



TUGAS AKHIR - TM 141585

**ANALISA KEGAGALAN *TUBE DRAIN SUPERHEATER*
PADA *HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR (HRSG)***

ESTY WULANDARI
2111 100 074

Dosen Pembimbing
Dr.Ir.H.C Kis Agustin, DEA

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM 141585

***FAILURE ANALYSIS TUBE OF DRAIN SUPERHEATER
ON HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR (HRSG)***

ESTY WULANDARI
2111 100 074

Supervisor
Dr.Ir.H.C Kis Agustin, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Industrial Technology Faculty
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**STUDI ANALISA KEGAGALAN TUBE DRAIN
SUPERHEATER PADA HEAT RECOVERY STEAM
GENERATOR (HRSG)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**ESTY WULANDARI
NRP. 2111 100 074**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA (Pembimbing)
(NIP. 196308151989032001)
2. Suwarno, ST., MSc., PhD (Penguji I)
(NIP. 198005202005011003)
3. Ika Dewi Wijayanti, ST, M.Sc (Penguji II)
(NIP. 198512022014042002)
4. Indra Sidharta, ST, M.Sc (Penguji III)
(NIP. 198006192006041004)

**SURABAYA
Januari, 2016**



**ANALISA KEGAGALAN *TUBE DRAIN*
SUPERHEATER PADA *HEAT RECOVERY STEAM*
*GENERATOR (HRSG)***

Nama Mahasiswa : Esty Wulandari
NRP : 2111 100 074
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA

Abstrak

Tube drain superheater merupakan salah satu komponen dari *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*. Komponen ini berfungsi sebagai saluran pembuangan sisa uap basah yang berada dalam *heat exchanger* sebelum *HRSG* beroperasi. Terdapat kasus kegagalan *tube drain superheater* (terkorosi) setelah dua puluh tahun beroperasi berupa kebocoran. Kerusakan ini mengakibatkan *tube drain superheater* harus diganti dengan yang baru. Kasus kegagalan serupa harus dihindari, sehingga dilakukan penelitian analisa kegagalan pada *tube drain superheater*.

Penelitian diawali dengan observasi lapangan untuk mencari informasi mengenai bentuk dan lokasi kerusakan *tube drain superheater*. Selanjutnya pengambilan data operasional dan material yang meliputi standar operasional (SOP), historis perawatan serta material *tube drain superheater*. Observasi pada permukaan dalam dan luar *tube drain superheater* meliputi pengambilan gambar, pengukuran ketebalan, serta instalasi isolasi untuk mengetahui perubahan fisik yang terjadi akibat kerusakan. Beberapa pengujian dilakukan pada sampel *tube drain superheater* seperti metalografi untuk memperjelas bentuk kerusakan, serta uji pada kerak menggunakan X-Ray Diffraction supaya diketahui unsur pembentuknya.



Kerusakan *tube drain superheater* tidak dimulai dari dalam, ditunjukkan oleh permukaan dalam yang tidak ada cacat serta parameter operasi masih dalam range izin. Lubang yang ditengarai melalui kebocoran disebabkan oleh penurunan ketebalan secara progresif dimulai dari permukaan luar *tube drain superheater* akibat korosi. Korosi terjadi akibat reaksi antara permukaan luar *tube drain superheater* dengan air, selanjutnya terbentuk kerak yang tersusun oleh Fe_3O_4 dan Fe_2O_3 . Glasswool di lokasi kerusakan mengalami penurunan ketebalan hingga 25 mm, warnanya memudar dan mengandung air. Air tersebut dapat berasal dari dalam berupa titik-titik air hasil pengembunan akibat panas dari dalam *tube drain superheater* bertemu dengan udara mengandung uap air di dalam glasswool yang temperaturnya jauh lebih rendah. Hanging clamp yang tidak sesuai juga dapat menjadi laluan air dari luar *tube drain superheater* untuk masuk ke dalam isolasi

Kata Kunci : analisa kegagalan, HRSG, korosi, tube drain superheater



***FAILURE ANALYSIS OF TUBE DRAIN SUPERHEATER
ON HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR (HRSG)***

Name : Esty Wulandari
NRP : 2111 100 074
Department : Teknik Mesin
Supervisor : Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA

Abstrak

Tube drain superheater is one component of Heat Recovery Steam Generator (HRSG). The function of this component is as a wet steam sewerage which exists inside heat exchanger before HRSG operates. There is a case of failure of tube drain super heater (corrosion case) after twenty years of operation in the form of leakage. This damage has resulted in the replacement of tube drain superheater. In order to avoid this similar case of failure, a research analysis of failure is executed.

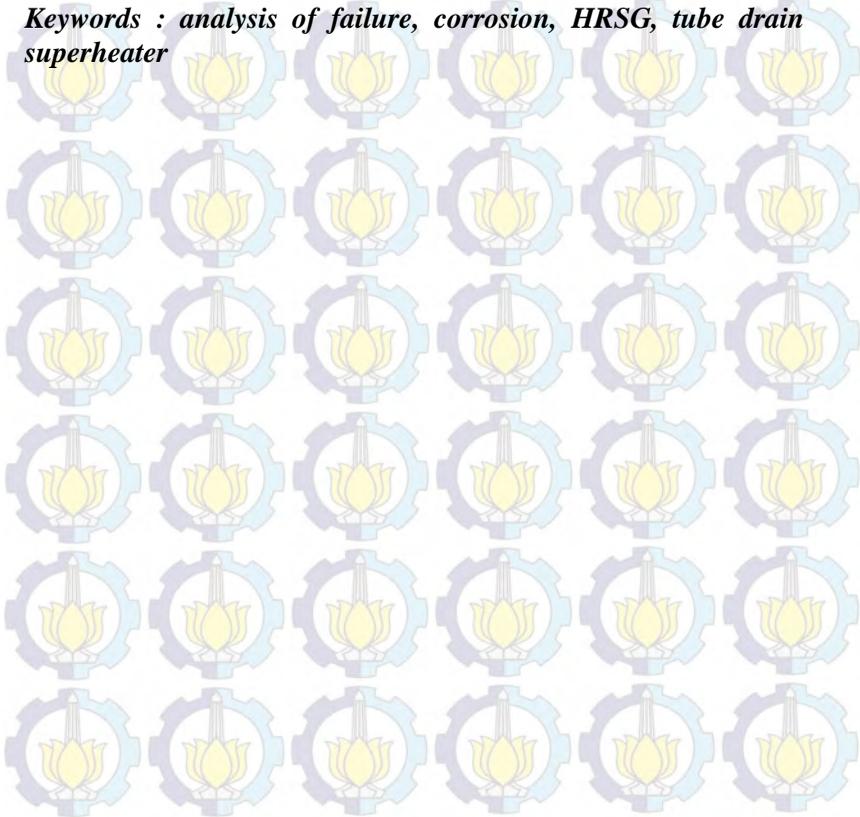
The research begins with the field observation in order to look for informations about the form and the site of tube drain superheater's damage. The next is preempting operational and material data including operational standard (SOP), treatment's histories, and tube drain superheater material. The observation on the inside and outside's surface of tube drain superheater includes picturing, measuring of thickness, and insulation installation data retrieval to determine the physical changes that occur due to damage. Some testing are done on tube drain superheater samples such as metallographic to clarify the form of damage, as well as tests on the crust using X-Ray Diffraction to find out the forming elements

*The damage of tube drain superheater does not begin from the inside, indicated by a surface in which there is no defect and is still in the range of operating parameters permit. The hole that assumes with leakage is caused by the decreasing of thickness progressively which begins on the outside's surface of tube drain superheater in consequence of corrosion. **The** corrosion is caused by the reaction*



between the outer surface of the tube drain superheater with water, then formed a crust that is composed of Fe_3O_4 and Fe_2O_3 . Glasswool at the site of damage decreased to 25 mm thickness, the color fades and contains water. The water may originate from inside of tube in the form of drops which results from condensation caused by the meets of the heat inside tube drain with the steam's air inside glasswool which temperature is lower. Hanging clamp that does not fit can also be a waterway from outside the superheater tube to drain into the insulation.

Keywords : analysis of failure, corrosion, HRSG, tube drain superheater





KATA PENGANTAR

Tugas akhir ini dimulai pengerjaannya pada bulan Juli 2015. Topik yang diambil sangat menarik bagi penulis, gabungan antara dua laboratorium keahlian di Teknik Mesin; Metalurgi, Perpindahan Panas, serta keahlian bidang lain yaitu kimia reaksi. Terdapat banyak ilmu dan pelajaran yang saya dapat selama satu tahun pengerjaan tugas akhir ini.

Saya mengucapkan terima kasih pada karyawan Lab. Metalurgi yang telah banyak membantu saat pengujian spesimen; Mas Agus, Pak Endang, dan Pak Mantri. Teman-teman yang meluangkan waktu untuk berdiskusi tentang tugas akhir ini, teman-teman Lab. Metalurgi; Dewor, Opie, mbak Rifqoh, Kenny, Chandra, mas Galang, mas Yordi, mas Bustan, Refki, Billy, Brahmanda, yang selalu memberikan keceriaan ditengah tengah rasa lelah, dan semua penghuni lab, maaf bila terlewat. Sahabatku Aulia, Anita, dan Ocie yang selalu memotivasi dan menghibur saya, dan ciwi-ciwi ku M54 terimakasih semuanya. Temen kos'an keputih perintis IA, adek dinda, ria,riri, terimakasih.

