduksi daya. Dengan beban kerja yang tinggi, *power plant* dapat menghadapi berbagai permasalahan, salah satunya adalah kebocoran pipa. Boiler juga memiliki umur pakai yang terbatas dan dapat rusak akibat bermacam-macam jenis kegagalan. Kegagalan ini dapat dibagi menjadi enam yang ditunjukkan pada Tabel 2.4 (Bamrotwar & Deshpande, 2014).

Tabel 2.4 Macam-macam kegagalan pada thermal power plant (Bamrotwar & Deshpande, 2014)

NO	MACAM-MACAM KEGAGALAN	
1	<i>STRESS RUPTURE</i>	<i>Short term overheating High temperature creep Dissimilar welds</i>
2	<i>WATER SIDE CORROSION</i>	<i>Caustic corrosion Hydrogen damage Pitting Stress corrosion cracking</i>
3	<i>FATIGUE</i>	<i>Vibration Thermal Corrosion</i>
4	<i>EROSION</i>	<i>Fly ash erosion Falling slag erosion Soot blower erosion</i>
5	<i>FIRE SIDE CORROSION</i>	<i>Low temperature corrosion Water wall corrosion Coal ash corrosion</i>
6	<i>LACK OF QUALITY CONTROL</i>	<i>Maintenance cleaning damage Chemical damage Material defects</i>

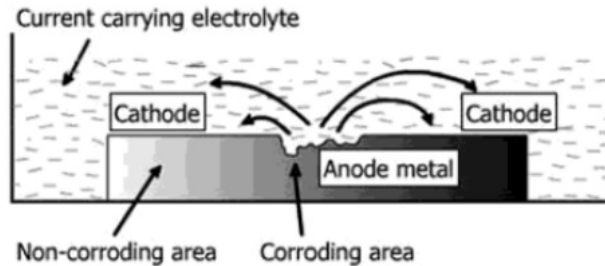
2.6 KOROSI

Korosi adalah reaksi yang terjadi antara material dan lingkungannya. Korosi tidak dapat terlepas dari pengaruh lingkungan. Semua lingkungan bersifat korosif untuk beberapa material tertentu.

Terbentuknya korosi bergantung pada empat hal berikut (sel korosi) yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7, yaitu

- Anoda
- Katoda

- Elektrolit
- Kontak metalik



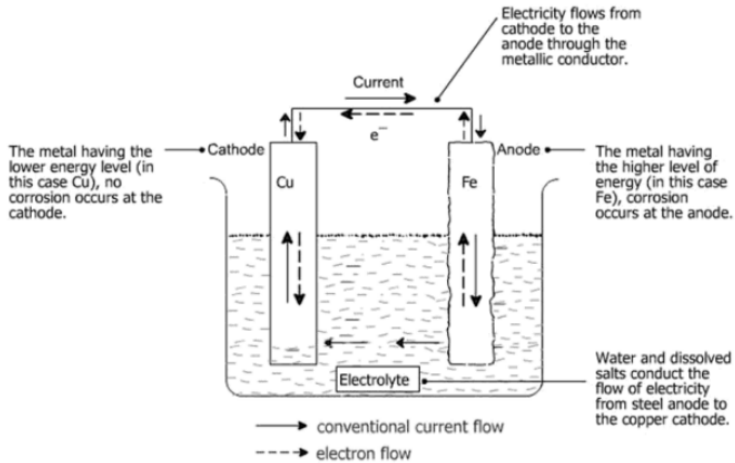
Gambar 2.6 Sel korosi yang terjadi pada logam (Ahmad, 2006)

Anoda. Salah satu dari *dissimilar metal electrode* di dalam sel elektrolit, bertindak sebagai kutub negatif. Karena sebagai logam yang reaktif, elektron akan keluar dari anoda. Elektron tidak terlarut di dalam larutan aquos dan hanya mengalir menuju katoda.

Katoda. Elektroda yang memiliki kutub positif. Proses reduksi terjadi pada katoda. Elektron selalu menjadi agen pereduksi.

Elektrolit. Elektrolit merupakan larutan elektrik konduktif yang harus ada dalam pembentukan korosi. Air murni adalah salah satu elektrolit dengan konduktifitas yang rendah.

Kontak metalik. Kedua elektroda dihubungkan secara eksternal oleh konduktor logam (*metallic conductor*). Di dalam *metallic conductor*, arus akan mengalir dari kutub positif ke negatif, sedangkan elektron mengalir dari kutub negatif ke positif.



Gambar 2.7 Rangkaian sel korosi (Ahmad, 2006)

Anoda adalah area logam yang terkorosi. Pada anoda terjadi reaksi oksidasi. Ini menggambarkan ion-ion logam masuk ke dalam larutan dengan cara *dissolution*, hidrasi atau pembentukan kompleks (*complex formation*). Reaksi anoda dapat dituliskan sebagai berikut :



Reaksi oksidasi di sebagian besar logam dan paduan membentuk korosi. Jadi, korosi akan terhambat saat oksidasi dapat dihentikan.

Di katoda terjadi reaksi katodik (reaksi reduksi). melalui reaksi anodik, elektron akan melapisi permukaan katoda. Tidak seperti pada reaksi anodik, terjadi penurunan *valence state* pada reaksi katodik (Ahmad, 2006).

Electromotive force (emf) *series* adalah peringkat kereaktifitasan logam. Tabel 2.5 menunjukkan *electromotive force series* untuk logam. Logam paling mulia berada pada peringkat atas dan memiliki potensial standard paling positif. Logam paling aktif berada pada peringkat paling bawah dan memiliki potensial standard paling negatif. Potensial untuk

hidrogen bernilai nol sesuai kesepakatan internasional. Semua potensial elektroda standard mengacu pada nilai *standard hydrogen electrode* (SHE).

Tabel 2.5 *Electromotive force series* (Davis, 1999)

Reaksi elektroda	Standard potensial at 25 °C (77 °F), V.SHE
$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Au}$	1,50
$\text{Pd}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pd}$	0,987
$\text{Hg}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Hg}$	0,854
$\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$	0,800
$\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- \rightarrow 2\text{Hg}$	0,789
$\text{Cu}^+ + e^- \rightarrow \text{Cu}$	0,521
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$	0,337
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$	0,000 (<i>Reference</i>)
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,126
$\text{Sn} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,136
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250
$\text{Co}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Co}$	-0,277
$\text{Ti}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Ti}$	-0,336
$\text{In}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{In}$	-0,342
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,403
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,440
$\text{Ga}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Ga}$	-0,53
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,74
$\text{Cr}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,91
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,763
$\text{Mn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mn}$	-1,18
$\text{Zr}^{4+} + 4e^- \rightarrow \text{Zr}$	-1,53
$\text{Ti}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ti}$	-1,63
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Al}$	-1,66
$\text{Hf}^{4+} + 4e^- \rightarrow \text{Hf}$	-1,70

$U^{3+} + 3e^- \rightarrow U$	-1,80
$Be^{2+} + 2e^- \rightarrow Be$	-1,85
$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$	-2,37
$Na^+ + e^- \rightarrow Na$	-2,71
$Ca^{2+} + 2e^- \rightarrow Ca$	-2,87
$K^+ + e^- \rightarrow K$	-2,93
$Li^+ + e^- \rightarrow Li$	-3,05

Logam paling atas lebih tahan terhadap korosi dan cenderung menjadi daerah oksidasi. Kemampuan oksidasi di dalam larutan harus lebih besar daripada logam aktif, sebagai contoh natrium, magnesium, dan aluminium. Potensial oksidasi yang tinggi dibutuhkan untuk mengkorosikan besi dan nikel. Potensial yang lebih tinggi lagi dibutuhkan untuk mengkorosikan tembaga, dan potensial yang sangat tinggi lagi digunakan untuk mengkorosikan platina dan emas. Sehingga, reaktifitas logam sangat berperan penting dalam pembentukan korosi (Davis, 1999).

2.7 FAKTOR-FAKTOR MEDIA AIR YANG BERPENGARUH TERHADAP LAJU KOROSI

Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap laju korosi di lingkungan air adalah komposisi, pH, temperatur, kecepatan, dan organisme biologi. Lingkungan air sendiri dibagi menjadi dua, yaitu air tawar dan air laut (Craig, dkk., 2006).

2.7.1 Komposisi Air

Perbedaan komposisi air bergantung pada bahan dan kontaminan yang dibawa oleh hujan/ tanah di sekitarnya dan polutan yang dibuang ke saluran air. Senyawa-senyawa korosif yang paling berpengaruh secara umum adalah gas dan garam terlarut, serta beberapa senyawa tambahan yang didapat dari polutan.

Gas terlarut yang memengaruhi korosifitas di perairan adalah oksigen dan belerang. Oksigen adalah senyawa yang sering dijumpai, karena dapat meningkatkan laju korosi hampir di semua logam. Konsentrasi oksigen terbesar terdapat pada permukaan air dan algae.

Sedangkan ion-ion dari garam terlarut yang dapat meningkatkan korosifitas adalah klorida dan sulfat. Ion-ion ini akan bereaksi dengan kation logam membentuk korosi. Sedangkan kalsium dan magnesium menentukan kesadahan air. Tabel 2.6 memperlihatkan komposisi dan Tabel 2.7 memeperlihatkan karakteristik perairan alami (*natural water*) secara umum. Pengukuran resistifitas elektrik air memberikan indikasi umum terhadap korosifitas.

Tabel 2.6 Anion dan Kation yang terdapat di perairan alami (Nikanorov & Brazhnikova, 2010)

KATION	ANION
Na ⁺	SO ₄ ²⁻
Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻
K ⁺	Cl ⁻
Ca ²⁺	CO ₃ ²⁻

Tabel 2.7 Analisa *tipe-tipe* perairan alami (Craig, dkk., 2006)

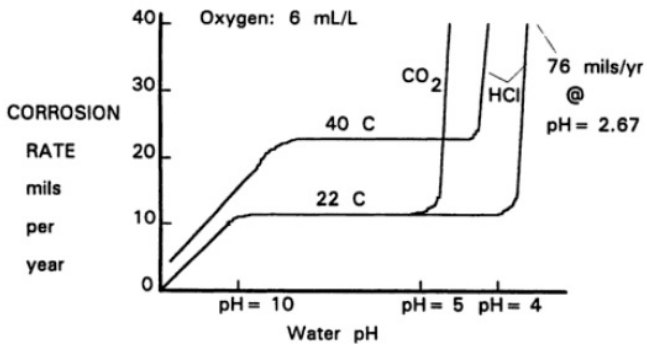
DESKRIPSI	A	B	C	D	E	F	G
Kadar pH	6,3	6,8	7,4	7,5	7,1	8,3	7,1
Klorida (ppm)	5	11	24	21	4	94	149
Sulfat (ppm)	6	20	39	50	17	109	463
Total <i>hardness</i> (ppm)	10	53	120	230	340	70	559
Total padatan yang terlarut (ppm)	33	88	185	332	400	620	1670

A = *very soft like water*

- B = moderately soft surface water
- C = slightly hard river water
- D = moderately hard river water
- E = hard borehole water
- F = slightly hard brohole water with bicarbonate ions
- G = very hard groundwater

2.7.2 Nilai pH

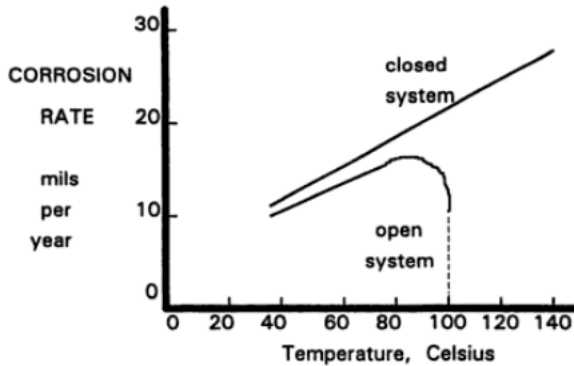
Nilai pH baik di perairan alami maupun air laut berkisar 4,5 – 8,5. Berikut pengaruh pH terhadap laju korosi pada baja karbon yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pengaruh pH terhadap korosi baja karbon (Schweitzer, 1996)

2.7.3 Temperatur

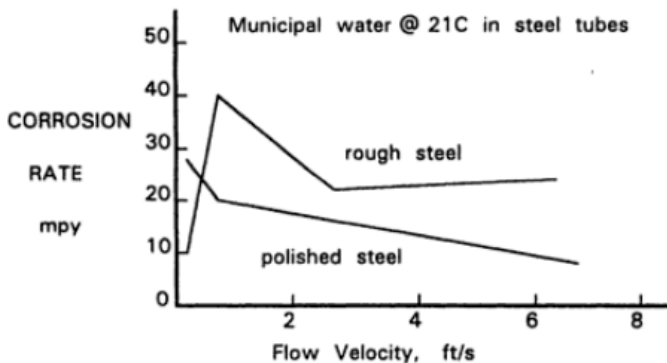
Sama halnya di daratan, temperatur tinggi akan meningkatkan laju korosi. Meningkatnya temperatur akan menurunkan tingkat kelarutan oksigen di dalam air, seperti pada Gambar 2.19 dan 2.10.



Gambar 2.9 Pengaruh temperatur pada korosi besi di dalam air yang mengandung oksigen terlarut (*oxygen dissolved*) (Schweitzer, 1996)

2.7.4 Kecepatan dan Agitasi Air

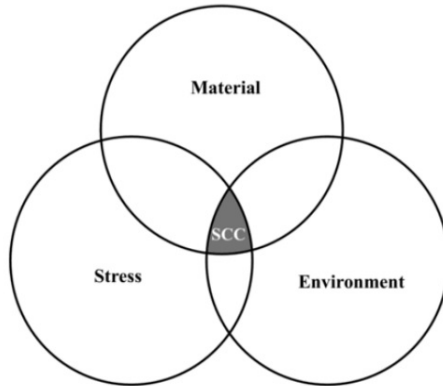
Kecepatan dan agitasi air akan meningkatkan atau menurunkan laju korosi bergantung pada jenis logam. Sebagian besar logam memiliki batas kecepatan aliran air sehingga korosi akan muncul secara signifikan. Pada Gambar 2.10 memperlihatkan pengaruh kecepatan aliran air terhadap korosi pada baja.