Secara khusus saya mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing saya Ibu Dr. Ir. H.C. Kis Agustin, DEA atas kesempatan, kepercayaan, kesabaran, bimbingan, motivasi, dan doa beliau. Beliau tidak hanya sekedar pembimbing bagi saya, tetapi juga seseorang yang telah mengubah cara berpikir dan sudut pandang saya. Bu Kis tidak pernah ragu mengingatkan saya ketika salah dan selalu bersabar membimbing saya, terima kasih banyak Bu Kis.

Kepada keluarga saya, Papa saya Sugeng Triyono yang selalu memberikan doa terbaik dan bantuan finansial untuk anaknya hehe. Mama saya Endah Sri Wulandari yang tidak



pernah berkata saya telah gagal, beliau selalu mendukung, menasihati dan mendengarkan keluh kesah saya setiap hari. Terimakasih mama yang selalu menyempatkan berdoa khusus buat saya di malam hari, finansial selama ini yang tidak akan pernah bisa saya lupakan. Untuk kedua adikku tersayang Rahma Dwi Wulandari dan Arifin Subeki yang selalu bisa memberikan tawa kebahagiaan saat mengalami masa suram pengerjaan Tugas Akhir. Saya berjanji akan membahagiakan mereka semua, insyaAllah :)

Tak lupa ucapan terimakasih untuk orang terkasih, gendutku Fahmi Khafidhul Haq yang selalu membantu pengerjaan Tugas Akhir ini. Memberikan keceriaan, dukungan motivasi, serta kesetiannya yang selalu mendampingi walaupun terkadang sangat menyebalkan.

Saya sangat bersyukur atas jalan hidup yang telah dipikirkan oleh Allah Subhanahuwata'ala hingga hari ini. Yang Maha Pengasih telah memberikan saya kesempatan untuk bangkit menatap masa depan dengan penuh optimisme. Segala puji bagi Allah yang telah memberikan karunia dan nikmat dalam hidup saya.

Saya persembahkan tugas akhir saya “Analisa Kegagalan *tube Drain Superheater* pada *Heat Recovery Steam Generator*”. Semoga karya tulis ini berguna bagi para pembaca.

Surabaya, 27 Januari 2016

Esty Wulandari
2111 100 074

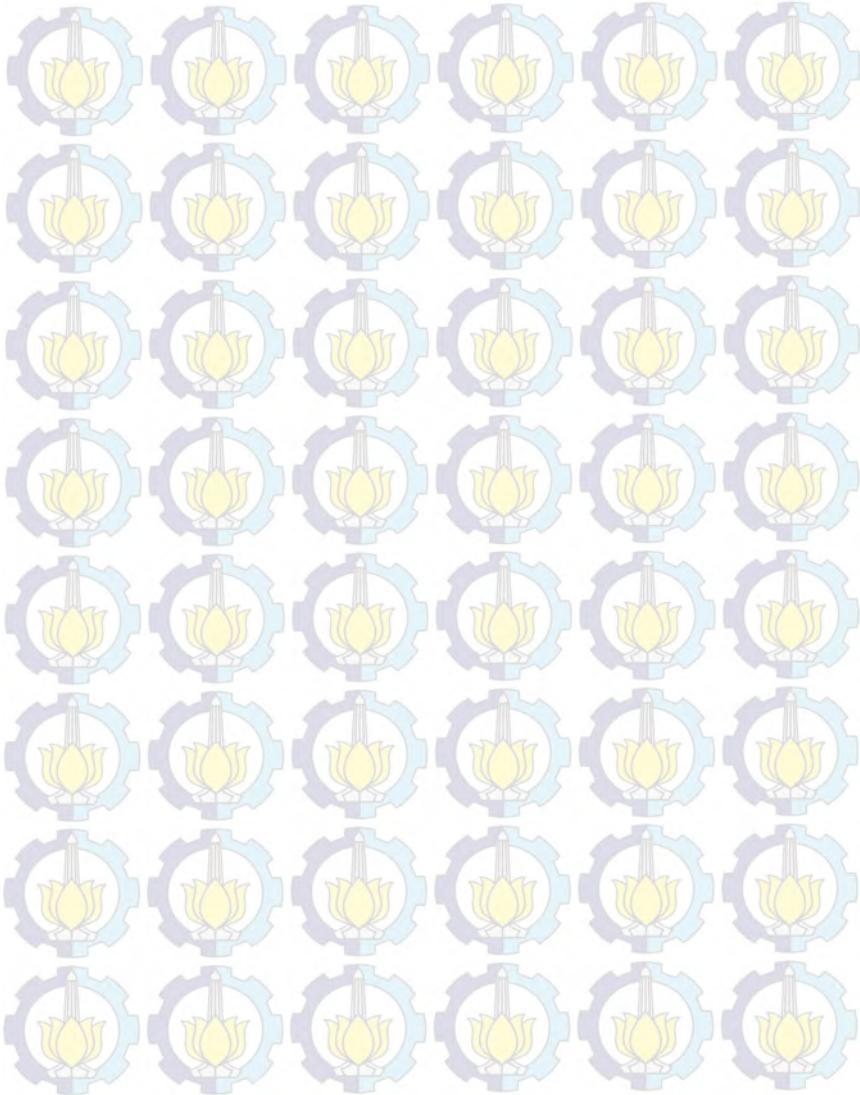


DAFTAR ISI

Judul	
Halaman pengesahan	
ABSTRAK.....	iii
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Heat Recovery Steam Generator</i>	5
2.2 <i>Drain tube</i>	6
2.3 <i>Low-Alloy Steel</i>	8
2.4 Insulasi Panas.....	10
2.5 Korosi.....	13
2.5.1 Korosi di bawah Isolasi.....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2 Peralatan.....	26
3.3 <i>Tube Drain Superheater</i>	26
3.4 Langkah Penelitian.....	27
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 <i>Tube Drain Superheater</i>	33
4.2 Observasi <i>Tube Drain Superheater</i>	35
4.2.1 Permukaan Dalam <i>Tube Drain Superheater</i>	36
4.2.2 Permukaan Luar <i>Tube Drain Superheater</i>	36
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	54



DAFTAR PUSTAKA.....55





DAFTAR GAMBAR

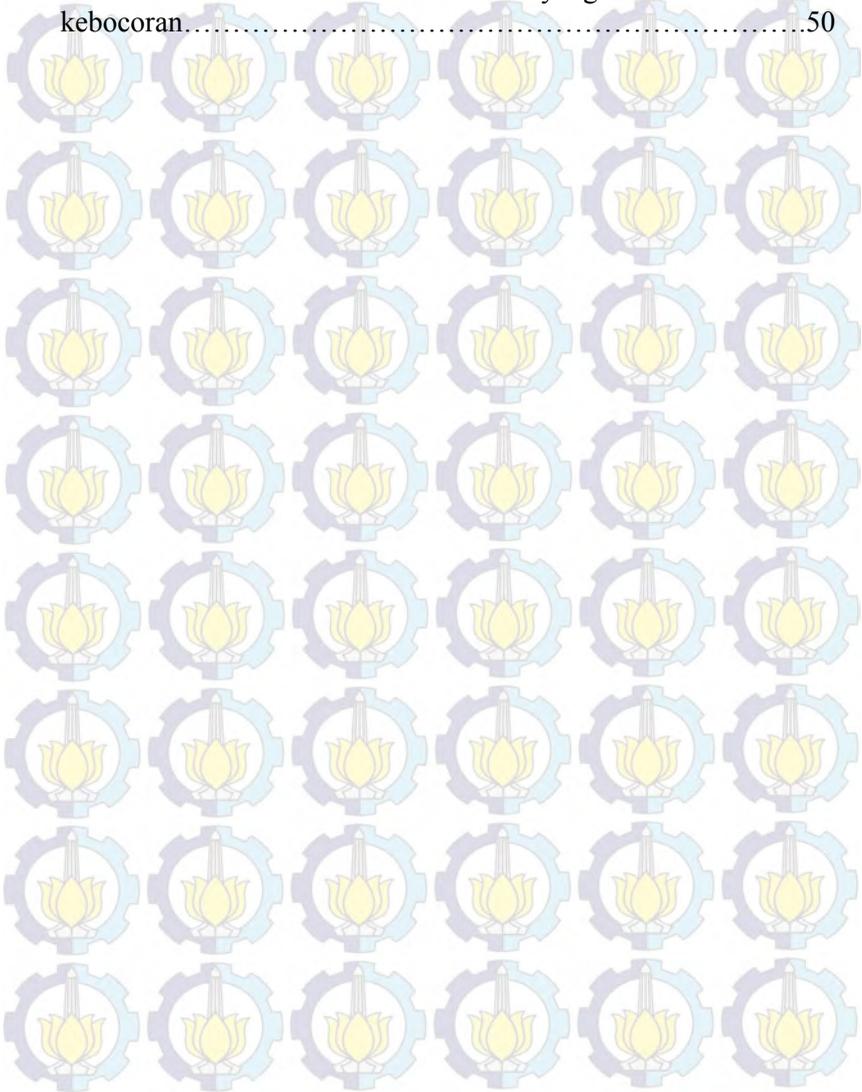
Gambar 1.1 Letak <i>tube –tube drain</i> pada sisi HRSG	1
Gambar 1.2 Foto <i>tube drain superheater</i> yang mengalami kebocoran.....	2
Gambar 1.3 <i>Tube drain superheater</i> yang telah di las	3
Gambar 2.1 Skema HRSG Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap	5
Gambar 2.2 Penampang melintang <i>drain tube</i> yang menggunakan isolasi panas.....	7
Gambar 2.3 Pengaruh jumlah unsur paduan dengan ketahanan terhadap <i>creep</i>	9
Gambar 2.4 <i>Creep strength (0.01% 1000 h)</i> dan <i>rupture strength (100,000 h)</i> baja 1%Cr - 0.5%Mo dan 1.25%Cr - 0.5%M.....	10
Gambar 2.5 (a) <i>Fiberglass</i> , (b) <i>Mineralwool</i> , (c) <i>Cellulose</i>	11
Gambar 2.6 Reaksi elektrokimia yang terjadi antara besi dan tembaga	18
Gambar 2.7. (a) lokasi terjadinya kerusakan, dan (b) lubang kebocoran yang terjadi	19
Gambar 2.8. (a) braket yang kontak langsung dengan isolasi dan (b) lokasi kebocoran terhadap braket.....	19
Gambar 2.9 Korosi seragam	20
Gambar 2.10 Korosi Celah	20
Gambar 2.11 Mekanisme korosi sumuran	22
Gambar 2.12 Beberapa bentuk korosi sumuran	23
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	25
Gambar 3.2 Potongan <i>tube drain superheater</i> sepanjang 410 mm dan 600 mm yang telah mengalami kegagalan. (B) adalah <i>tube</i> yang mengalami kebocoran dan (C) adalah <i>tube</i> yang jauh dari kebocoran sebagai bahan observasi tambahan.....	27
Gambar 3.3 Lokasi pengukuran ketebalan <i>tube</i> disekitar lubang	29
Gambar 4.1 Skema <i>tube drain superheater</i> pada HRSG	34
Gambar 4.2 Lokasi pembagian sampel <i>tube drain superheater</i> .	35



Gambar 4.3 (a) Permukaan dalam setengah bagian atas <i>tube drain superheater</i> , dan (b) permukaan setengah bagian bawahnya.....	36
Gambar 4.4 (a) Lokasi pengukuran setengah bagian atas dan (b) setengah bagian bawah <i>tube drain superheater</i>	37
Gambar 4.5 pengukuran ketebalan sampel spesimen, (a) letak clamp dan pembagian sampel menjadi 11 bagian untuk memudahkan pengukuran, (b) ketebalan di lokasi yang dipotong setengah bagian atas dan (c) setengah bagian bawah.....	38
Gambar 4.6 Sketsa penurunan ketebalan setengah bagian atas di sekitar kebocoran.....	39
Gambar 4.7 Lokasi kebocoran (a) pertama dan (b) kedua.....	40
Gambar 4.8. (1) Lokasi kebocoran yang dipotong pada garis A dan B <i>tube drain superheater</i> . (3) Penampang makroskopik pada potongan A-A dan (4) B-B. (5) Penampang pada lokasi kebocoran pertama dan dua (6) dengan perbesaran 50x.....	40
Gambar 4.9 (a) Potongan sampel, (b) perbedaan letak kerak berlapis dan butiran.....	41
Gambar 4.10 Kerak berlapis dan kerak butiran yang telah diuji X-RD dan Argentometri.....	42
Gambar 4.11 Ilustrasi penurunan ketebalan yang terjadi (a) dan (b) kerak berlapis yang terbentuk.....	42
Gambar 4.12 Ilustrasi penurunan ketebalan.....	43
Gambar 4.13 Ilustrasi mekanisme korosi celah di bawah deposit metal jika elektrolitnya mengandung Cl ⁻	45
Gambar 4.14 Sketsa instalasi isolasi pada <i>tube drain superheater</i> (a) susunan kondisi awal, (b) kondisi saat ditemukan.....	46
Gambar 4.15 Lokasi pengambilan gambar isolasi (a), (b) warna isolasi baru, (c) isolasi pada lokasi kebocoran dan (d) <i>glasswool</i> jauh dari kebocoran yang telah rusak.....	47
Gambar 4.16 Sketsa pertukaran panas pada <i>tube drain superheater</i>	47
Gambar 4.17 (a) <i>Tube drain superheater</i> yang diisolasi dan dicekam menggunakan <i>hanging clamp</i> (b) lokasi <i>hanging clamp</i> di permukaan sampel <i>tube drain superheater</i> , (c) gambar perbesaran lapisan aluminium foil yang rusak.....	48



Gambar 4.18 Susunan isolasi yang sesuai standar.....49
Gambar 4.19 Kondisi isolasi dan kerak yang terbentuk di sekitar kebocoran.....50

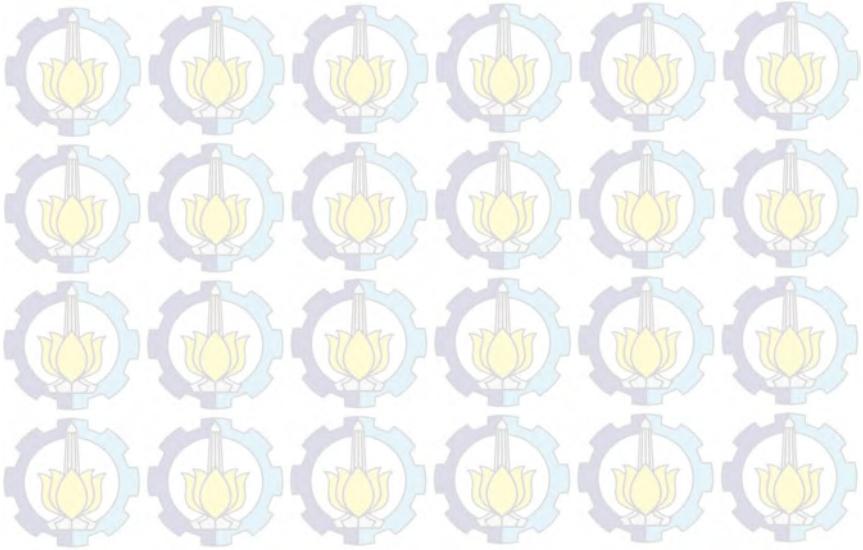






DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Ukuran standart <i>tube seamless schedule 80</i>	8
Tabel 3.1 Pengambilan data <i>tube</i> dan operasionalnya.....	28
Tabel 3.2 Observasi pada permukaan luar <i>tube drain superheater</i>	29
Tabel 3.3 Pengukuran ketebalan pada <i>tube drain superheater</i> ...	30
Tabel 4.1 Persentase unsur paduan pada <i>tube drain superheater</i>	33
Tabel 4.2 Data <i>tube drain superheater</i>	33
Tabel 4.3 Hasil pengukuran <i>tube drain superheater</i> (satuan mm)	37
Tabel 4.4 Senyawa dan kontaminan yang terdapat pada kerak berlapis dan butiran.....	42
Tabel 4.5 Data awal perhitungan ketebalan.....	43
Tabel 4.6 Observasi pada permukaan luar <i>tube drain superheater</i>	46





Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pada setiap pembangkit listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) memiliki unit *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) untuk memanfaatkan gas sisa pembuangan dari Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG). HRSG berfungsi untuk memanaskan air sehingga dihasilkan uap kering dengan menggunakan panas gas buang dari turbin gas. Uap kering yang dihasilkan oleh unit HRSG ini akan digunakan untuk memutar turbin uap pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Untuk mempertahankan kualitas hasil produksi agar uap tetap kering, pada setiap unit HRSG dilengkapi dengan beberapa *drain tube*.

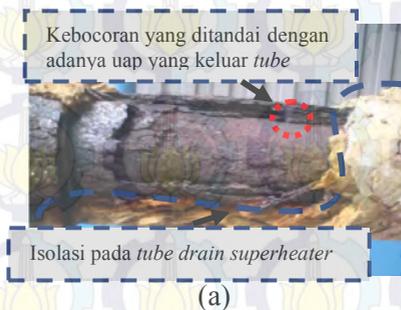
Drain tube merupakan *tube* yang digunakan sebagai saluran pembuangan sisa uap basah yang berada dalam *heat exchanger* sebelum HRSG beroperasi. Setiap *heat exchanger* pada HRSG memiliki 1 *drain tube*. *Tube-tube* ini terletak di sisi luar HRSG sejajar dengan setiap *heat exchanger* (gambar 1.1). Proses pembuangan ini perlu dilakukan supaya *heat exchanger* beroperasi dengan baik. Apabila pada saat *heat exchanger* akan beroperasi masih terdapat sisa uap basah, maka dapat merusak *tube-tube* di dalam *heat exchanger* itu sendiri.



Gambar 1.1 Letak *tube-tube drain* pada sisi HRSG



Salah satu unit *drain tube* pada *heat exchanger* mengalami kegagalan (kebocoran) secara mendadak ditunjukkan pada Gambar 1.2. Kegagalan ini terjadi pada *tube drain superheater* setelah 20 tahun beroperasi dimana *tube drain superheater* tersebut direncanakan tidak akan mengalami kerusakan sebelum 25 tahun beroperasi. Kebocoran ini ditandai dengan adanya tetesan air dari *tube drain superheater* ke tanah. Setelah dilakukan pengecekan dengan cara membuka isolasi *tube drain superheater* ketika beroperasi, terlihat adanya uap yang menembus keluar *tube drain superheater*. Kerusakan ini mengakibatkan tertundanya proses pengoperasian dari HRSG. Selain itu, kerusakan ini dapat menyebabkan adanya sisa uap basah pada *tube drain superheater*. Apabila kerusakan ini tidak dicegah dapat menyebabkan kerusakan pada turbin uap. Oleh karena itu perlu segera diperbaiki.