Gambar 2.10 Pengaruh kecepatan aliran air pada korosi baja. Pada awalnya, peningkatan oksigen akan meningkatkan korosi, kemudian terjadi passivasi oksigen yang menurunkan korosi (Schweitzer, 1996)

2.8 STRESS CORROSION CRACKING

Stress corrosion cracking (SCC) adalah istilah yang digunakan untuk menjelaskan kegagalan material yang perambatan retak-nya (*crack propagation*) dipicu oleh lingkungan. *Crack propagation* yang terjadi merupakan interaksi antara tegangan mekanik dan reaksi korosi [Jones, 1992]. Untuk material tertentu, keberadaan SCC bergantung pada lingkungan yang agresif dan tegangan (*stress*), khususnya tegangan tensile [Fu & Cheng, 2010]. Banyak macam-macam faktor yang dapat memicu SCC seperti, aspek metalurgi dari baja (komposisi kimia, grade, mikrostruktur, perlakuan panas, unsur paduan, unsur pengotor, dan pengelasan), parameter lingkungan (unsur tanah, konduktivitas, siklus musim *dry-wet*, temperatur, kelembaban, CO₂ dan kondisinya, dan mikroorganisme), *coatings* dan CP (*tipe*, sifat, mode kegagalan, kesesuaian coating dengan CP, dan potensial/arus CP), kondisi *stressing* (tekanan, fluktuasi tekanan, tegangan sisa, *longitudinal stress*, dan konsentrasi *local stress-strain*), dan reaksi korosi (pit korosi, ukuran pit, hidrogen, passifasi, dan pembentukan lapisan pasif, *active dissolution*, transport massa) [Parkins, 2000]. Secara garis besar, SCC disebabkan oleh tiga faktor yang ditunjukkan pada Gambar 2.11, yaitu material, lingkungan, dan *tensile stress*.

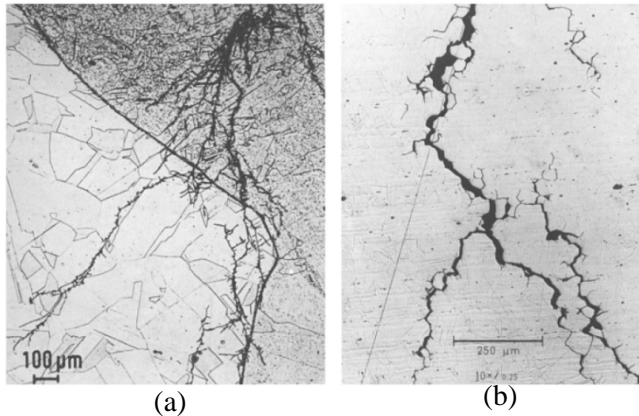


Gambar 2.11 Tiga faktor utama penyebab *stress corrosion cracking* (SCC) (Cheng, 2013)

Tegangan yang menyebabkan SCC berasal dari tegangan sisa (*residual stress*) hasil proses manufaktur seperti pengelasan atau *bending*. Terjadinya SCC hanya membutuhkan *stress* yang relatif kecil, biasanya di bawah *macroscopic yield strength* logam. Bagaimanapun, konsentrasi tegangan akan meningkat secara lokal sejak adanya inisiasi *crack* di permukaan yang sudah ada atau baru terbentuk akibat korosi, operasi, atau proses lainnya.

Lingkungan yang menyebabkan SCC biasanya *aqueous* dan yang dapat mengondensat lapisan dengan *moisture* atau *bulk solution*. *Cracking* terjadi secara tidak normal ketika laju korosi meningkat secara signifikan, menginisiasi *stress corrosion crack*, dan akhirnya menjalar ditambah dengan adanya reaksi korosi. Secara umum, SCC terjadi ketika interaksi antara logam dan lingkungan merusak lapisan pasif pada permukaan logam [Jones, 1992].

Ada dua tipe SCC pada logam, yaitu intergranular dan transgranular. *Intergranular crack* tumbuh mengikuti batas butir, sedangkan *transgranular crack* tumbuh memotong batas butir yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 *Branching crack* pada SCC, (a) transgranular dan (b) intergranular (ASM Metals Handbook Vol. 11)

SCC merupakan proses yang tidak bisa dihindari. Tapi, tidak semua interaksi antara logam dan lingkungannya menimbulkan SCC. Ada persyaratan khusus terkait hubungan logam dan lingkungan agar terjadi SCC. Salah satunya adalah karbon di lingkungan passivasi.

Karbon dan baja karbon di lingkungan yang membentuk lapisan pasif atau lapisan oksida dapat mengalami SCC, termasuk di lingkungan *caustic solutions*, fosfat, nitrat, karbonat, dan air dengan temperatur tinggi [Brown, 1972].

Komposisi paduan, mikrostruktur, perlakuan panas, dan segregasi batas butir memengaruhi perilaku SCC pada logam. *Biasanya stress corrosion crack* terbentuk akibat *metallurgical defect*, yang nantinya juga akan memengaruhi mekanisme dan kinetik perambatan retak (*propagation crack*). Berikut beberapa aspek metalurgi yang memengaruhi SCC :

1. Pengaruh kekuatan material

Sebenarnya, ada beberapa aturan umum yang mengatur pengaruh kekuatan material terhadap SCC

[UK National Physical Laboratory, 1982]. Sebagai contoh pada *hydrogen embrittlement*, material dengan kekuatan tinggi akan semakin rentan. Namun, SCC juga mudah terjadi pada *lower-strength material* jika *plastic strain* pada ujung retak (*crack tip*) sudah terbentuk

2. Pengaruh komposisi paduan

Perbedaan yang sangat kecil terhadap komposisi paduan dapat memengaruhi perilaku SCC [UK National Physical Laboratory, 1982]. Penambahan paduan tidak selalu sama di tiap lingkungan. Sebagai contoh, kadar molibdenum yang tinggi meningkatkan resistansi *low-alloy steel* terhadap SCC di lingkungan karbonat-bikarbonat, tetapi lebih rentan terhadap *caustic cracking* [UK National Physical Laboratory, 1982].

3. Pengaruh perlakuan panas

Perbedaan perlakuan panas dapat memengaruhi sensitifitas material, mode kegagalan, bahkan mekanisme kegagalan SCC. *Austenitic stainless steel* akan mengalami transgranular SCC di lingkungan klorida. [Alyousif and Nishimura, 2008].

4. Segregasi batas butir (*grain boundary segregation*)

Segregasi karbon dan/atau nitrogen di batas butir berpengaruh dalam pembentukan SCC baja karbon. Kira-kira dibutuhkan 0,1% karbon agar SCC dapat terjadi di lingkungan nitrat atau *caustic* [Parkins, 1990]. Sebenarnya, *impurities* pada batas butir juga menimbulkan intergranular SCC pada *iron-based alloy*, *austenitic stainless steel*, dan *nickel-based alloy*. Besarnya bergantung pada potensial

elektrokimia, korosifitas, lingkungan, dan tipe, bentuk, dan konsentrasi *impurities* pada batas butir. Meskipun unsur substitusional di batas butir sangat memengaruhi SCC baja, hal ini tidak serta-merta terjadi di semua potensial atau lingkungan. Sebagai contoh, segregasi fosfor membentuk intergranular SCC pada *low-alloy steel* di lingkungan *caustic* atau air dengan potensial oksida [Burstein and Woodward, 1981; Bandyopadhyay and Briant, 1983]. Namun, dengan potensial rendah, fosfor tidak menyebabkan SCC di lingkungan *caustic* [Bandyopadhyay and Briant, 1983] dan sedikit berpengaruh di lingkungan karbonat-bikarbonat [Stenzel dkk., 1986]. (Cheng, 2013)

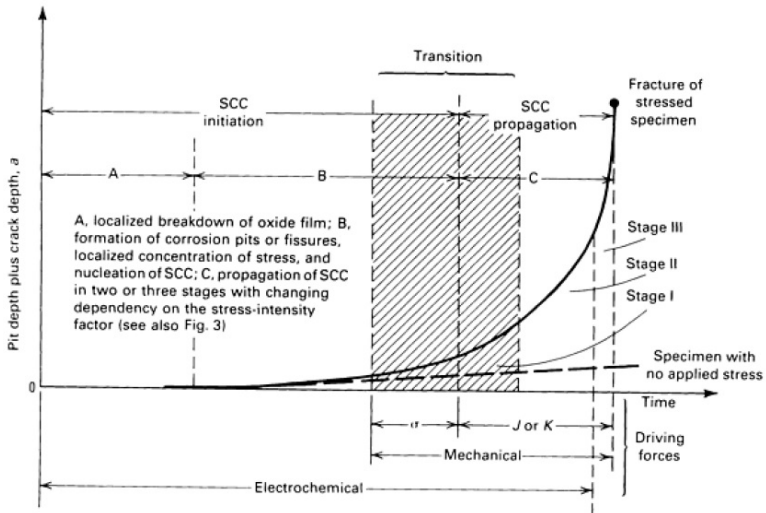
Berikut Tabel 2.8 yang menunjukkan hubungan antara baja karbon dan lingkungan yang rentan menimbulkan SCC.

Tabel 2.8 Lingkungan-Baja karbon yang menimbulkan SCC (Stansburry & Buchanan, 2000)

LINGKUNGAN	BAJA KARBON
Amina, <i>aqueous</i>	√
Ammonia, <i>anhydrous</i>	√
Ammonia, <i>aqueous</i>	-
Bromida	-
Karbonat, <i>aqueous</i>	√
Karbon monoksida, karbon dioksida, campuran air	√
Klorida, <i>aqueous</i> , mendidih	-
Klorida, kering, panas	-
Pelarut klorinasi	-
Sianida, <i>aqueous</i> , <i>acidified</i>	-
Fluorida, <i>aqueous</i>	√

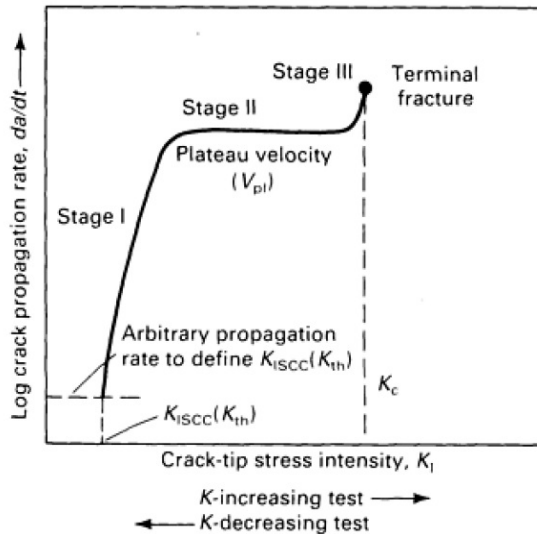
Asam hidroklorit	-
Asam hidroflorin	-
Hidroksida, <i>aqueous</i>	√
Hidriksida, terkonsentrasi, panas	-
Methanol, ditambah halida	-
Nitrat, <i>aqueous</i>	√
Asam nitrit, terkonsentrasi	-
Asam nitrit, <i>fuming</i>	-
Nitrit, <i>aqueous</i>	-
Nitrogen tetroksida	-
<i>Plythionic acid</i>	-
<i>Steam</i>	-
Sulfida ditambah klorida, <i>aqueous</i>	-
Asam sulfurus	-
Air, kemurnian tinggi, panas	-

Mekanisme terjadinya SCC telah banyak dipelajari, namun, masih belum ada model yang pasti, salah satunya diperlihatkan pada ilustrasi Gambar 2.13. Terdapat *gradual transition* dari *localized corrosion* untuk menginisiasi *crack* dan tumbuh tanpa tahapan pemisahan, atau terdapat inisiasi atau pertumbuhan *crack* yang pendek namun terus berulang. Di beberapa kejadian, dari sudut pandang *engineer*, hipotesis ini sesuai bahwa mekanisme terdiri dari dua tahap : inisiasi dan perambatan.



Gambar 2.13 Pengaruh faktor elektrokimia dan mekanik relatif terhadap terjadinya korosi dan SCC (ASM Metals Handbook Volume 13)

Gambar 2.14 mengindikasikan adanya perubahan mekanisme SCC. *Stress* yang diabaikan pada awalnya akan menjadi dominan dalam memengaruhi *cracking*. Lingkungan akan selalu terlibat, meskipun hanya berpengaruh di awal saja. Adanya cacat mekanik atau *crack* pada logam yang sudah memiliki *stress* mengubah tahap inisiasi menjadi perambatan. Kemudian, kegagalan secara mekanik terjadi berdasarkan *stress intensity factor* (J untuk *elastic-plastic fracture mechanics*; K untuk *linear elastic fracture mechanics*) sebagai *driving force* untuk perambatan retak SCC yang diilustrasikan pada Gambar 2.13 dan 2.14 (ASM Metals Handbook Volume 13).