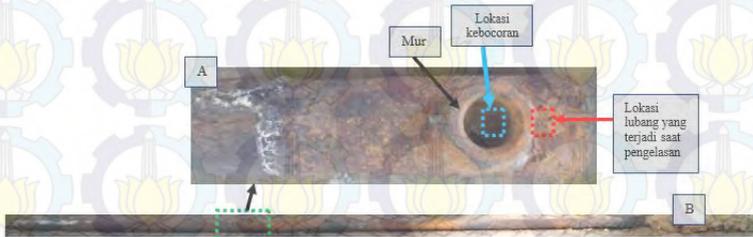


Gambar 1.2 Foto *tube drain superheater* yang mengalami kebocoran. Foto (a) diambil ketika isolasi dibuka pada titik asal tetesan air.

Tujuan dari perbaikan supaya *tube drain superheater* dapat digunakan. Upaya yang dilakukan adalah memasang mur yang dilas di sekeliling lokasi kebocoran. Diharapkan dengan cara ini gas panas yang keluar dari *tube* tidak keluar dari mur. Pada saat proses pengelasan berlangsung terjadi lubang di lokasi sambungan mur dan *tube drain superheater*. Terjadinya lubang ini



mengakibatkan *tube drain superheater* harus diganti dengan yang baru.



Gambar 1.3 *Tube drain superheater* yang telah di las. (A) adalah potongan *tube* yang mengalami kebocoran, (B) adalah *tube drain superheater* yang memiliki panjang 6000mm.

1.2 Perumusan Penelitian

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian analisa kegagalan ini ialah :

1. Apakah yang menjadi penyebab kegagalan dari *tube drain superheater*?
2. Bagaimana mekanisme terjadinya kegagalan apabila ditinjau dari aspek metalurgi dan korosi?

1.3 Batasan Penelitian

Supaya pembahasan dalam permasalahan pada penelitian ini tidak meluas dan dapat diselesaikan dengan baik , maka diperlukan batasan-batasan dan asumsi sebagai berikut :

1. Komponen *tube drain superheater* memiliki komposisi kimia yang homogen dan tidak memiliki cacat awal.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian analisa kegagalan *tube drain superheater* pada *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) ini adalah:



1. Mengetahui penyebab kegagalan yang terjadi pada *tube drain superheater*.
2. Mengetahui mekanisme kerusakan ditinjau dari aspek metalurgi dan korosi.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian analisa kegagalan ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi beberapa pihak, antara lain:

1. Bagi perusahaan industri pembangkit listrik, hasil dari penelitian analisa kegagalan ini dapat digunakan dalam melakukan perawatan untuk menghindari kegagalan yang serupa.
2. Bagi penulis, dengan adanya penelitian analisa kegagalan ini diharapkan dapat mengaplikasikan ilmu korosi yang didapatkan di bangku perkuliahan pada dunia industri.

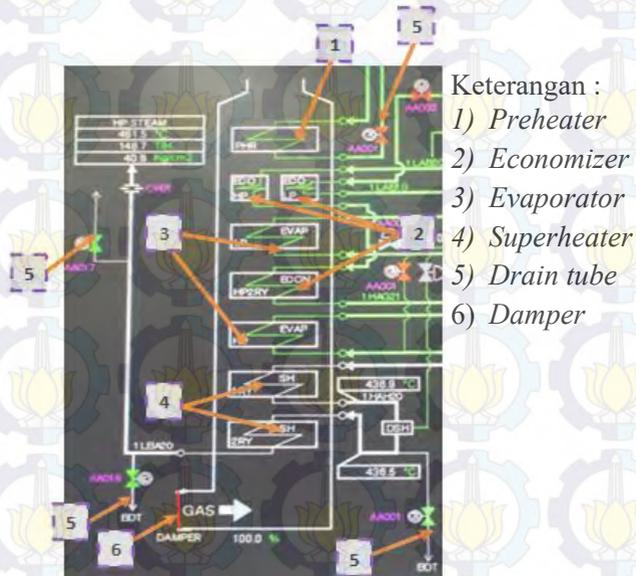


BAB II

DASAR TEORI

2.1 Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

Heat Recovery Steam Generator (HRSG) adalah unit yang berfungsi sebagai pemanas air dengan memanfaatkan gas sisa pembuangan dari Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) untuk menghasilkan uap kering. Uap kering yang dihasilkan oleh unit HRSG ini akan digunakan untuk memutar turbin uap pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) [1]. Di dalam HRSG terdapat beberapa peralatan utama dan pendukung ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema HRSG Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap [2].

Pada PLTGU, gas buang dari turbin gas akan memasuki HRSG dengan cara melewati damper (bagian 6 gambar 2.1).



Damper adalah pengatur laluan gas yang akan memasuki HRSG dan terletak di bagian paling bawah HRSG. Berbeda dengan gas buang, air yang akan dipanaskan masuk melalui bagian atas HRSG dan mengalami beberapa tahapan pemanasan. Pemanasan awal dari air terjadi di dalam *tube preheater* (bagian 1 gambar 2.1) dengan memanfaatkan gas buang yang akan dibuang melalui cerobong (*stack*). *Tube* tersebut terletak pada bagian paling atas dari HRSG. Setelah melewati *preheater* air akan memasuki *economizer* (bagian 2 gambar 2.1) untuk dipanaskan hingga titik didihnya. Selanjutnya air akan memasuki evaporator (bagian 3 gambar 2.1) dan dipanaskan untuk menghasilkan uap jenuh (*saturated steam*). Bagian akhir dari HRSG adalah *superheater* (bagian 4 gambar 2.1). Pada bagian ini, uap jenuh akan dipanaskan hingga menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*). *Superheater* dapat terdiri dari satu atau lebih *module* penukar kalor. *Module* adalah susunan *tube-tube* penukar kalor yang terpasang pada *heat exchanger*. Apabila *module* yang dimiliki berjumlah lebih dari satu, maka dibutuhkan kontrol temperatur uap di antara modul-modulnya. Kontrol ini dilakukan untuk mencegah terjadinya temperatur yang berlebih pada logam *tube* di bagian akhir dari *module* dan meminimalkan kemungkinan kandungan air yang masuk ke dalam turbin uap. Uap kering yang keluar dari *tube superheater* akan memasuki turbin uap untuk memutar sudu-sudu turbin uap dan menghasilkan listrik.

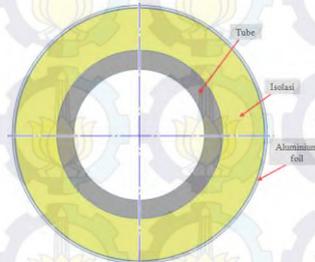
2.2 Drain Tube

Drain tube merupakan *tube* yang digunakan sebagai saluran pembuangan sisa uap basah sebelum HRSG beroperasi (*start-up*) [2]. Proses pembuangan ini perlu dilakukan untuk memastikan *heat exchanger* beroperasi dengan baik. Apabila saat *heat exchanger* akan beroperasi masih mengandung sisa uap basah, maka uap ini dapat merusak *tube-tube* di dalam *heat exchanger* tersebut. Penggunaan *drain tube* pada HRSG akan berhenti ketika tekanan dan temperatur terukur dari HRSG mencukupi untuk memulai pemanasan air. Pada umumnya ketika



tekanan dan temperatur terukur dari drain tube adalah 15 - 20 kg/cm² dan 200-300° C. *Drain tube* tidak akan digunakan ketika HRSG beroperasi hingga proses *start-up* selanjutnya. Setiap *heat exchanger* pada HRSG memiliki satu *drain tube*. *Tube-tube* ini terletak di sisi luar HRSG sejajar dengan letak setiap *heat exchanger*.

Salah satu *drain tube* pada HRSG adalah *drain tube superheater*. *Tube* ini memiliki panjang enam meter dengan standart dimensi yang digunakan adalah *schedule* seperti ditunjukkan pada tabel 2.1. *Schedule* merupakan standart ukuran *tube* yang biasa digunakan pada negara bagian Amerika Utara berdasarkan ketebalan *tube* nya dengan satuan inchi. Semakin tinggi nilai *schedule* pada *tube* tersebut maka tekanan operasi yang dapat diterima oleh *tube* juga lebih tinggi. Supaya tidak cepat mengalami kerusakan, *tube* yang digunakan pada umumnya adalah jenis *tube seamless alloy steel*.