Gambar 2.14 Pengaruh *stress intensity factor* terhadap kinetik SCC (ASM Metals Handbook Volume 13)

2.9 STRAIN MEASUREMENT

Menurut ASME Boiker and Pressure Vessel Code (BPVC) Section I, paduan *austenitic steel* yang menahan tekanan selama pengerjaan dingin harus diberi perlakuan panas selama 20 menit per $\frac{1}{8}$ -inch ketebalan atau selama 10 menit, atau lebih tinggi lagi bergantung temperatur tertentu pada kondisi berikut :

1. Temperatur akhir proses pembentukan di bawah temperatur heat-treating tertentu
2. Temperatur desain logam dan regangan saat pembentukan melebihi batas yang telah ditentukan, maka regangan harus dihitung dengan rumus di bawah (untuk tube dan *pipe bends*) :

$$\%Strain = \frac{100r}{R} \quad (2.6)$$

Dimana

$R = \text{nominal bending radius to centerline of pipe}$
atau *tube*

$r = \text{nominal radius after forming}$

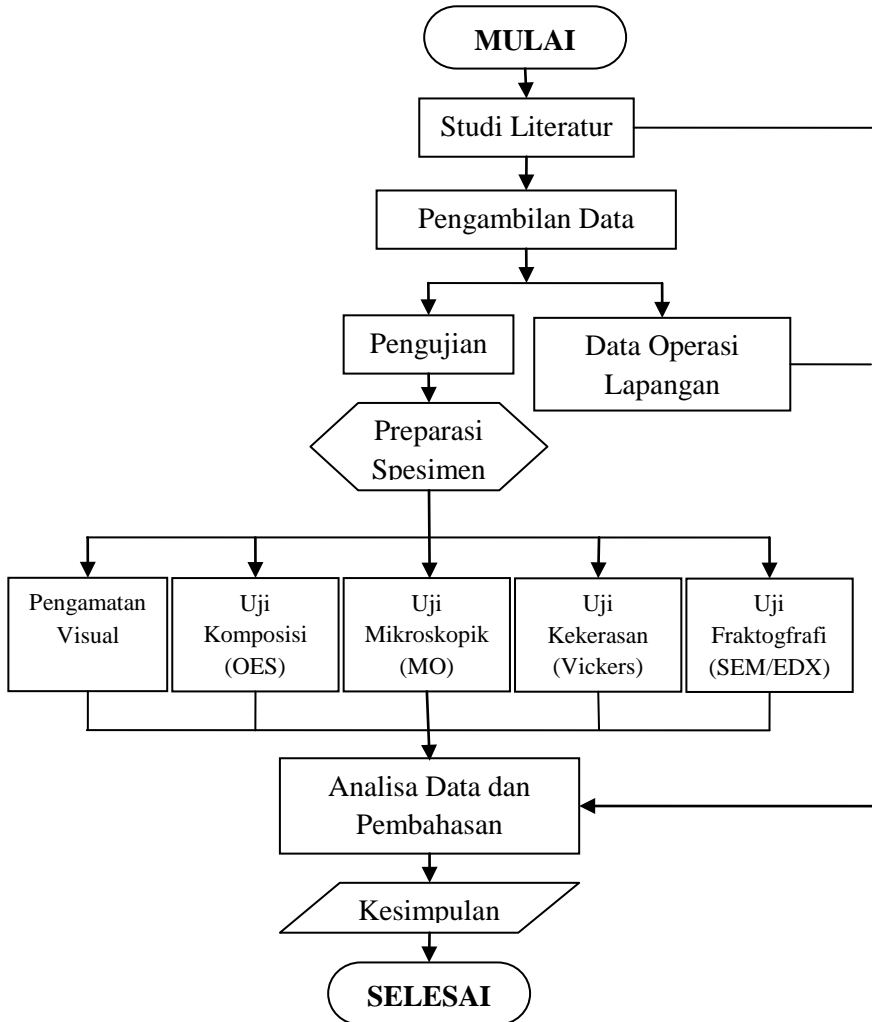
2.10 PENELITIAN SEBELUMNYA

1. Lu, dkk. (2011) dalam penelitiannya menemukan bahwa pertumbuhan *crack* sangat bergantung pada *stress intensity factor*. *Single-cycle overloading* memperlambat periode pertumbuhan *crack*. Penurunan potensial elektroda juga menghambat pertumbuhan *crack* walaupun tidak signifikan.
2. Lu, dkk. (2008) mempelajari pengaruh *loading pattern* dan temperatur pada perilaku SCC. *Crack growth rate* (CGR) bergantung pada waktu *holding* dan waktu *unloading* dan *reloading*. Ditemukan juga bahwa pertumbuhan *crack* teraktifasi secara *thermal*; namun energi aktifasi yang nampak tidak stabil, tapi semakin tinggi ketika *crack* tumbuh. Pengaruh *yield strenght* pada CGR lebih signifikan pada temperatur rendah dan aktifasi energi CGR menurun dengan meningkatnya *yield strength*.
3. Javidi & Horeh (2014) menemukan bahwa mekanisme SCC dipengaruhi oleh pH. Pada pH mendekati netral, mekanisme yang terjadi adalah *anodic dissolution* pada *crack tip*. Sedangkan pada pH yang tinggi, mekanisme berbasis hidrogen terjadi lebih dominan. Sehingga masing-masing *crack* memiliki morfologi yang berbeda.
4. Hou, et. al (2011) dalam penelitiannya menemukan bahwa SCC juga dipicu oleh arah konsentrasi regangan yang didapat dari hasil *cold working*. Selain itu, batas butir mikrostruktur material juga menjadi salah satu faktor yang perlu diperhatikan.

5. Vidojkovic, dkk. (2013) mengemukakan beberapa aspek penting terkait kualitas *feedwater* pada *thermal power plant*. Hal ini bertujuan sebagai tindak pencegahan dan meminimalisasi reaksi korosi. Hasil menunjukkan bahwa kelebihan kandungan oksigen, silika, natrium, klorida, sulfat, tembaga, dan konduktifitas memengaruhi laju korosi. Sehingga dibutuhkan perlakuan khusus untuk menjaga kualitas *feedwater*.
6. Wang, dkk. (2013) dalam penelitiannya menemukan morfologi transgranular di lingkungan pH rendah. Bersatunya *microcrack* dan tingginya *dissolution* memicu butiran ferrite menghasilkan *driving force* yang tinggi. Sedangkan morfologi intergranular pada lingkungan pH yang tinggi disebabkan adanya *driving force* yang lebih tinggi lagi untuk memecah pasivasi pada batas butir ferrite dengan kecepatan tinggi.
7. Lu, dkk., (2014) menemukan bahwa *slip bands* yang terjadi akibat *cold working* cenderung memiliki morfologi transgranular.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, studi literatur, dan penelitian di laboratorium. Studi lapangan mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalannya dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu, di PT. Petrokimia Gresik. Studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal penelitian terbaru, dan situs industri yang mempelajari permasalahan analisa kegagalan pada u-tube economizer boiler. Sedangkan penelitian di laboratorium mengacu pada pengujian-pengujian yang akan mendukung dalam proses menganalisa. Pengujian yang dilakukan antara lain, uji komposisi, metallografi, uji kekerasan, dan uji fraktografi.

3.3 BAHAN PENELITIAN

Material yang digunakan dalam penelitian ini merupakan u-tube economizer, yaitu SA210-A1.

Tabel 3.1 Komposisi u-tube economizer berdasarkan ASTM A210

Unsur	Komposisi, %
Karbon*, max	0,27
Mangan	0,93
Fosfor, max	0,035
Sulfur, max	0,035
Silicon, min	0,10

*Untuk setiap pengurangan 0,01% karbon dibawah nilai maksimumnya, akan meningkatkan 0,06% mangan hingga 1,35% di atas nilai maksimumnya

Tabel 3.2 Sifat mekanik SA210-A1 berdasarkan ASTM A210

Sifat Mekanik	Nilai
Kekuatan tensile, min, ksi [Mpa]	60 [415]

Kekuatan yield, min, ksi [Mpa]	37 [255]
Elongation in 2 in atau 50 mm, min, %	30



(a)



(b)

Gambar 3.2 (a) Tube baru dan (b) tube gagal

3.4 ALAT-ALAT PENELITIAN

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain :

1. Penggaris

2. Kamera digital
3. Alat pemotong
4. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)
5. Mikroskop optik
6. Mesin grinding dan polishing
7. Resin
8. Kertas gosok dari grade 80 - 2000
9. Larutan etsa
10. Mesin uji kekerasan
11. Mesin SEM (*Scanning Electron Microscope*)

3.5 TAHAPAN PENELITIAN

3.5.1 Data Operasional Lapangan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data-data perusahaan yang mendukung penelitian. Data-data yang diambil antara lain :

1. Spesifikasi boiler
2. Desain economizer
3. Data operasi
4. Spesifikasi material

3.5.2 Preparasi Spesimen

Pertama-tama, sampel spesimen diambil dari dua u-tube, yaitu u-tube yang mengalami kegagalan dan yang masih baru. Karena dimensi yang terlalu besar, maka diperlukan proses pemotongan untuk mendapatkan bagian yang ingin diteliti. Proses pemotongan ini dilakukan dengan menggunakan gergaji, gerinda tangan, dan *cutting wheel*.

a. Pengamatan Visual

Pengamatan visual (pengamatan makroskopik) dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro (kasat mata).

Pengamatan ini dilakukan dengan dua bantuan alat, yaitu kamera digital *Canon 60D* dan mikroskop stereo *Stemi DV 4*.

Pengamatan visual dilakukan pada komponen berikut :

1. Fotografi terhadap komponen yang mengalami kegagalan
2. Pengamatan melalui mikroskop stereo dilakukan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan profil makronya.



(a)



(b)

Gambar 3.3 Pengamatan secara makro dilakukan dengan dua alat, yaitu, (a) mikroskop stereo *Stemi DV 4* dan (b) kamera digital *Canon 60D*

b. Pengujian Komposisi *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Identifikasi kimia dilakukan untuk mengetahui unsur apa saja yang terdapat pada komponen secara kuantitatif. Pada identifikasi komposisi kimia ini dilakukan dengan metode *Optical Emission Spectroscopy* (OES).



Gambar 3.4 *Shimadzu GVM - 514S*

Identifikasi kimia dilakukan pada dua material, yaitu sampel yang mengalami kegagalan dan yang masih baru. Sehingga dengan mengetahui bahwa dua material ini sama, proses menganalisa dengan cara membandingkan dua material ini dapat dilakukan. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *Shimadzu GVM - 514S*.

Sebelumnya, sampel tube yang melengkung terlebih dulu diratakan dengan menggunakan gerinda. Sehingga proses pengujian dapat dilakukan dengan akurat.

c. Pengujian Fraktografi SEM/EDX

Fraktografi dilakukan untuk mengetahui profil permukaan patahan dan perambatan retak secara mikro dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM) Inspect S50*. Selain itu, dengan menggunakan *Electron Dispersive X-Ray* juga dapat melihat unsur yang terdapat tepat pada daerah yang mengalami kegagalan.



Gambar 3.5 *Scanning Electron Microscope (SEM) Inspect S50*

Sebelum dilakukan pengujian ini, sampel material dibersihkan terlebih dahulu dengan metode blowing untuk menghindari adanya kotoran-kotoran yang menempel, seperti oli, debu, keringat, dan lain sebagainya.

d. Pengujian Mikroskopik Mikroskop Optik

Pada pengamatan mikroskopik dengan mikroskop optik dilakukan untuk menganalisa fasa, bentuk, dan ukuran strukturmikro. Hal ini digunakan untuk mengetahui proses manufaktur yang terjadi pada material tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*.

Pada pengujian metallografi dibagi menjadi dua tahap, yaitu :

1. Tahap persiapan
 - *Mounting* : Membuat cetakan pada spesimen dengan resin agar proses penggosokan menjadi lebih mudah

- *Grinding* : Menggosok spesimen dengan kertas gosok grade 80 – 2000 dan dialiri dengan air. Spesimen diputar 90° atau tegak lurus terhadap arah gosokan ketika pindah grade.
- *Polishing* : Memoles spesimen dengan pasta alumina di atas piringan yang berputar cepat. Proses ini akan menghasilkan permukaan yang mengkilat seperti cermin.
- *Etching* : Mencilup permukaan spesimen ke dalam larutan nital 2% (Alkohol 98% dan HNO₃ 2%)

2. Tahap pengamatan

- Tahap pengamatan dilakukan untuk mengamati struktur mikro spesimen dengan mikroskop optik dengan beberapa kali perbesaran.



Gambar 3.6 Mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*

e. Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode Vickers dimana dalam pengujiannya memakai indenter piramida intan, pembebanan sebesar 100 kg dan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian ini menggunakan

Universal Hardness Tester HBRV 187.5A di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Mterial dan Metalurgi, ITS.



Gambar 3.7 *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A*

Sebelumnya, sampel yang digunakan harus memiliki permukaan yang rata untuk meghindari cacat indentasi.

3.6 RANCANGAN PENELITIAN

Tabel 3.3 Rancangan penelitian

BAHAN	PENGUJIAN			
	OES	MO	Vickers	SEM/EDX
SA210-A1 baru	√	√	√	-
SA210-A1 gagal	√	√	√	√

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 ANALISA DATA

4.1.1 Data Operasi Lapangan

Economizer B-1102 terletak di Unit Utilitas/ Service Unit Pabrik 1. Berfungsi untuk memansakan air dengan menggunakan gas buang dari superheater boiler. Bahan bakar yang digunakan adalah gas alam.

Economizer B-1102 beroperasi pada tahun 2008, namun sejak tahun 2011 mulai mengalami kegagalan berupa kebocoran pada u-bend dengan frekuensi yang diperlihatkan pada Tabel 4.1. Dan beberapa kejadian kebocoran yang terjadi pada Gambar 4.1 :

Tabel 4.1 Data statistik kebocoran yang terjadi pada economizer

No	Tanggal	Deskripsi Kebocoran
1	19 Maret 2011	Bocor 1 ea, semuanya pada sisi dalam u-bend
2	19 April 2012	Bocor 4 ea, semuanya pada sisi dalam u-bend
3	11 Juni 2012	Bocor 8 ea, 6 bocor pada sisi dalam u-bend, 2 ea pada lasan
4	1 Januari 2013	Bocor 5 ea, 3ea bocor pada sisi dalam u-bend, 2 ea pada lasan



(a)



(b)

Gambar 4.1 Kebocoran yang terjadi pada u-tube economizer

Berikut data-data economizer mencakup spesifikasi tube, desain economizer, operasi, dan dimensi u-tube yang diperlihatkan pada Tabel 4.2, Gambar 4.2, Gambar 4.3, dan Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data operasi pada economizer

<i>Description</i>	<i>Shell side (Gas)</i>	<i>Tube side (Water)</i>
<i>Design Pressure</i>	250 mmAq	75 kg/cm ² q
<i>Operating Pressure at M.C.R. 100%</i>	54 mmAq	57 kg/cm ² q
<i>Design Temperature</i>	350 °C	350 °C
<i>Operating Temperature at M.C.R. 100% (inlet/outlet)</i>	369,9/ 167,5 °C	110 / 173,9 °C
<i>Flow Rate at M.C.R. 100%</i>	125385 Nm ² /hr	120148 kg/hr
<i>Hydrostatic Pressure</i>	-	112,5 kg/cm ² q
<i>Heating Surface</i>	2873 m ²	

4.1.2 Analisa Komposisi Kimia

Tabel 4.4 Hasil pengujian *Optical Emission Spectroscopy*

UNSUR	C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Al	Mo	Ti
ASTM A210 (A1)	0,27 max	0,93 max	0,035 max	0,035 max	0,10 min	-	-	-	-	-
Tube Baru	0,149	0,606	0,010	0,00	0,198	0,035	0,00	0,009	0,009	0,002
Tube Gagal	0,121	0,327	0,00	0,003	0,177	0,027	0,018	0,019	0,006	0,001

*Fe dalam kondisi seimbang

** wt%

Tabel 4.4 menunjukkan komposisi kimia pada sample uji. Berdasarkan hasil pengujian komposisi di atas, terdapat

perbedaan komposisi antara tube baru dan tube gagal. Beberapa tidak menunjukkan kesesuaian, yaitu, meningkatnya tembaga (Cu) dan sulfur (S) pada tube gagal.

Unsur-unsur yang lain mengalami penurunan, namun masih dalam batas maksimum yang diperbolehkan. Akan tetapi menurunnya kadar karbon akan memengaruhi kekuatan material (Wu, 2009).

Secara garis besar, komposisi ini memenuhi standar ASTM A210 yang sering digunakan sebagai komponen boiler.

4.1.3 Analisa Strain Measurement

Berdasarkan *ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section I*, regangan (*strain*) pada tube yang mengalami bending dapat dihitung. Sesuai dengan desain tube yang terdapat pada Tabel 4.6, diketahui regangan sebesar 33,33%. Hasil ini melebihi standar ASTM A210-A1, yaitu 30%.

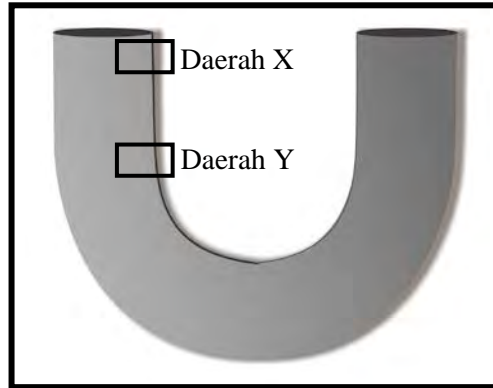
Tabel 4.5 Ukuran R dan r tube dalam perhitungan %*strain*
R (nominal bending radius **r (nominal outside radius**
to centerline of pipe or of pipe or tube), mm
tube), mm

19,05	57,15
-------	-------

4.1.4 Analisa Strukturmikro

Seamless u-tube dibuat dengan cara membengkokkan tube yang lurus atau disebut dengan *bending*. Proses *bending* akan memengaruhi bentuk dan ukuran struktur mikro.

Pengujian kali ini adalah melihat perbedaan strukturmikro antara tube gagal dan baru yang dibedakan menjadi daerah X dan Y seperti pada ilustrasi Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Ilustrasi pengambilan sample strukturmikro pada tube baru



(a)

Orientasi
butir acak



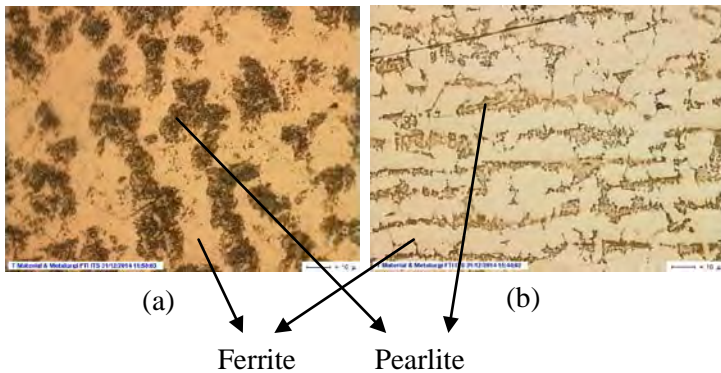
(b)
Orientasi
butir sejajar

Gambar 4.5 Perbandingan strukturmikro tube baru yang dibagi menjadi dua daerah, yaitu (a) daerah X dengan perbesaran 50× dan (b) daerah Y dengan perbesaran 50×

Berdasarkan Gambar 4.5 terdapat perbedaan bentuk dan ukuran mikrostruktur antara bagian tube yang tidak mengalami *bending* (lurus atau daerah X) dan mengalami *bending* (lengkungan atau daerah Y). Daerah X memiliki butiran yang heterogen dan ukurannya lebih kecil, serta orientasi mikrostruktur terlihat acak seperti pada Gambar 4.5a. Sedangkan di daerah Y memiliki butiran yang pipih dan memanjang, serta orientasinya sejajar seperti pada Gambar 4.5b.

Hal ini membuktikan bahwa proses *bending* memengaruhi bentuk dan ukuran mikrostruktur, yaitu terjadinya elongasi butir. Menurut Lu, dkk. (2011), arah orientasi butir yang terjadi seperti pada Gambar 4.5a merupakan hasil kombinasi dari *operating slip system* dan arah tegangan yang diberikan akibat pengerjaan mekanik.

Jika tube gagal dan tube baru dibandingkan di kedua daerah, maka akan terlihat pada Gambar 4.6 di bawah

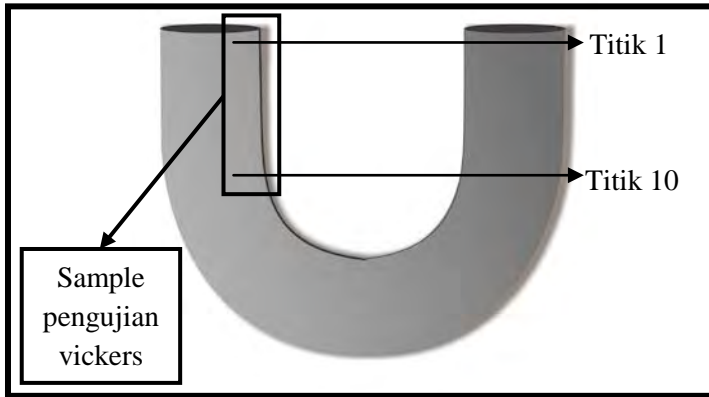


Gambar 4.6 Perbandingan strukturmikro tube baru dan tube gagal di daerah Y dengan perbesaran 500 \times . (a) Tube baru dan (b) tube gagal

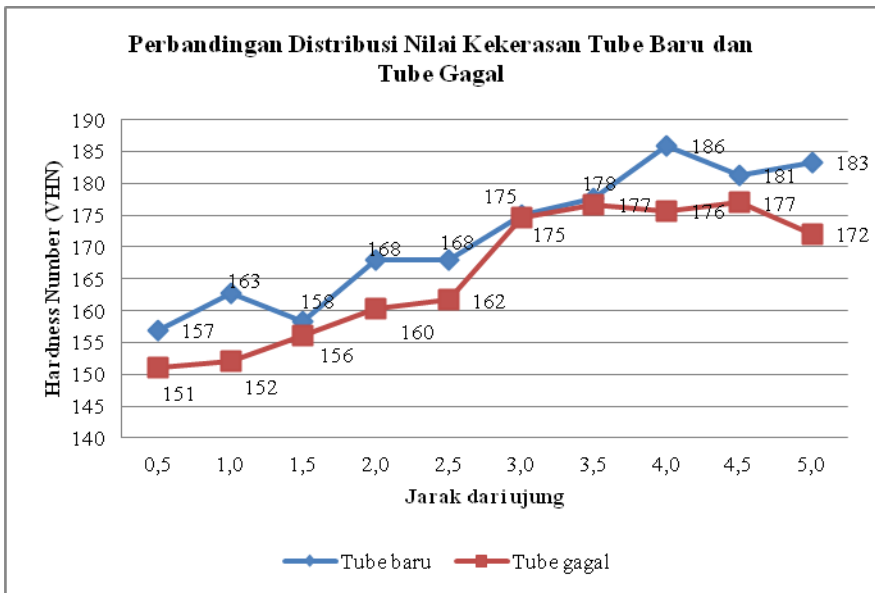
Pada Gambar 4.6 menunjukkan perubahan strukturmikro akibat kondisi operasi yang telah diberikan, yaitu temperatur dan tekanan. Namun keduanya menunjukkan fasa yang sama, yaitu ferrite (fasa terang) dan pearlite (fasa gelap) (Wang, dkk., 2013)

4.1.5 Analisa Nilai Kekerasan

Distribusi nilai kekerasan pada tube baru dan tube gagal dihitung dari tube lurus (titik 1) hingga hampir lengkungan tempat dimana perkiraan lokasi *crack* berada (titik 10) seperti pada ilustrasi Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Ilustrasi lokasi indentasi pengujian vickers pada tube baru



Gambar 4.8 Grafik distribusi nilai kekerasan tube baru dan tube gagal

Berdasarkan Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa nilai kekerasan tube mengalami tren peningkatan baik pada tube

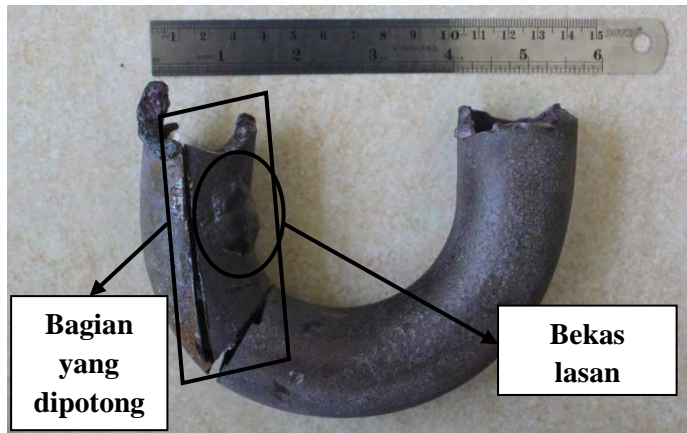
baru maupun gagal. Menurut Miyamoto, dkk. (2012), hal ini dikarenakan adanya efek *strain hardening* di bagian lengkungan tube. Selain itu, menurut Totten, dkk. (2002), peningkatan kekerasan juga dapat mengindikasikan adanya *residual stress*.

Menurut Hou, dkk. (2011) dan Lu, dkk. (2008), meningkatnya *residual stress* berarti juga meningkatkan *residual strain*, sehingga *yield strength* meningkat dan memicu laju regangan *crack tip* dan pertumbuhan *crack* yang lebih besar .

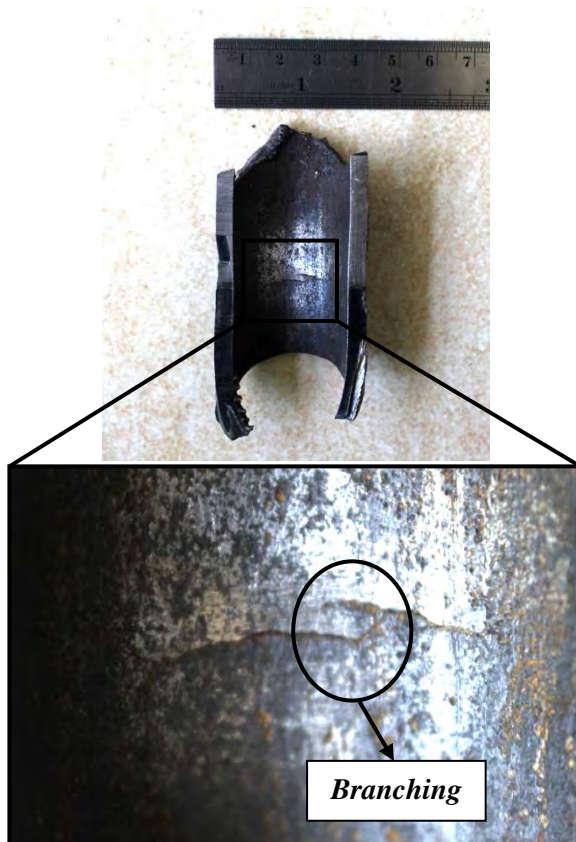
Nilai kekerasan tube gagal menurun jika dibandingkan dengan tube baru. Hal ini dikarenakan tube gagal mengalami penurunan kadar karbon yang mengakibatkan menurunnya sifat mekanik material. (Wu, 2009).

4.1.6 Analisa Fraktografi

Pengamatan secara makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi kegagalan yang terjadi. Lokasi kegagalan terletak pada lengkungan dalam tube, namun bentuk kegagalan tidak dapat diamati dari luar. Hal ini dikarenakan bagian yang mengalami kegagalan sudah dilas sebagai upaya penanggulangan oleh perusahaan. Sehingga tube harus dipotong secara melintang agar lokasi kegagalan dapat diketahui seperti terlihat pada Gambar 4.10 dan skema pemotongan tube diperlihatkan pada Gambar 4.9.

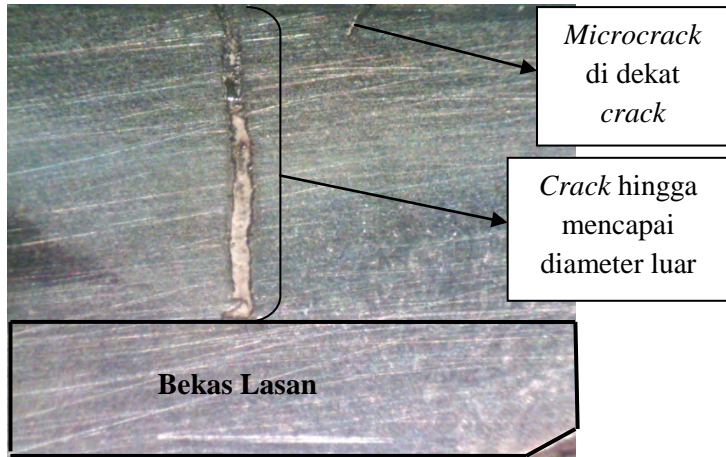


Gambar 4.9 Skema pengambilan sample pada tube yang gagal

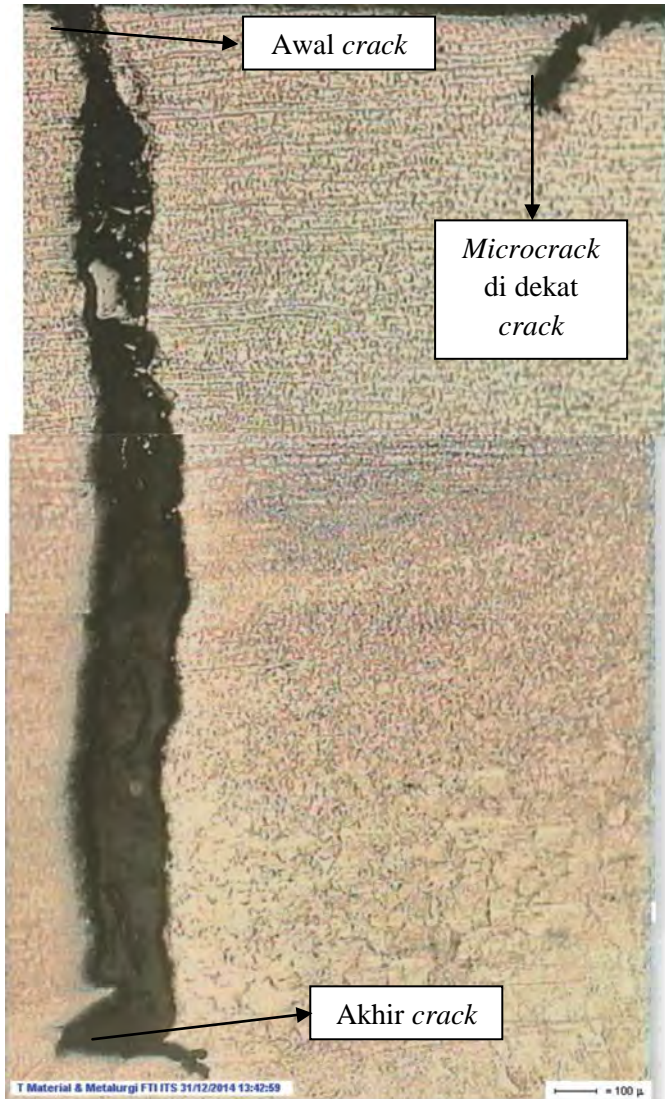


Gambar 4.10 Sample yang telah dipotong melintang memperlihatkan *crack* pada bagian dalam tube

Pada bagian yang gagal, tube dipotong secara melintang untuk melihat bentuk dan kedalamannya. Pengamatan ini diperjelas dengan menggunakan mikroskop stereo (Gambar 4.11) dan mikroskop optik (Gambar 4.12).