Gambar 2.2 Penampang melintang *drain tube* yang menggunakan isolasi panas

Untuk mengurangi panas yang lolos, *tube* ini dilapisi oleh isolasi panas pada sisi luarnya ditunjukkan pada gambar 2.2. Ketebalan isolasi yang biasa digunakan pada industri pembangkit adalah 10-50 mm. Isolasi ini dapat melindungi *tube* dari perubahan cuaca yang drastis seperti panas terik lalu sesaat kemudian turun hujan. Perubahan cuaca ini dapat menyebabkan terkondensasinya uap panas menjadi air didalam *tube*. Apabila air yang terdapat di dalam *tube* semakin banyak dan tidak dapat



dialirkan keluar dari *tube* maka dapat memicu terjadinya korosi dan dapat menyebabkan kerusakan. Pada sisi terluar dari isolasi dilengkapi dengan lapisan aluminium foil untuk mencegah masuknya zat-zat yang dapat merusak isolasi dan *tube* seperti air hujan. Pada umumnya tebal aluminium yang digunakan memiliki ketebalan 2 mm.

Tabel 2.1 Ukuran standart *tube seamless schedule 80* [3].

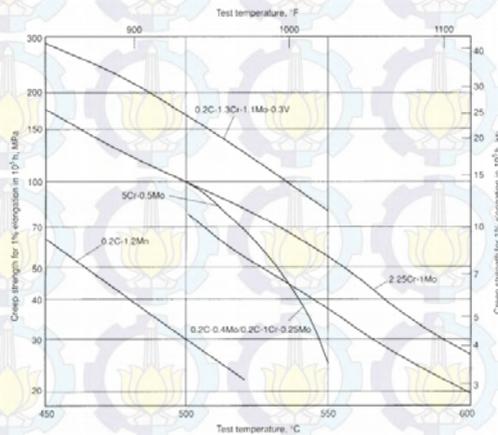
NPS Designator	DN Designator	Outside Diameter		Inside Diameter		Wall Thickness	
		(Inches)	(mm)	(Inches)	(mm)	(Inches)	(mm)
1/8	6	0.405	10.3	0.215	5.5	0.095	2.41
1/4	8	0.540	13.7	0.302	7.7	0.119	3.02
3/8	10	0.675	17.1	0.423	10.7	0.126	3.20
1/2	15	0.840	21.3	0.549	13.9	0.147	3.73
3/4	20	1.050	26.7	0.742	18.8	0.154	3.91
1	25	1.315	33.4	0.957	24.3	0.179	4.55
1-1/4	32	1.660	42.2	1.278	32.5	0.191	4.85
1-1/2	40	1.900	48.3	1.500	38.1	0.200	5.08
2	50	2.375	60.3	1.939	49.3	0.218	5.54
2-1/2	65	2.875	73.0	2.323	59.0	0.276	7.01
3	80	3.500	88.9	2.900	73.7	0.300	7.62
3-1/2	90	4.000	101.6	3.364	85.4	0.318	8.08
4	100	4.500	114.3	3.826	97.2	0.337	8.56

2.3 Low-Alloy Steel (Baja Paduan)

Baja paduan rendah merupakan kategori *ferrous material* yang memiliki sifat mekanik lebih unggul daripada baja karbon. Sifat ini didapatkan dari hasil penambahan elemen paduan seperti nikel, kromium, dan molibdenum. Penambahan unsur paduan pada baja ini berkisar antara 2,07% sampai 10%[3], dimana penamaan baja tersebut sesuai dengan unsur yang ditambahkan. Salah satu jenis baja paduan rendah yang sering digunakan adalah *chromium-molybdenum steel*.



Baja *chromium-molybdenum steel* banyak digunakan pada kilang minyak, industri kimia, *tube superheater*, dan bejana bertekanan. Unsur molybdenum meningkatkan ketahanannya terhadap *creep*, sedangkan penambahan unsur kromium dapat meningkatkan ketahanan korosinya. Terdapat beberapa kombinasi jumlah persentase elemen paduan molybdenum dan kromium pada baja *chromium-molybdenum steel*, dimana setiap persentase yang ditambahkan memberikan keunggulannya masing masing.

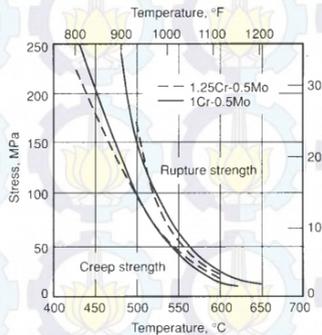


Gambar 2.3 Pengaruh jumlah unsur paduan dengan ketahanan terhadap *creep* pada paduan baja rendah pada temperatur antara 450 – 600 ° C [3].

Baja *chromium-molybdenum steel* dengan persentase unsur tambahan 0.5% Mo dan 0.5%C digunakan untuk sistem perpipaan dan *tube superheater* yang beroperasi pada suhu logam 455 ° C (850 ° F). Baja dengan persentase elemen paduan 1.25% Cr dan 0.5% Mo sering digunakan pada industri karena dapat digunakan hingga temperatur operasi kerja 590° C (1100° F). Baja 1.0%Cr dan 0.5%Mo, pada umumnya digunakan untuk sistem perpipaan dan *tube boiler* pada temperatur operasi kerja berkisar antara 510 - 540 ° C (950 - 1000 ° F). Baja ini memiliki



stress rupture dan ketahanan terhadap *creep* yang hampir sama dengan baja 1.25% Cr dan 0.5% Mo (gambar 2.4).



Gambar 2.4 *Creep strength* (0.01% 1000 h) dan *rupture strength* (100,000 h) baja 1%Cr - 0.5%Mo dan 1.25%Cr - 0.5%Mo [3].

Penambahan unsur kromium dengan persentase 5, 7, hingga 9% Cr pada baja paduan memiliki keuntungan dan kelemahan. Keuntungan utama dari baja ini adalah ketahanan yang tinggi terhadap oksidasi (korosi). Peningkatan unsur kromium menyebabkan penurunan kekuatan logam baja paduan pada temperatur tinggi. Oleh karena itu, *stress rupture* dan ketahanan terhadap *creep* pada baja paduan ini lebih rendah dari paduan dengan unsur kromium yang lebih rendah.

2.4 Insulasi panas (*Thermal Insulation*)

Insulasi panas adalah metode yang digunakan untuk mengurangi laju perpindahan panas/kalor pada sistem perpipaan. Hal ini disebabkan karena panas yang hilang pada sistem ini cukup besar dan dapat merugikan perusahaan. Bahan yang digunakan untuk mengurangi laju perpindahan panas disebut isolator atau insulator. Pemilihan bahan isolator yang akan digunakan harus disesuaikan dengan kondisi kerja isolator dengan acuan perbedaan temperatur kerja *tube* dengan lingkungannya.



Berikut ini adalah beberapa jenis bahan isolasi yang paling sering digunakan di industri[5]:



Gambar 2.5 (a) *Fiberglass*, (b) *Mineral wool*, (c) *Cellulose* [4]

1. *Fiberglass*

Fiberglass adalah isolasi yang paling umum digunakan saat ini, karena proses pembuatannya yang relatif mudah. *Fiberglass* terbuat dari silikon tenun halus, bubuk kaca, dan pecahan kecil kaca seperti pada gambar 2.4. Bahan-bahan tersebut membuat *fiberglass* mampu meminimalkan perpindahan panas, tetapi pemasangan *fiberglass* dapat membahayakan kesehatan pekerja saat instalasi karena bahan yang digunakan isolasi ini dapat menyebabkan kerusakan pada mata, paru-paru, dan kulit jika peralatan keselamatan yang tepat tidak digunakan. *Fiberglass* dapat digunakan pada kondisi kerja dengan temperatur maksimal 540°C.

2. *Mineral wool*

Mineral wool adalah grup yang dalam bahasa dagangnya dikenal dengan 3 nama yang berbeda. Pertama dikenal dengan nama *slag wool* yang terbuat dari terak, dimana komposisi kimianya sesuai dengan terak yang terdapat pada peleburan baja pada pabrik yang bersangkutan. Kedua dinamakan *rock wool*, dan merupakan jenis isolasi yang terbuat dari batu basal. Batu basal adalah jenis batu yang berasal dari hasil pembekuan magma berkomposisi basa di dekat permukaan bumi.



Jenis ketiga bernama *glasswool* yang dibuat dari campuran pasir dan kaca daur ulang atau *limestone* dan *soda ash*.

Mineral wool jenis ketiga memiliki beberapa keunggulan dan kelemahan sebagai isolasi. *Glasswool* memiliki serat fiber yang relatif lebih panjang dari pada jenis isolasi *mineral wool* yang lain. Hal ini menyebabkan *glasswool* tidak mudah robek. Selain itu, isolasi ini tidak mudah terbakar sehingga dapat melindungi *tube* hingga temperature 230 °C. Kelemahan dari isolasi *glasswool* adalah dapat mengganggu sistem pernafasan apabila debu yang ditimbulkan terhirup oleh manusia serta iritasi pada kulit apabila terkena bagian tubuh saat instalasi pada *tube*. Permukaannya yang tidak rata menyebabkan isolasi ini sulit dipasang pada logam tanpa adanya peralatan penunjang lain. *Glasswool* dapat kehilangan fungsinya sebagai isolasi apabila ada air yang membuatnya basah dan lembab [5].

3. Cellulose

Selulosa adalah isolasi yang paling ramah lingkungan. Isolasi selulosa terbuat dari karton daur ulang, kertas, dan bahan-bahan lain yang sejenis. Selulosa merupakan salah satu bentuk isolasi yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga paling tahan api. Beberapa studi terbaru pada selulosa telah menunjukkan bahwa produk isolasi ini sangat baik bila digunakan untuk meminimalkan kerusakan akibat kebakaran [5]. Bahan isolasi selulosa yang menyatu dengan baik dapat menghalangi masuknya oksigen kedalam isolasi. Terdapat kelemahan pada isolasi ini bagi kesehatan seperti alergi yang disebabkan oleh debu koran apabila terhirup manusia.