Gambar 4.11 Kedalaman *crack* yang dapat dilihat setelah dipotong melintang (tampak samping) dengan menggunakan miskroskop stereo



Gambar 4.12 Morfologi *crack* yang lebar memanjang hingga kedalaman diameter luar sehingga mengalami kebocoran

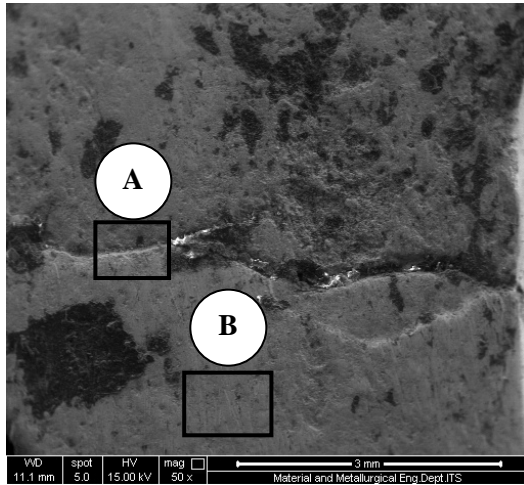
Pada Gambar 4.10 kegagalan berupa retak (*crack*) memiliki lebar hingga 1,7 cm (diamati dari dalam tube) dan terlihat *branching* pada permukaan. Pada Gambar 4.10 dan 4.11 menunjukkan adanya *microcrack* yang lain. Hal ini mengindikasikan kegagalan berasal dari *water-side tube* dan mencapai kedalaman diameter luar tube, sehingga tube mengalami kebocoran. Selain itu, pada Gambar 4.11 juga memperlihatkan morfologi rambatan *crack* yang lebar.

Karakteristik *crack* *branching* pada permukaan tube memperlihatkan pola intergranular, namun perambatan *crack* yang terjadi menunjukkan pola *transgranular* (Javidi & Horeh, 2014).

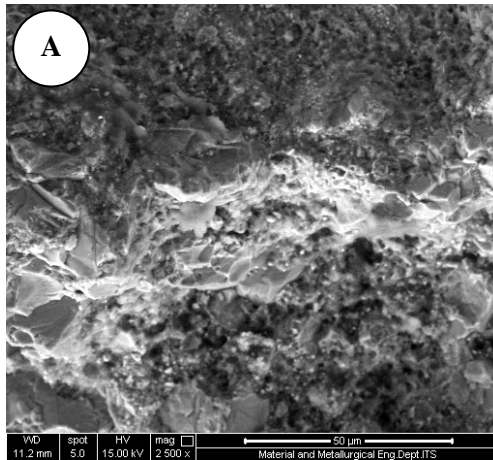
Menurut Wang, dkk. (2013), pola intergranular banyak terjadi di lingkungan pH tinggi. Namun, dalam penelitian Lu, dkk. (2014) menyebutkan bahwa, pola transgranular juga mudah terjadi pada material yang mengalami proses pengerjaan mekanik yang menimbulkan *residual stress* (*strain hardening*) dan mempermudah difusi antara Fe dan O.

4.1.7 Analisa EDX

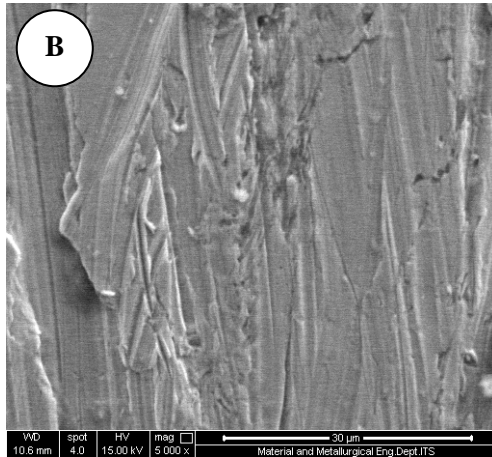
Untuk mengetahui unsur yang berpengaruh terhadap *cracking*, dilakukan pengujian EDX. Pengamatan ini dilakukan di dua daerah, yaitu daerah A dan B. Daerah A adalah *crack* dan daerah B bukan *crack*, seperti pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Dua daerah pada *crack* yang dianalisa dengan menggunakan EDX



Gambar 4.14 Topografi daerah A



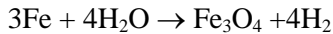
Gambar 4.15 Topografi daerah B

Tabel 4.6 Presentase unsur di daerah A dan B

UNSUR	%Wt	
	DAERAH A (Crack)	DAERAH B (Bukan crack)
C	21,28	10,88
O	29,78	10,21
Na	0,28	00,13
Mg	0,46	00,15
Al	1,36	00,38
Si	0,92	00,56
P	0,23	00,08
S	0,47	00,17
K	0,48	00,26
Ca	0,59	00,24
Ti	0,61	00,39
Cr	0,79	00,35
Mn	1,27	01,14
Fe	40,73	74,59
Cu	0,80	00,46

Dari hasil pengujian di atas, ada beberapa unsur tambahan sealain komposisi material yang teridentifikasi, yaitu Na, Mg, Ca, dan K. Keempat unsur tersebut merupakan kontaminan fluida air yang mengalir di dalam tube (Nikanorov & Brazhnikova, 2010). Sedangkan Cu merupakan deposit yang berasal dari degradasi material atau unsur tambahan dalam proses perlakuan air (Vidojkovic, dkk., 2013)

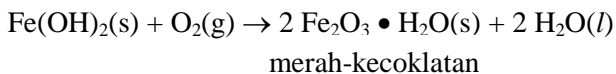
Menurut Vidojkovic, dkk. (2013), pada boiler akan terbentuk lapisan pelindung magnetite [Fe_3O_4] yang melapisi permukaan dalam tube. Di bawah kondisi normal, lapisan pelindung magnetite terbentuk akibat adanya reaksi antara baja (*iron based-alloy*) dan *deoxygenated water* (atau uap) mengikuti reaksi berikut :



Senyawa intermediate ferro hidroksida [$\text{Fe}(\text{OH})_2$] bertransformasi menjadi magnetite ketika mencapai temperatur di atas $100\text{ }^\circ\text{C}$ dengan mengikuti reaksi Schickor:



Banyaknya persentase O di daerah A (*crack*) yang ditunjukkan Tabel 4.5 mengindikasikan bahwa terjadi reaksi kimia antara Fe dan O yang membentuk senyawa. Sehingga menurut Nimmo & Hinds (2003), jika besi terus terpapar oksigen dan air, akan terbentuk besi(III) oksida yang berwarna merah-kecoklatan (Gambar 4.12), maka reaksi akhir seperti di bawah :





Gambar 4.16 Produk korosi Fe-H₂O yang berwarna merah-kecoklatan

Namun, jika dibandingkan antara kedua daerah tersebut, daerah A (*crack*) memiliki unsur O lebih tinggi daripada daerah B (bukan *crack*). Hal ini mengindikasikan bahwa korosi yang terjadi hanya sebagai pemicu laju perambatan retak.

4.2 PEMBAHASAN

4.2.1 Faktor-Faktor Penyebab Kegagalan

Secara visual, kegagalan ini memperlihatkan beberapa hal, yaitu :

1. Terdapat *branching* di permukaan *water-side tube*
2. Tidak terdapat *lateral corrosion* pada perambatan *crack* (potong melintang)
3. Morfologi *crack* yang lebar (potong melintang)

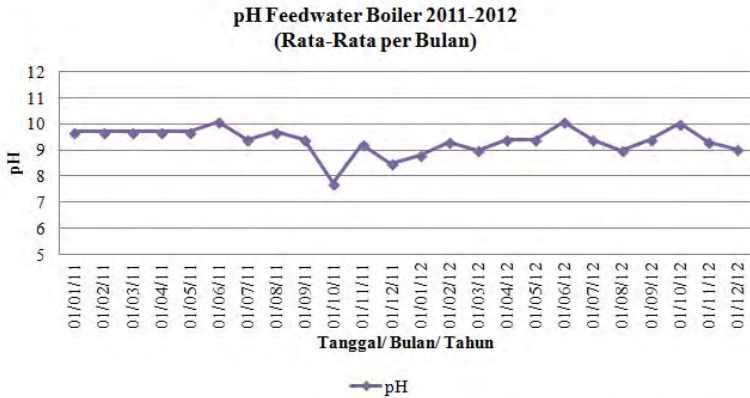
Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, faktor-faktor penyebab kegagalan dapat disederhanakan menjadi tiga aspek, yaitu tegangan, material, dan kondisi lingkungan yang digambarkan di skema Gambar 4.18.

Berdasarkan uji komposisi dengan menggunakan OES, tube sesuai dengan standard ASTM A-210. Namun, desain tube tidak memenuhi standar. *Strain measurement* pada *bend*

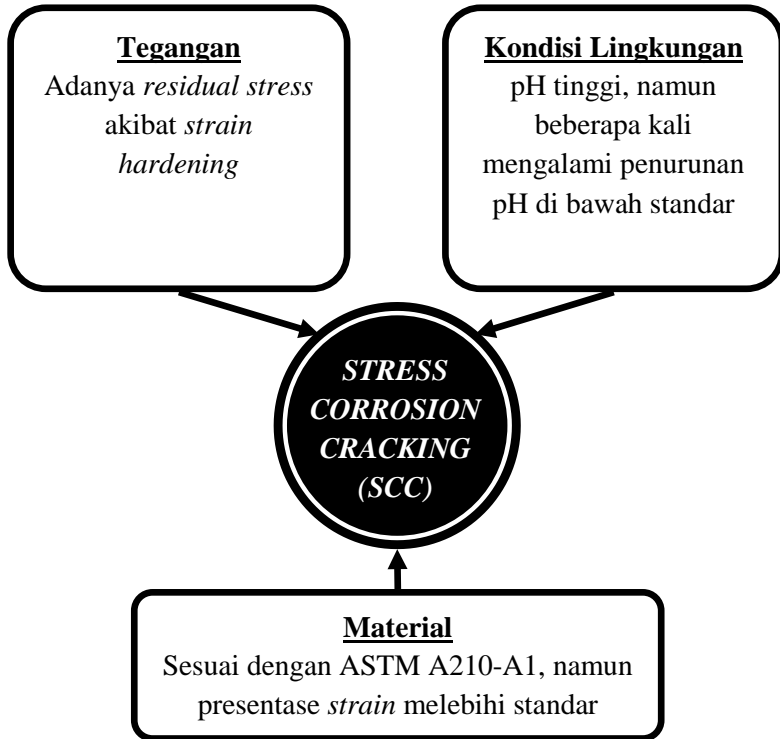
tube sebesar 33,33%, sedangkan maksimal *strain* adalah 30%.

Selain itu, berdasarkan analisa strukturmikro dan kekerasan, tube baru telah mengalami *strain hardening* pada bagian lengkungan tube. Hal ini dibuktikan dengan bentuk butiran yang pipih dan memanjang serta peningkatan nilai kekerasan pada lengkungan tube. Selain itu, meningkatnya nilai kekerasan juga mengindikasikan adanya *residual stress*.

Pengaruh lingkungan tidak begitu signifikan memengaruhi kegagalan ini. Karena temperatur, tekanan, dan kualitas air dijaga tetap di bawah batas maksimum. Namun, beberapa kali terjadi penurunan pH hingga 8,5, sedangkan pH yang diperbolehkan adalah 9,2 – 10,2 seperti pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Rata-rata pH feedwater boiler tahun 2011-2012



Gambar 4.18 Skema penyebab kegagalan *stress corrosion cracking*

Stress corrosion cracking (SCC) adalah kegagalan material yang terjadi akibat tiga faktor, yaitu *stress*, kondisi lingkungan, dan material. Tidak membutuhkan *stress* yang tinggi untuk terjadinya SCC. *Stress* sekecil apapun dapat memicu *crack* (Cheng, 2013). Baja karbon rendah rentan mengalami SCC di lingkungan air yang dikendalikan pada temperatur $\pm 100^{\circ}\text{C}$ dan pH tinggi.

Dari ketiga faktor di atas, faktor yang paling besar pengaruhnya terhadap kegagalan ini adanya pengaruh *strain hardening* terhadap timbulnya *residual stress* dan persentase regangan melebihi standar ASTM A210-A1 yang menjadi pemicu terjadinya SCC.

4.2.2 Mekanisme Kegagalan

Mekanisme terjadi SCC terdiri dari dua tahap, yaitu inisiasi dan perambatan retak (ASM Metals Handbook Vol. 13). Telah dijelaskan sebelumnya bahwa ada tiga faktor yang dapat menyebabkan SCC, yaitu *susceptible material*, *tensile stress*, dan *environment* (Cheng, 2013). Berikut Gambar 4.23 memperlihatkan mekanisme SCC yang terjadi pada u-tube economizer.