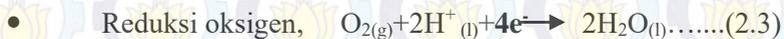
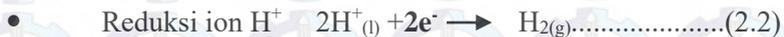
2.5 Korosi

Korosi merupakan proses alamiah dan spontan yang tidak dapat dicegah namun bisa dikendalikan. Pengertian dari korosi menurut NACE (*National Association of Corrosion Engineer*) adalah perusakan logam karena interaksi dengan lingkungannya[6]. Perusakan tersebut bisa terjadi karena reaksi kimia maupun elektrokimia, bukan akibat proses mekanik murni. Berdasarkan lingkungan terjadinya, korosi diklasifikasikan menjadi korosi kering dan korosi basah. Korosi kering terjadi ketika tidak adanya *liquid* sebagai media. Korosi kering pada umumnya terjadi pada kondisi temperatur tinggi atau dalam keadaan kering. Berbeda dengan korosi kering, korosi basah terjadi pada lingkungan dimana liquid berperan sebagai elektrolit.

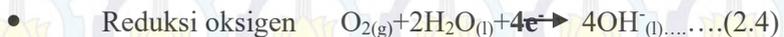
Korosi basah dapat terjadi apabila terdapat dua elektroda, memiliki potensial berbeda yang terhubung secara elektronik dan elektrolit. Anoda adalah tempat terjadinya serta bagian yang mengalami reaksi oksidasi. Reaksi oksidasi adalah reaksi pelepasan elektron oleh sekelompok atom, atau molekul atom yang secara umum ditunjukkan pada persamaan 2.1.



Katoda adalah tempat terjadinya reaksi reduksi. Reaksi reduksi adalah reaksi penangkapan elektron oleh kation yang menyebabkan terjadinya penurunan valensi ion, ditunjukkan pada beberapa persamaan berikut [8].



(kondisi asam)



(kondisi basa)



- Reduksi ion logam $\text{Fe}^{+++} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{++}$ (2.5)
- Deposit logam $\text{M}^{n+} + ne^- \rightarrow \text{M}_{(s)}$ (2.6)

Keadaan ‘terhubung secara elektronik’ adalah kondisi dimana terdapat konduktor yang menghubungkan kedua logam dan berfungsi sebagai elektroda yang mengalirkan elektron. Pengertian dari ‘terhubung secara elektrolit’ adalah kondisi dimana kedua logam berada di dalam larutan elektrolit yang sama dan dapat menghantarkan muatan positif (kation) maupun negatif (anion). Terdapat tiga aspek korosi yang tidak dapat dipisahkan satu dengan lainnya yaitu material, lingkungan, dan reaksi yang terjadi.

- Aspek Material

Aspek material adalah semua bagian, zat, ataupun kondisi yang terkandung pada tiap jenis logam yang mendukung terjadinya korosi. Di dalam logam terdapat perbedaan energi potensial (ΔE) yang dapat memicu terjadinya korosi. Pada logam paduan yang komponen penyusunnya terlarut dengan sempurna dan hanya memiliki satu fasa pada umumnya lebih tahan korosi dari pada logam paduan yang memiliki dua fase atau lebih karena tidak adanya efek *galvanic coupling*. Efek *galvanic coupling* terjadi pada logam karena perbedaan potensial yang membentuk anoda dan katoda yang terhubung secara elektronik di dalam material. Contoh lain dari efek *galvanic coupling* di dalam material terjadi antara butir dan batas butir logam; bagian yang terdapat tegangan sisa dan tidak; bagian yang mengalami deformasi plastis dalam logam dan tidak.



▪ **Aspek Lingkungan**

Lingkungan adalah segala kondisi yang kontak langsung dan berada disekitar material. Apabila diasumsikan material telah homogen, lingkungan yang berbeda dapat menimbulkan bentuk korosi yang berbeda pula. Beberapa kondisi lingkungan yang mempengaruhi terjadinya korosi antara lain

▪ **Kandungan oksigen dan *oxidizer***

Kandungan oksigen yang terlarut dapat mempengaruhi laju korosi dari material. Semakin tinggi kandungan oksigen terlarut, maka semakin tinggi potensial *oxidizer*-nya, sehingga dapat memperlambat sifat aktif-pasif logam dan pada waktunya akan mempercepat laju korosi.

▪ **pH**

pH adalah derajat keasaman yang digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman atau kebasaan yang dimiliki oleh suatu larutan. Tingkat pH tersebut dapat mempengaruhi laju korosi dari material.

▪ **Konsentrasi media korosif**

Konsentrasi media korosif pada umumnya meningkatkan laju korosi dari material. Sebagai contoh pada baja karbon sedang yang berada di dalam larutan NaCl, kecepatan laju korosinya akan semakin meningkat searah dengan meningkatnya konsentrasi NaCl pada larutan elektrolit.

▪ **Temperatur**

Pada lingkungan temperatur tinggi, laju korosi yang terjadi lebih tinggi dibandingkan dengan



temperatur rendah, karena pada temperatur tinggi kecepatan reaksi kimia akan meningkat. Selain itu, material yang berada pada temperatur tinggi mempunyai kecenderungan menangkap elektron lebih besar sehingga cenderung mempercepat laju korosi

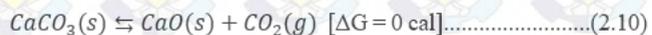
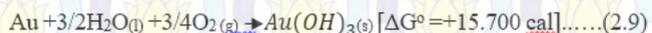
Contoh lain dari kondisi lingkungan adalah kecepatan relatif dari fluida korosif akibat aliran atau agitasi, beban mekanik pada material, maupun adanya aktifitas dari mikrobiologi yang dapat menimbulkan lingkungan menjadi korosif.

- Aspek Reaksi

Korosi merupakan hasil dari reaksi spontan antara material dan lingkungan. Reaksi spontan tersebut dapat ditinjau dari sisi termodinamika maupun elektrokimia.

- Tinjauan dari sisi termodinamika

Hukum termodinamika menunjukkan bahwa setiap zat memiliki energi bebas (G). Apabila perubahan energi bebas Gibbs dari zat sebelum bereaksi (reaktan) menjadi produk menunjukkan nilai $\Delta G < 0$, maka proses tersebut merupakan reaksi spontan. Apabila $\Delta G = 0$ maka reaksi yang terjadi akan setimbang, atau disebut juga proses reversibel. Jika $\Delta G > 0$, maka reaksi tersebut masih membutuhkan energi untuk berlangsung.





Persamaan 2.7 dan 2.8 di atas merupakan contoh dari reaksi spontan. Persamaan 2.8 memiliki kecenderungan lebih besar untuk terjadi korosi daripada persamaan 2.7. Persamaan 2.9 merupakan contoh persamaan yang membutuhkan energi untuk berlangsung. Oleh karena itu, emas merupakan salah satu unsur yang sulit untuk terkorosi. Reaksi yang setimbang atau disebut juga reversible ditunjukkan pada persamaan 2.10.

Perubahan energi bebas Gibbs ini sulit diukur, namun dapat dituangkan pada persamaan 2.11 [8]

$$\Delta G = -n E \cdot F \dots\dots\dots(2.11)$$

dimana:

ΔG = perubahan energi bebas Gibbs (joule)

n = jumlah elektron yang dilepaskan logam yang teroksidasi

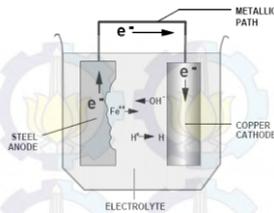
E = potensial yang diukur terhadap elektroda standar (volt)

F = bilangan faraday (96500 Coulomb/eqv)

Nilai E° (potensial standar) berbagai elektroda diukur berdasarkan elektroda standar hydrogen (SHE), yang pada umumnya dibuat tabel dalam deret EMF (electro motive force).

▪ Tinjauan dari sisi elektrokimia

Ditinjau dari kata elektrokimia, reaksi ini melibatkan elektron dan reaksi kimia. Elektron yang mengalir secara terus menerus dari anoda ke katoda menimbulkan arus listrik yang dapat diukur menggunakan alat elektronik.

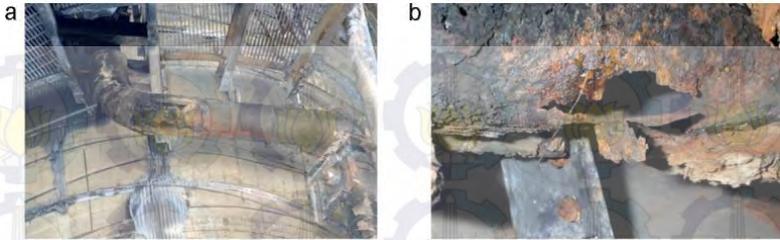


Gambar 2.6 Reaksi elektrokimia yang terjadi antara besi dan tembaga[7]

Pada gambar 2.6 di atas, terdapat 2 elektroda besi (anoda) dan tembaga (katoda) tercelup pada larutan elektrolit yang sama. Elektron mengalir dari anoda besi menuju ke katoda tembaga secara terus menerus. Peristiwa tersebut menyebabkan ion negatif di daerah anoda berkurang dan kelebihan ion positif. Supaya tetap stabil, ion Fe^{++} cenderung untuk menarik ion negatif OH^- dan membentuk FeOH_2 . Apabila proses tersebut terjadi terus menerus maka elektroda besi akan tergerus dan habis.