Tahap Inisiasi Retak

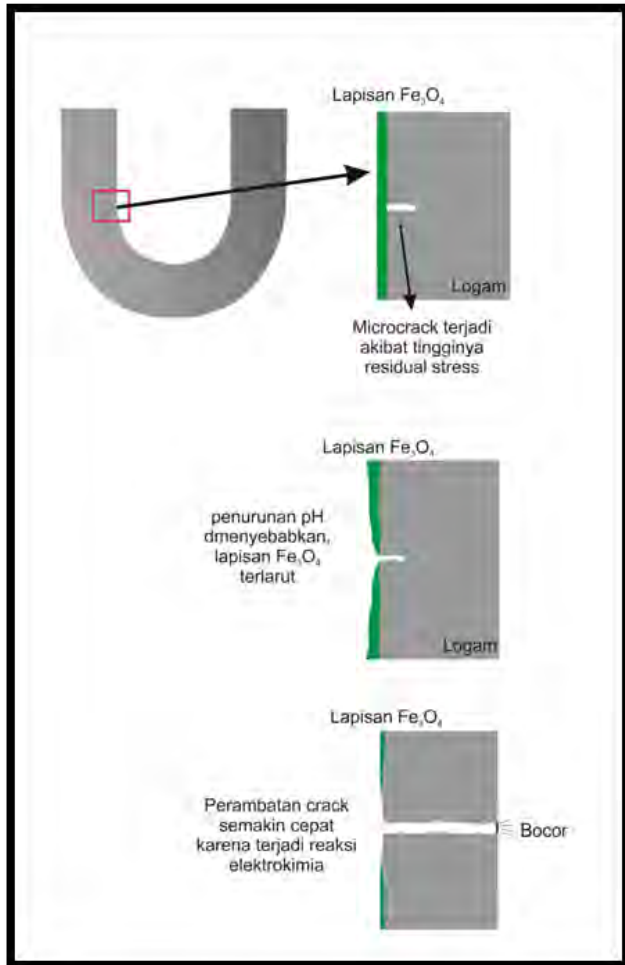
Di bawah kondisi normal operasi, lapisan pelindung magnetite [Fe_3O_4] terbentuk akibat reaksi antara baja (*iron based-alloy*) dan air deoksigenisasi (atau uap)

Microcrack terjadi akibat *residual stress* yang tinggi akibat *strain hardening*. Menurut Hou, dkk. (2011) dan Lu, dkk. (2008), meningkatnya *residual stress* berarti juga meningkatkan *residual strain*, sehingga *yield strength* meningkat dan memicu laju regangan *crack tip* dan pertumbuhan *crack* yang lebih besar .

Tahap Perambatan Retak

Lapisan pelindung magnetite yang semula kuat dan resistan terhadap fluktuasi temperatur, menjadi tidak mampu lagi melindungi logam akibat menurunnnya pH. Karena, penurunan pH dapat meningkatkan korosifitas dan melarutkan lapisan pelindung magnetite (Vidojkovic, dkk., 2013).

Perambatan *crack* ke dalam semakin cepat dikarenakan terjadinya reaksi elektrokimia antara Fe dan H_2O yang menghasilkan produk korosi [Fe_2O_3].



Gambar 4.19 Skema mekanisme terjadinya SCC

Menurut Wang, dkk (2013), korosi baja karbon rendah di lingkungan pH tinggi memiliki morfologi intergranular, akibat tingginya *driving force* dalam memecahkan lapisan pasif dan laju regangan yang tinggi pada batas butir.

Namun, pada penelitian ini, morfologi yang terbentuk adalah perpaduan antara intergranular dan transgranular (IG-

TG). Hal ini dikarenakan morfologi transgranular lebih mudah terjadi pada material *strain hardening* (Lu, dkk., 2014).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Faktor utama penyebab kegagalan *stress corrosion cracking* (SCC) pada u-tube SA210-A1 adalah adanya *residual stress* akibat *strain hardening* dan persentase regangan melebihi standar yang telah ditentukan.
2. Mekanisme terjadinya SCC dipicu dengan adanya regangan yang besar membentuk *microcrack* di permukaan tube. Lapisan pelindung magnetite [Fe_3O_4] yang semula resistan terhadap korosi, tidak mampu lagi melindungi karena terjadinya penurunan pH. Selain itu, reaksi elektrokimia anatar Fe dan H_2O mempercepat perambatan *crack* hingga menembus diameter luar tube.

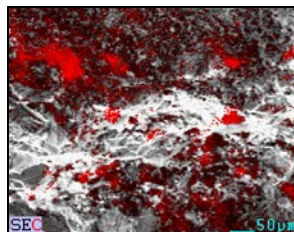
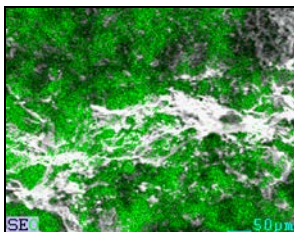
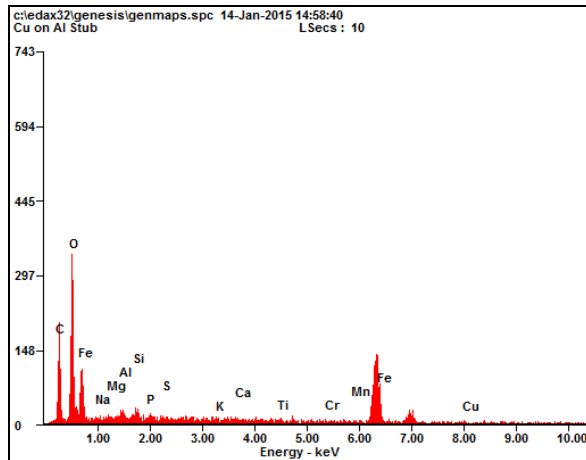
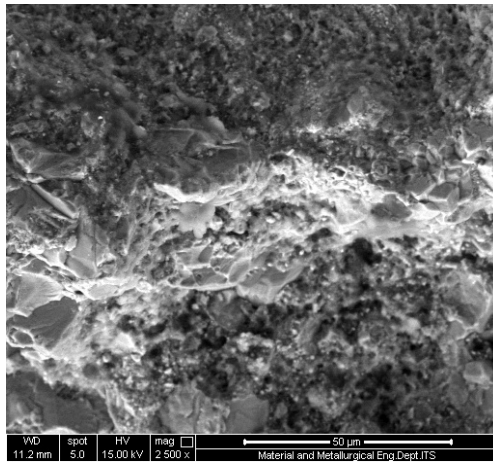
5.2 SARAN

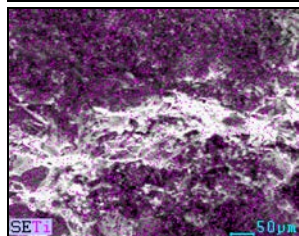
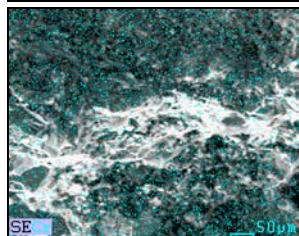
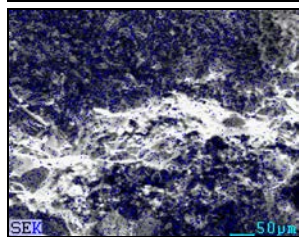
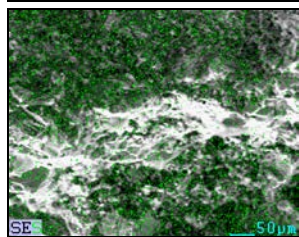
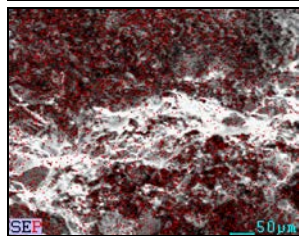
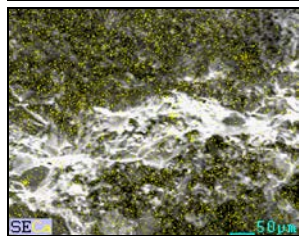
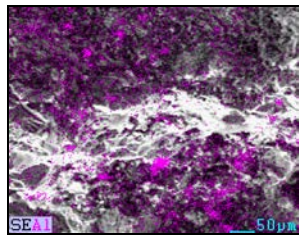
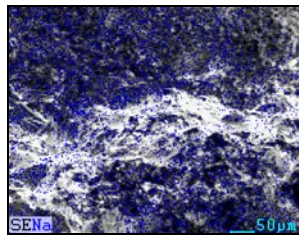
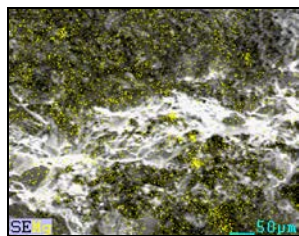
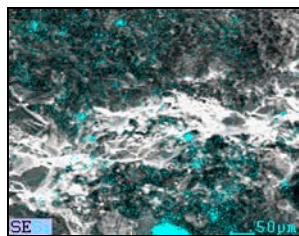
1. Dengan desain yang sama, memilih material yang memiliki persentase *strain* lebih tinggi, seperti SA-192
2. Melakukan perlakuan panas *anealling* setelah proses *cold working*, untuk mengurangi *residual stress*
3. Mengurangi kadar karbon di dalam paduan, karena laju korosi akan meningkat dengan adanya pembentukan karbida

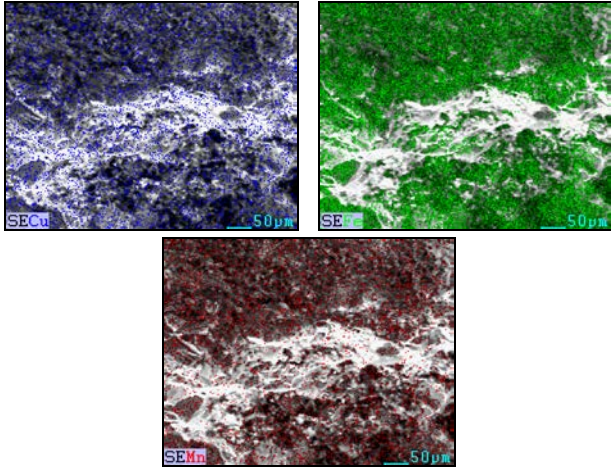
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

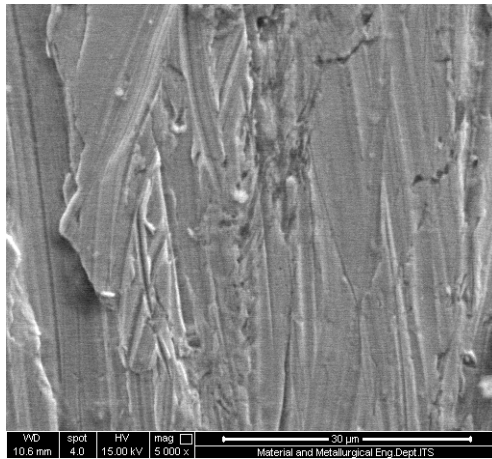
1. Hasil EDX-Mapping Daerah A (*Crack*)

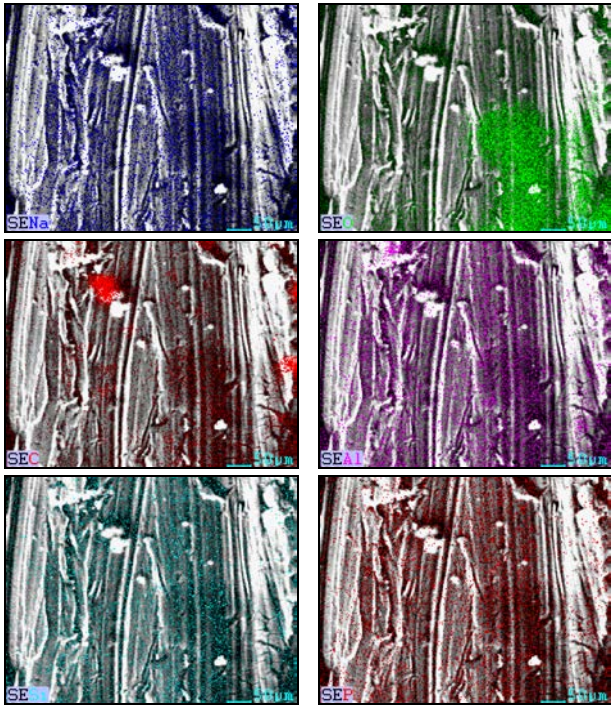
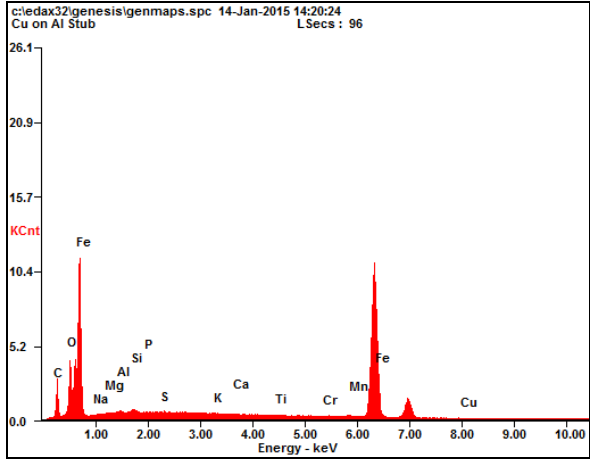