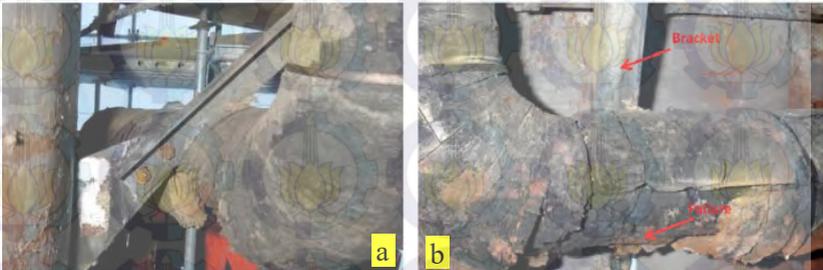
2.5.1 Korosi di bawah Isolasi

Korosi pada pipa terisolasi dapat terjadi ketika terdapat air yang bisa berasal dari luar seperti air hujan maupun dari hasil pengembunan akibat perubahan temperatur dari panas ke dingin atau sebaliknya secara terus menerus pada kerja sistem di permukaan *tube* dan isolasi [12]. Hasil penelitian dari penulis W.Geary [13] pada fenomena yang sama dalam jurnal ilmiahnya “*Analysis of corrosion under insulation failure in a carbon steel refinery hydrocarbon line*”, menjelaskan bahwa kerusakan yang terjadi pada pipa terisolasi sangat berbahaya dan sulit untuk diprediksi.



Gambar 2.7. (a) lokasi terjadinya kerusakan, dan (b) lubang kebocoran yang terjadi.

Pada gambar 2.7 menunjukkan bahwa lubang kebocoran yang terjadi akibat korosi ini cukup besar dan dapat mempengaruhi kinerja sistem.



Gambar 2.8. (a) braket yang kontak langsung dengan isolasi dan (b) lokasi kebocoran terhadap braket [13]

Kerusakan tersebut merupakan akibat dari masuknya air ke dalam isolasi melalui celah yang terbentuk akibat braket kontak langsung dengan instalasi isolasi. Hal tersebut dibuktikan dengan lokasi kerusakan yang sangat dekat dengan braket.

Pada awalnya *tube* tersebut mengalami korosi merata pada seluruh permukaannya akibat bereaksi dengan air sebagai media korosif. Tahap selanjutnya pada lokasi tertentu yang lebih anodic terjadi korosi celah hingga pitting akibat dari adanya kontaminasi di dalam media korosif seperti klorida dan sulfida.



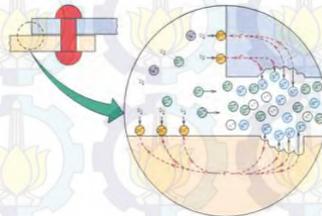
- General Corrosion
 - ❖ Korosi merata (*uniform attack*)



Gambar 2.9 Korosi seragam[11]

Korosi merata adalah bentuk korosi yang paling sering dijumpai. Korosi merata secara normal ditandai dengan reaksi kimia atau elektrokimia yang terbentuk secara merata di seluruh permukaan yang terkena secara langsung dengan lingkungan (media korosif). Logam tersebut akan menjadi lebih tipis, dan terkadang hingga tidak dapat digunakan lagi. Korosi merata dapat menyebabkan kerusakan yang cukup parah pada logam. Bentuk korosi ini jarang menjadi fokus karena pada umumnya kerusakan yang ditimbulkan dapat diantisipasi dengan cara yang tidak terlalu rumit. Beberapa cara yang dilakukan untuk mencegah terjadinya korosi merata antara lain penggunaan material yang sesuai, pemberian *coating*, inhibitor, serta proteksi katodik

- Korosi celah (*crevice corrosion*)



Gambar 2.10 Korosi Celah [8].

Korosi celah adalah korosi lokal yang terjadi pada celah. Celah tersebut dibutuhkan sebagai syarat terjadinya korosi sebagai tempat stagnasi media yang korosif. Terjadinya reaksi reduksi (persamaan 2.17) dan oksidasi (persamaan 2.16) pada



bagian tersebut akan menyebabkan korosi yang merata di permukaan.



Reaksi yang terjadi secara terus menerus akan membuat berkurangnya liquid dan oksigen di dalam celah hingga reaksi reduksi pada sekitar celah akan terhenti. Reaksi oksidasi yang terus terjadi mengakibatkan celah kelebihan ion positif. Kecenderungan ion positif untuk menjadi stabil membuat ion tersebut menarik ion negatif yang lebih agresif yaitu Cl^- ke dalam celah membentuk senyawa MCl_2 . Di dalam air senyawa tersebut akan terurai menjadi *metal hydroxide* dan *free acid* seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.18.



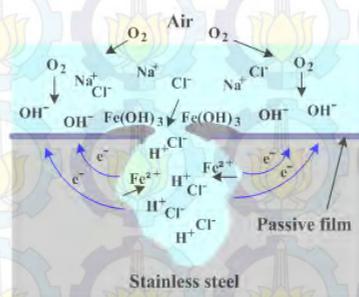
Laju pelarutan logam yang semakin meningkat pada daerah anodik akan mempercepat migrasi dari ion klorida, sehingga akan memperbanyak terbentuknya M^+ dan Cl^- . Reaksi tersebut dinamakan reaksi autokatalitik.

- Korosi sumuran (*pitting corrosion*)

Pitting corrosion adalah bentuk korosi lokal, dimana produk korosinya cenderung membentuk lubang, sehingga disebut juga korosi sumuran. Korosi sumuran menghasilkan lubang-lubang kecil pada logam dengan ketebalan yang biasanya searah dengan gravitasi. Umumnya lubang yang terbentuk memiliki diameter permukaan hampir sama atau kurang dari kedalaman. Korosi sumuran sering dianggap lebih berbahaya jika dibandingkan dengan korosi merata (*uniform*), karena bentuk korosi ini sulit untuk diidentifikasi. Hal ini disebabkan karena produk korosi



yang terbentuk biasanya akan menutupi rongga-rongga serta sulit untuk diprediksi yang memungkinkan peralatan mengalami kegagalan tanpa terduga. Terdapat tujuh bentuk rongga hasil dari korosi sumuran (gambar 2.13). Secara umum terdapat dua tahapan utama pada mekanisme terjadinya korosi sumuran, yaitu inisiasi pit dan propagasi.

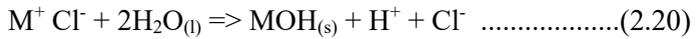


Gambar 2.11 mekanisme korosi sumuran [10]

- Inisiasi pit adalah terbentuknya tempat-tempat yang bersifat anodik yang disebabkan oleh terganggunya atau rusaknya lapisan pasif pada permukaan logam. Jenis korosi ini sering melibatkan ion halida (seperti ion *chloride*) karena mempunyai kecenderungan yang besar untuk merusak lapisan pasif pada permukaan logam.



- Propagasi merupakan proses pelarutan logam yang terjadi secara kontinu, membuat ion-ion logam akan terakumulasi di daerah anoda dan membentuk rongga-rongga. Untuk menstabilkan elektron, ion-ion klorida akan bermigrasi ke dalam rongga dan bereaksi dengan ion logam sehingga terjadi reaksi hidrolisis.