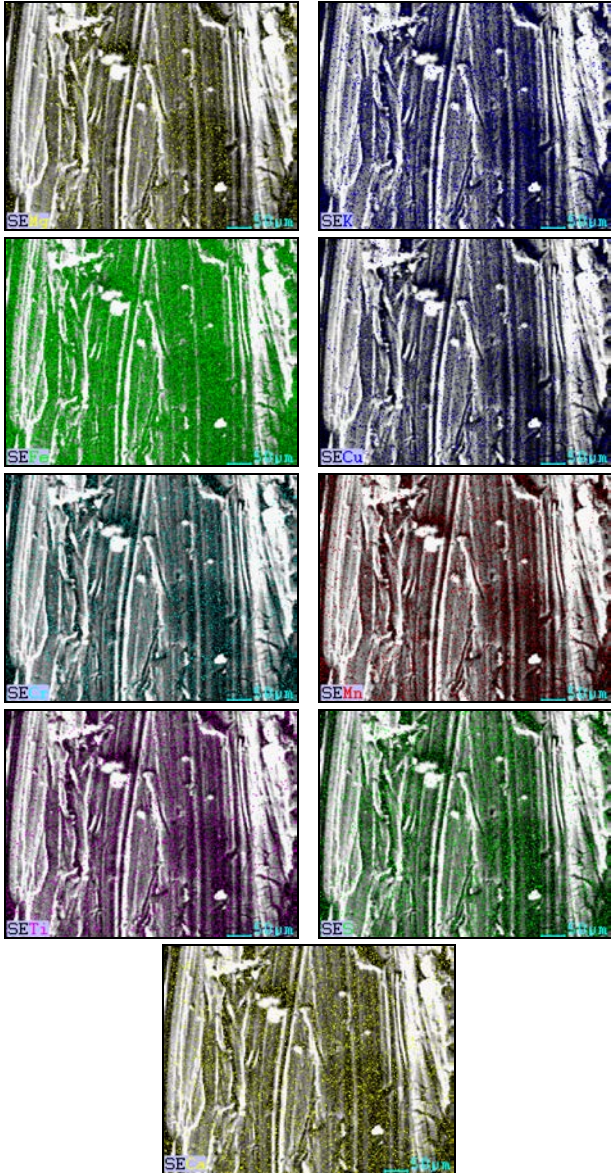




2. Hasil EDX-Mapping Daerah B (Bukan Crack)







3. Tabel Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Beban : 100 kg

Waktu : 10 detik

- Tube Baru

Jarak	HVN (1)	HVN (2)	HVN (3)	Rata-Rata HVN
0,5 mm	172	147	152	157
1,0 mm	160	159	169	163
1,5 mm	162	157	156	158
2,0 mm	166	178	160	168
2,5 mm	175	157	172	168
3,0 mm	178	177	170	175
3,5 mm	177	178	178	178
4,0 mm	181	189	188	186
4,5 mm	183	184	177	181
5,0 mm	182	185	183	183

- Tube Gagal

Jarak	HVN (1)	HVN (2)	HVN (3)	Rata-Rata HVN
0,5	154	147	152	151
1,0	153	149	154	152
1,5	157	165	146	156
2,0	158	164	159	160
2,5	166	154	165	162
3,0	166	186	172	175
3,5	171	185	174	177
4,0	174	172	181	176
4,5	176	174	180	177
5,0	168	176	172	172

4. Tabel Kualitas *Feedwater* Boiler

NO	WAKTU	PARAMETER	BATASAN	RATA-RATA	KETERANGAN
1	10 Januari 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		48	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,47	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,6	
2	10 Februari 2011	pH	9,2 - 10,2	9,2	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		48	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,47	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,6	
3	10 Maret 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		47	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,5	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,57	
4	10 April 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		47	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,5	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,57	
5	10 Mei 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		47	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,5	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,57	
6	10 Juni 2011	pH	9,2 - 10,2	10,07	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		46	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,83	
		PO ₄ , ppb	3 -10	4,07	
7	10 Juli 2011	pH	9,2 - 10,2	9,41	Sesuai dengan batasan yang
		Konduktifitas,		50	

		$\mu\text{s/cm}$			dijinkan.
		SiO ₂ , ppm	<5	3,21	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,35	
8	10 Agustus 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		49	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,17	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,33	
9	10 September 2011	pH	9,2 - 10,2	9,41	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		64	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,56	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,23	
10	10 Oktober 2011	pH	9,2 - 10,2	8,73	pH mengalami penurunan. Kemungkinan ada kandungan organik.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		60	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,64	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,07	
11	10 Nopember 2011	pH	9,2 - 10,2	9,21	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		44	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,1	
		PO ₄ , ppb	3 -10	7,53	
12	10 Desember 2011	pH	9,2 - 10,2	8,5	pH mengalami penurunan. Kemungkinan ada kandungan organik.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		33	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,54	
		PO ₄ , ppb	3 -10	7,38	
13	10 Januari 2012	pH	9,2 - 10,2	8,81	pH mengalami penurunan. Kemungkinan ada kandungan organik.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		32	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,92	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,68	

14	10 Februari 2012	pH	9,2 - 10,2	9,3	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		38	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,36	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,99	
15	10 Maret 2012	pH	9,2 - 10,2	9	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		40	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,49	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,82	
16	10 April 2012	pH	9,2 - 10,2	9,4	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		58	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,12	
		PO ₄ , ppb	3 -10	8,21	
17	10 Mei 2012	pH	9,2 - 10,2	9	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		51	
		SiO ₂ , ppm	<5	3	
		PO ₄ , ppb	3 -10	8,1	
18	10 Juni 2012	pH	9,2 - 10,2	9,4	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		62	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,83	
		PO ₄ , ppb	3 -10	4,07	
19	10 Juli 2012	pH	9,2 - 10,2	9,41	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		50	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,21	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,35	
20	10 Agustus 2012	pH	9,2 - 10,2	9	pH mengalami penurunan. Kemungkinan
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		51	

		SiO ₂ , ppm	<5	3	ada kandungan organik.
		PO ₄ , ppb	3 -10	8,1	
21	10 September 2012	pH	9,2 - 10,2	9,4	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, μs/cm		62	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,88	
		PO ₄ , ppb	3 -10	7,65	
22	10 Oktober 2012	pH	9,2 - 10,2	10,02	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, μs/cm		56	
		SiO ₂ , ppm	<5	1,7	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,58	
23	10 Nopember 2012	pH	9,2 - 10,2	9,32	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, μs/cm		65,8	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,52	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,43	
24	10 Desember 2012	pH	9,2 - 10,2	9,05	pH mengalami penurunan. Kemungkinan ada kandungan organik.
		Konduktifitas, μs/cm		35,6	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,43	
		PO ₄ , ppb	3 -10	4	

5. Strain Measurement

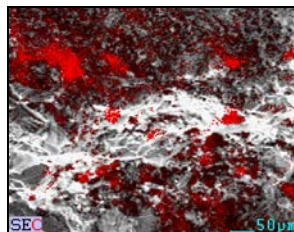
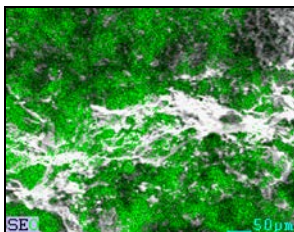
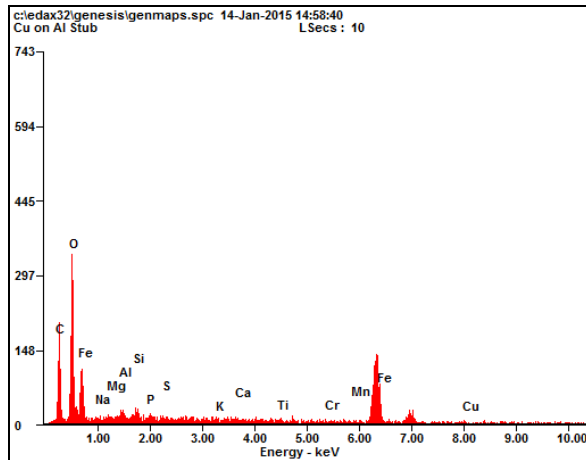
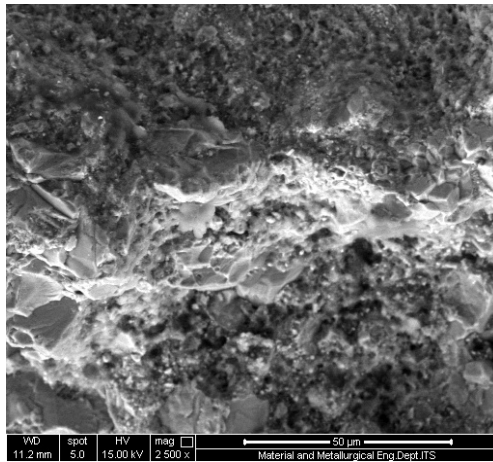
$$\% \text{ Strain} = \frac{100 r}{R}$$

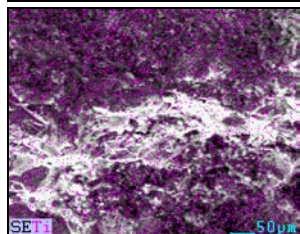
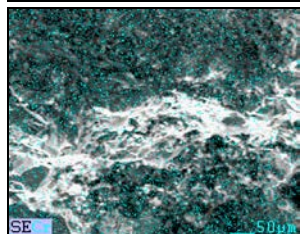
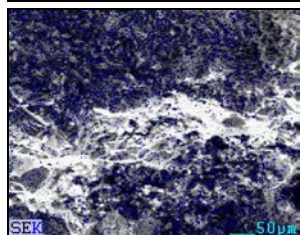
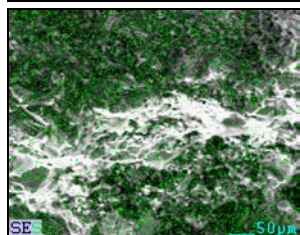
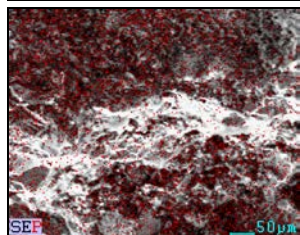
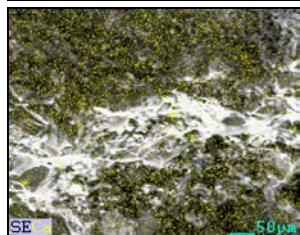
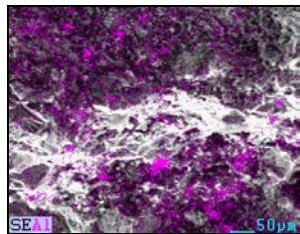
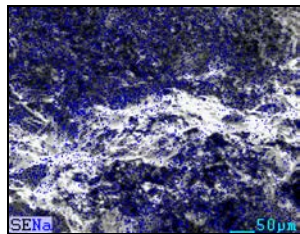
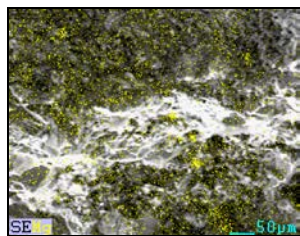
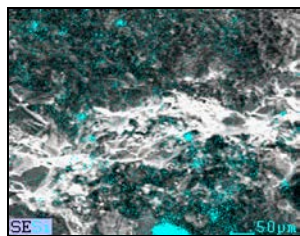
$$\% \text{ Strain} = \frac{100 (38,1/2)}{57,15}$$

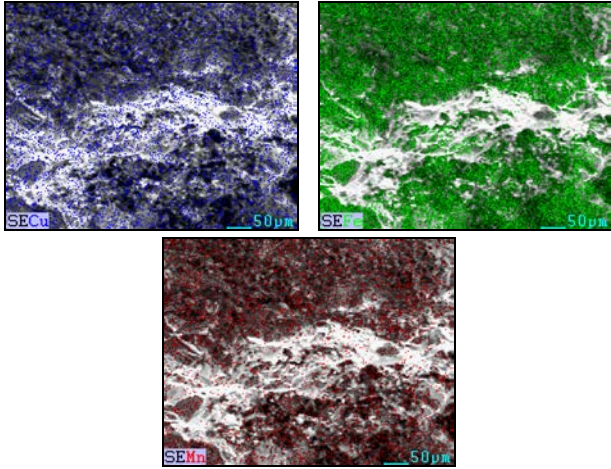
$$\% \text{ Strain} = 33,33 \%$$

LAMPIRAN

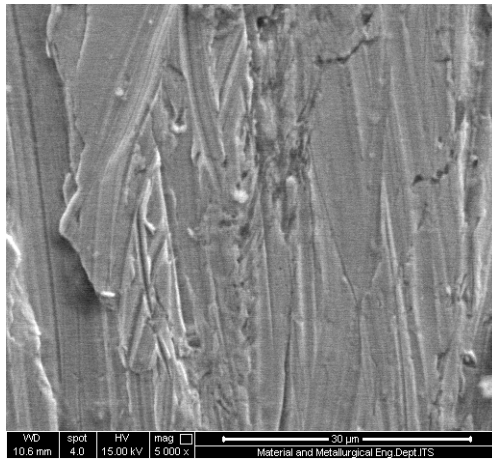
1. Hasil EDX-Mapping Daerah A (*Crack*)

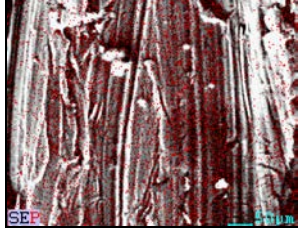
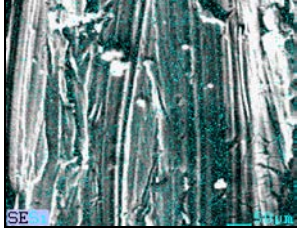
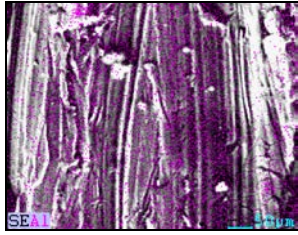
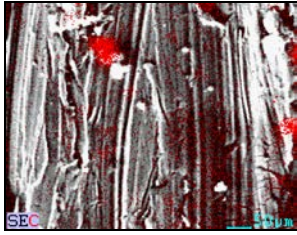
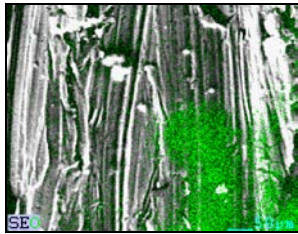
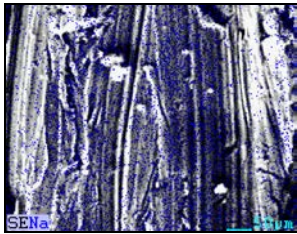
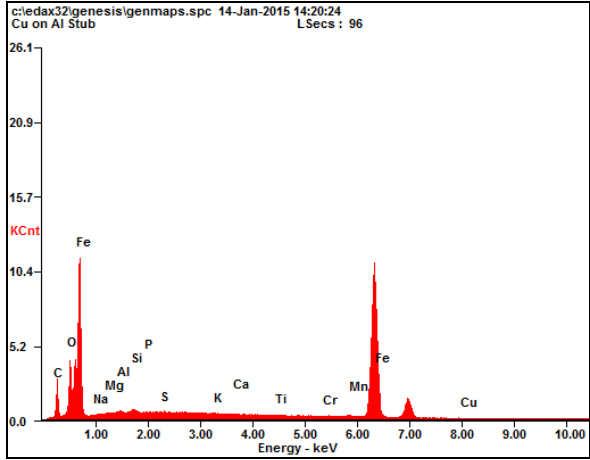


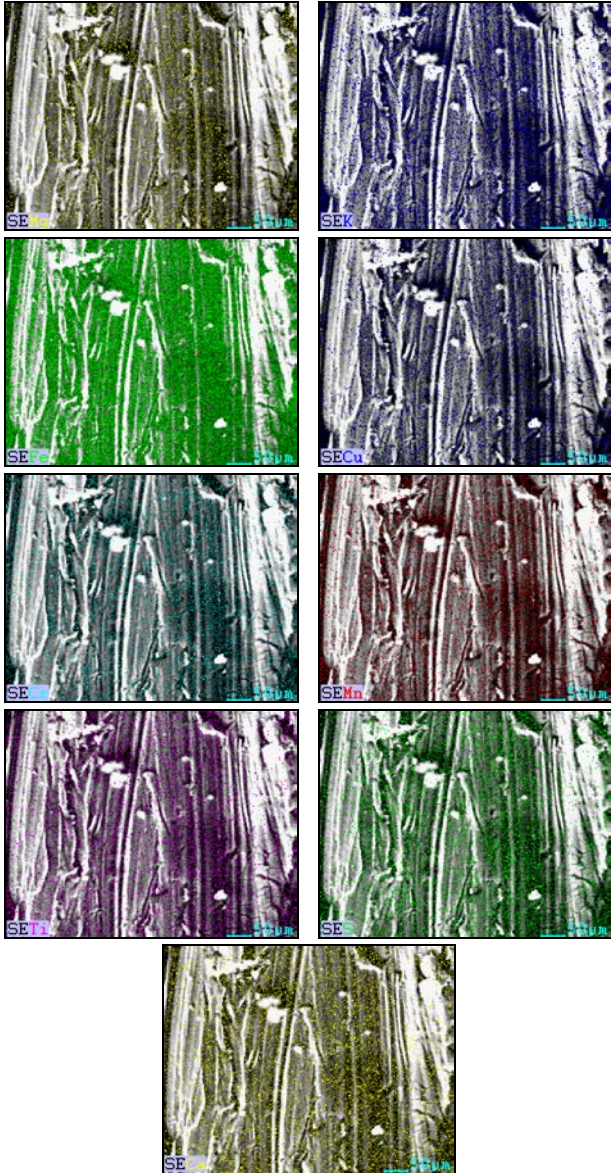




2. Hasil EDX-Mapping Daerah B (Bukan Crack)







3. Tabel Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Beban : 100 kg

Waktu : 10 detik

- Tube Baru

Jarak	HVN (1)	HVN (2)	HVN (3)	Rata-Rata HVN
0,5 mm	172	147	152	157
1,0 mm	160	159	169	163
1,5 mm	162	157	156	158
2,0 mm	166	178	160	168
2,5 mm	175	157	172	168
3,0 mm	178	177	170	175
3,5 mm	177	178	178	178
4,0 mm	181	189	188	186
4,5 mm	183	184	177	181
5,0 mm	182	185	183	183

- Tube Gagal

Jarak	HVN (1)	HVN (2)	HVN (3)	Rata-Rata HVN
0,5	154	147	152	151
1,0	153	149	154	152
1,5	157	165	146	156
2,0	158	164	159	160
2,5	166	154	165	162
3,0	166	186	172	175
3,5	171	185	174	177
4,0	174	172	181	176
4,5	176	174	180	177
5,0	168	176	172	172

4. Tabel Kualitas *Feedwater* Boiler

NO	WAKTU	PARAMETER	BATASAN	RATA-RATA	KETERANGAN
1	10 Januari 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		48	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,47	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,6	
2	10 Februari 2011	pH	9,2 - 10,2	9,2	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		48	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,47	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,6	
3	10 Maret 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		47	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,5	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,57	
4	10 April 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		47	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,5	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,57	
5	10 Mei 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		47	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,5	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,57	
6	10 Juni 2011	pH	9,2 - 10,2	10,07	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		46	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,83	
		PO ₄ , ppb	3 -10	4,07	
7	10 Juli 2011	pH	9,2 - 10,2	9,41	Sesuai dengan batasan yang
		Konduktifitas,		50	

		$\mu\text{s/cm}$			dijinkan.
		SiO ₂ , ppm	<5	3,21	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,35	
8	10 Agustus 2011	pH	9,2 - 10,2	9,7	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		49	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,17	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,33	
9	10 September 2011	pH	9,2 - 10,2	9,41	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		64	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,56	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,23	
10	10 Oktober 2011	pH	9,2 - 10,2	8,73	pH mengalami penurunan. Kemungkinan ada kandungan organik.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		60	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,64	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,07	
11	10 Nopember 2011	pH	9,2 - 10,2	9,21	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		44	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,1	
		PO ₄ , ppb	3 -10	7,53	
12	10 Desember 2011	pH	9,2 - 10,2	8,5	pH mengalami penurunan. Kemungkinan ada kandungan organik.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		33	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,54	
		PO ₄ , ppb	3 -10	7,38	
13	10 Januari 2012	pH	9,2 - 10,2	8,81	pH mengalami penurunan. Kemungkinan ada kandungan organik.
		Konduktifitas, $\mu\text{s/cm}$		32	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,92	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,68	

14	10 Februari 2012	pH	9,2 - 10,2	9,3	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		38	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,36	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,99	
15	10 Maret 2012	pH	9,2 - 10,2	9	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		40	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,49	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,82	
16	10 April 2012	pH	9,2 - 10,2	9,4	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		58	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,12	
		PO ₄ , ppb	3 -10	8,21	
17	10 Mei 2012	pH	9,2 - 10,2	9	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		51	
		SiO ₂ , ppm	<5	3	
		PO ₄ , ppb	3 -10	8,1	
18	10 Juni 2012	pH	9,2 - 10,2	9,4	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		62	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,83	
		PO ₄ , ppb	3 -10	4,07	
19	10 Juli 2012	pH	9,2 - 10,2	9,41	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		50	
		SiO ₂ , ppm	<5	3,21	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,35	
20	10 Agustus 2012	pH	9,2 - 10,2	9	pH mengalami penurunan. Kemungkinan
		Konduktifitas, $\mu\text{s}/\text{cm}$		51	

		SiO ₂ , ppm	<5	3	ada kandungan organik.
		PO ₄ , ppb	3 -10	8,1	
21	10 September 2012	pH	9,2 - 10,2	9,4	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, μs/cm		62	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,88	
		PO ₄ , ppb	3 -10	7,65	
22	10 Oktober 2012	pH	9,2 - 10,2	10,02	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, μs/cm		56	
		SiO ₂ , ppm	<5	1,7	
		PO ₄ , ppb	3 -10	5,58	
23	10 Nopember 2012	pH	9,2 - 10,2	9,32	Sesuai dengan batasan yang diijinkan.
		Konduktifitas, μs/cm		65,8	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,52	
		PO ₄ , ppb	3 -10	6,43	
24	10 Desember 2012	pH	9,2 - 10,2	9,05	pH mengalami penurunan. Kemungkinan ada kandungan organik.
		Konduktifitas, μs/cm		35,6	
		SiO ₂ , ppm	<5	2,43	
		PO ₄ , ppb	3 -10	4	

5. Strain Measurement

$$\% \text{ Strain} = \frac{100 r}{R}$$

$$\% \text{ Strain} = \frac{100 (38,1/2)}{57,15}$$

$$\% \text{ Strain} = 33,33 \%$$

DAFTAR PUSTAKA

- _____, 1992. *ASM Metals HandBook Volume 10 - Material Characterization*. Material Park: ASM International.
- _____, 1992. *ASM Metals HandBook Volume 13 - Corrosion*. 9th penyunt. Material Park: ASM Internasional.
- _____, 2000. *ASM Metals HandBook Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. Material Park: ASM International.
- _____, 2002. *ASM Metals HandBook Volume 11 - Failure Analysis and Prevention*. Material Park: ASM International.
- _____, 2002. *ASTM A210/A210M : Standar Specification for Seamless Medium-Carbon Steel Boiler and Superheater tubes*. West Conshocken: ASTM Internasional.
- _____, 2003. *ASTM E92 - 82 : Standard Test Method for Vickers Hardness for Metallic Materials*. Material Park: ASTM Internasional.
- _____, 2004. *ASM Metals HandBook Volume 9 - Metallography and Microstructure*. Material Park: ASM International.
- _____, 2007. *ASTM E3 - 01 : Standard Guide Preparation for Metallographic Specimen*. West Conshohocken: ASTM International.
- Ahmad, Z., 2006. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Bamrotwar, S. R. & Deshpande, D. V. S., 2014. Root Cause Analysis and Economic Implication of Boiler Tube Failures in 210 MW Thermal Power Plant. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, pp. 6-10.
- Brook, C. R. & Choudury, A., 2002. *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York: McGraw Hills.
- Cheng, Y. F., 2013. *Stress Corrosion Crack of Pipelines*. New Jersey: John Willey and Sons, Inc.
- Craig, B. D., Lane, R. A. & Rose, D. H., 2006. *Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide*

- for Selecting Materials*. 2nd penyunt. New York: AMMTIAC.
- Davis, J. R., 1999. *Heat-Resistant Materials*. 2nd penyunt. Materials Park: ASM Internasional.
- Davis, J. R., 2000. *Corrosion : Understanding The Basic*. Material Park: ASM Internasional.
- Effendi, H., 2008. *Studi Kasus Kegagalan Material ASTM A335/P12 dalam Aplikasi Boiler Steam Pipe*, Jakarta: Universitas Indoenesia.
- Eoff, D., 2008. Undersatnding Fuel Savings in the Boiler Room. *ASHRAE Journal*, Desember, p. 39.
- Hou, J. dkk., 2011. Effect of Cold Working Path on Strain Concentration, Grain Boundary Microstructure, and Stress Corrosion Cracking in Alloy 600. *Elvesier*, Volume 53, pp. 2956-2962.
- Imran, M., 2014. Effect of Corrosion on Heat Transfer through Boiler Tube and Estimating Overheating. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, IV(6), pp. 629-638.
- Javidi, M. & Horeh, S. B., 2014. Investigating The Mechanism of Stress Corrosion Cracking in Near-Neutral and High pH Environments fo API 5L X52 Steel. *Elsevier*, Volume 80, pp. 213-220.
- Lu, W.-F., Lai, C.-L. & Huang, J.-Y., 2014. Effects of Hydrogen Water Chemistry on Stress Corrosion Cracking Behavior of Cold-Worked 304L Stainless Steel in High-Temperature Water Environments. *Materials Transactions*, 55(3), pp. 506-510.
- Lu, Z. dkk., 2011. Effects of Water Chemistry and Loading Conditins on Stress Corrosin Cracking of Cold-Rolled 316NG Stainless Steel in High Temperature Wtaer. *Elsevier*, Volume 53, pp. 247-262.
- Lu, Z. dkk., 2008. The Dependency of The Crack Growth Rate on The Loading Pattern and Temperature in Stress Corrosion

- Cracking of Strain-Hardened 316L Stainless Steel in Simulated BWR Environment. *Elsevier*, Volume 50, pp. 698-712.
- Miyamoto, H., Saburi, D. & Fujiwara, H., 2012. A microstructural Aspect of Intergranular Stress Corrosion Cracking of Semi-Hard U-Bend Tubes of Commercially Pure Copper in Cooling Systems. *Elsevier*, Volume 26, pp. 108-119.
- Nag, P. K., 2006. *Power Plant Engineering*. 2nd penyunt. New Delhi: Tata McGraw-Hill .
- National Physical Laboratory, 1982. *Stress Corrosion Cracking*. Middlesex: NPL Management Limited.
- Nikanorov, A. & Brazhnikova, L., 2010. Water Chemical Composition of Rivers, Lakes, and Wetlands. *Encyclopedia of Life Support System*, Volume II, p. 5.
- Nimmo, B. & Hinds, G., 2003. *Beginners Guide to Corrosion*. Middlesex: NPL's Corrosion Group.
- Schweitzer, P. A., 1996. *Corroison Engeneering Handbook*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Stansburry, E. E. & Buchanan, R. A., 2000. *Fundamental of Electrochemical Corrosion*. Materials Park: ASM Internasional.
- Teir, S. & Kulla, A., 2002. *Steam/Water Circulation Design*. Helsinki: Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering.
- The American Society of Mechanical Engineers, 2013. *ASME Boiler Pressure Vessel Code Section I : Rules of Construction of Power Boiler*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- Totten, G., Howes, M. & Inoue, T., 2002. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. 1st penyunt. Materials Park: ASM Internasional.
- Vidojkovic, S. dkk., 2013. Extensive Feedwater Quality Control and Monitoring Concept for Preventing Chemistry-Related

- Failures of Boiler Tubes in A Subcritical Thermal Power Plant. *Elsevier*, Volume 59, pp. 683-694.
- Wang, L. W. dkk., 2013. Influence of Carbon on Stress Corrosion Cracking of High Strength Pipeline Steel. *Elvesier*, Volume 76, pp. 486-493.
- Wu, T.-F., 2009. Failure Analysis for the Economizer Tube of the Waste of Heat Boiler. *China Steel Technical Report*, Issue 22, pp. 52-58.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Gusti Umindya Nur Tajalla atau lebih akrab dipanggil Lala lahir di Gresik, 26 Pebruari 1993, adalah anak ketiga dari Agus Karyono dan Kanti Hartutik. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Muhammadiyah 2 Gresik, SMP Negeri 1 Gresik, dan SMA Negeri1 Gresik. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Material dan

Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan NRP 2711100078 pada tahun 2011.

Selama kuliah, penulis aktif berorganisasi di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS sebagai staf (2012-2013) dan wakil 1 kepala (2013-2014) Departemen Pengabdian Masyarakat. Selain itu, penulis juga pernah menjadi *Steering Committee* (SC) Kaderisasi (2012-2013) dan Pemandu AMPLAS FTI. Di bidang akademik, penulis juga menjadi salah satu asisten Laboratorium Kimia Material (2013) dan Laboratorium Metalurgi (2013 dan 2014).

Penulis pernah melaksanakan kerja praktek di CNOOC SES pada Agustus 2014 yang mempelajari tentang “Analisa Kegagalan *Chemical Tubing* Stainless Steel 316L di Zelda-E”.

Alamat penulis sekarang berada di Jalan Raya Bengawan Solo No. 61 Randuagung Gresik dan memiliki alamat e-mail gustiumindyant@gmail.com.