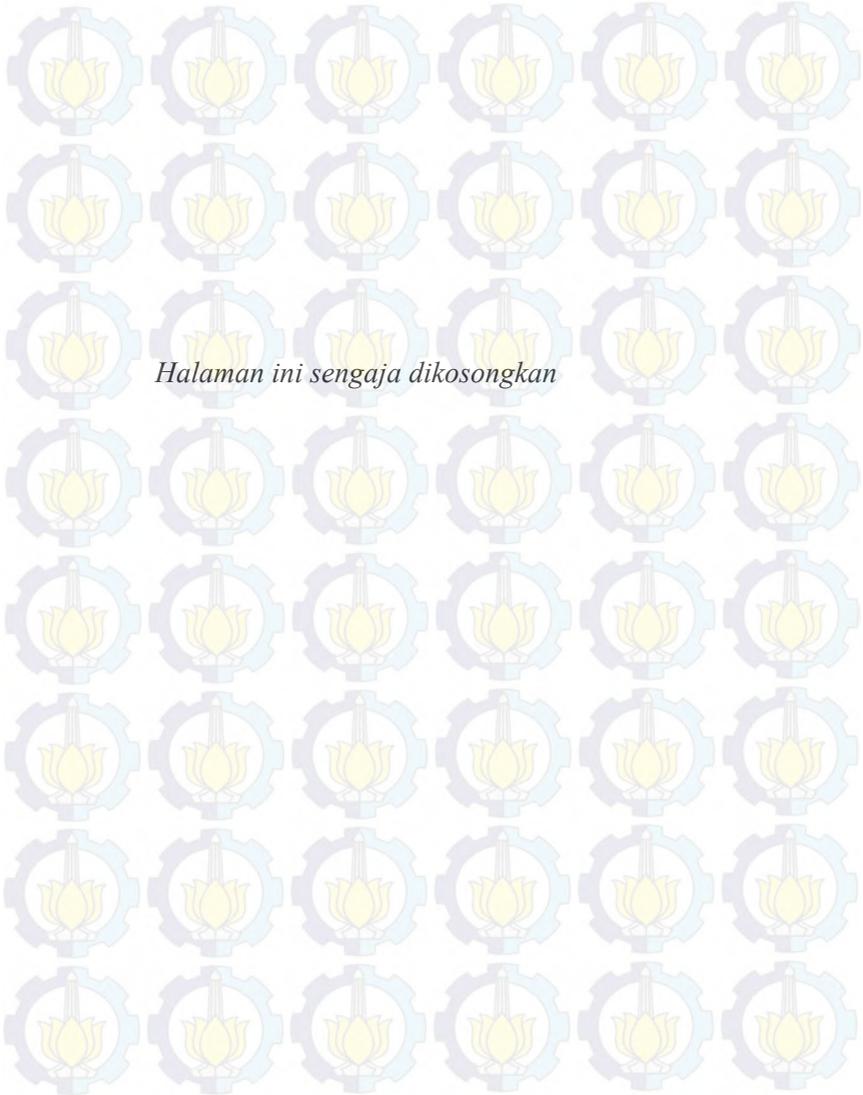


Adanya ion H^+ dan Cl^- yang terbentuk akan mencegah terjadinya repasifikasi pada logam. Laju pelarutan logam yang semakin meningkat pada daerah anodik akan mempercepat migrasi dari ion klorida, sehingga akan memperbanyak terbentuknya M^+ dan Cl^- .



Gambar 2.11 Beberapa bentuk korosi sumuran [10].

Pada umumnya *Stainless steel* lebih rentan terserang *pitting corrosion* daripada logam atau paduan yang lain, terutama jika berada pada daerah temperatur sensitif ($510-787,8^\circ C$) karena ketahanannya terhadap *pitting corrosion* akan menurun.



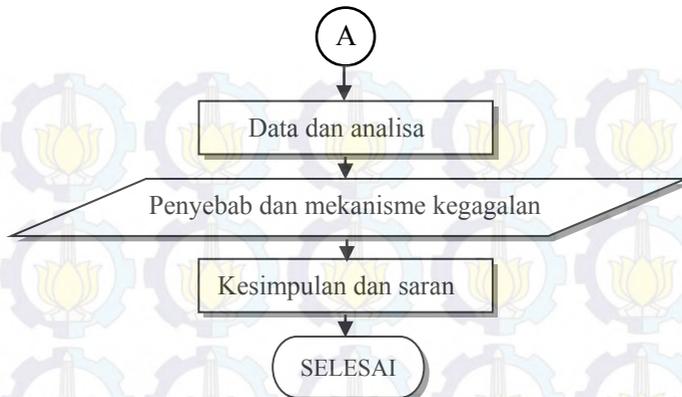
Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan untuk melakukan penelitian analisa kegagalan ini ialah:

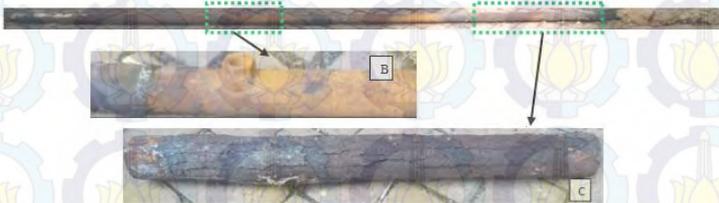
1. Penggaris dan jangka sorong.
2. Loupe pengukur
3. Kamera digital.
4. Mikroskop optis.
5. Perangkat pengujian metalografi berupa *mounting*, *grinding/polishing*, dan *etching*.
6. Perangkat pengujian komposisi kimia yaitu spektrometer dan X-Ray Diffraction.
7. Perangkat pengujian Ar
8. Alat ukur ketebalan Krautkramer GmbH & Co model DM 2 dengan *probe* 5 MHz.

3.3 Tube Drain Superheater

Pada *Heat Recovery System Generator* (HRSG) terdapat *Tube Drain Superheater* yang memiliki panjang 6000 mm. *Tube Drain Superheater* ini menggunakan material *seamless ferritic alloy steel* (SA 335 P 22). Dua sampel *tube* yang diteliti dipotong



dengan panjang \pm 410 mm dan 610 mm seperti yang terlihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Potongan *tube drain superheater* sepanjang 410 mm dan 600 mm yang telah mengalami kegagalan. (B) adalah *tube* yang mengalami kebocoran dan (C) adalah *tube* yang jauh dari kebocoran sebagai bahan observasi tambahan.

3.4 Langkah Penelitian

Langkah- langkah yang akan dilakukan pada analisa kegagalan ini ialah sebagai berikut:

a. Identifikasi permasalahan

Setelah dilakukan pengecekan pada *tube drain superheater* pada HRSG blok 3 unit 1 terdapat kerusakan (korosi) sepanjang *tube*. Kerusakan ini terlihat dari adanya kebocoran, perubahan warna, serta penurunan ketebalan sepanjang *tube*.

b. Studi literatur

Studi literatur merupakan kegiatan mencari informasi mengenai faktor-faktor penyebab kerusakan yang sejenis terhadap buku-buku dan jurnal. Hal ini termasuk pengumpulan materi kuliah yang terkait untuk digunakan sebagai referensi.

c. Observasi lapangan

Observasi lapangan dilakukan untuk mengumpulkan data awal berupa foto dari material untuk membantu perumusan masalah pada penelitian analisa kegagalan *tube drain superheater*.

d. Perumusan masalah dan tujuan penelitian

Setelah melakukan beberapa tahapan di atas maka *tube drain superheater* yang telah mengalami kegagalan sebagai objek penelitian. Penelitian analisa kegagalan ini bertujuan mencari penyebab dan mekanisme terjadinya kegagalan dengan



batasan-batasan dan asumsi untuk memperjelas lingkup penelitian .

e. Pengambilan data operasional dan *tube*

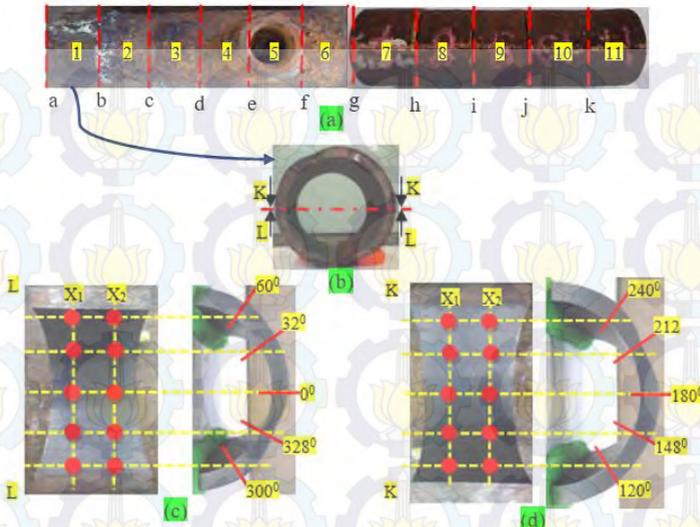
Pengambilan data operasional dan *tube* dilakukan untuk mengetahui arah permasalahan dari penelitian analisa kegagalan pada *tube drain superheater*. Rincian data operasional dan material yang diambil adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Pengambilan data *tube* dan operasionalnya

	Case	Data
Material	jenis material	
	jenis isolasi	
	kekuatan Tarik (Mpa)	
	periode penggunaan	
	<i>pipe schedule</i> – Ketebalan (<i>wall thickness</i>)	
	diameter luar	
	diameter dalam	
	panjang	
	batas maksimal temperature	
	batas maksimal tekanan	
Perawatan		
Lokasi	terhadap HRSG	
Parameter operasi	tekanan <i>start-up</i> (kg/cm ²)	
	tekanan <i>shut-down</i> (kg/cm ²)	
	temperature <i>start-up</i> (°C)	
	temperature <i>shut-down</i> (°C)	

f. Pengambilan data material

Analisa pada sampel material dilakukan untuk membantu penelitian analisa kegagalan agar dapat diketahui mekanisme kegagalan yang terjadi pada *tube*. Beberapa pengujian yang akan dilakukan adalah :



Gambar 3.4 Lokasi pengukuran ketebalan *tube* disekitar lubang

Untuk mempermudah pengukuran ketebalan, sampel *tube drain superheater* dibagi menjadi 11 bagian (gambar 3.4a). Setiap bagiannya akan dipotong melintang sesuai garis L-L dan K-K (gambar 3.4b). Pengukuran ketebalan dilakukan pada bagian atas dan bawah *tube drain superheater*, dengan lokasi pengukuran ditandai lingkaran merah (gambar 3.4c,3.4d). Walaupun pengukuran *tube drain superheater* dari permukaan dalam, tetapi dapat mempresentasikan ketebalan yang sebenarnya.

Tabel 3.2 Observasi pada permukaan luar *tube drain superheater*

Case		Kondisi awal	Kondisi saat ditemukan
Isolasi	bahan		
	ketebalan		
	warna		
Penutup isolasi	bahan		
	ketebalan		
	warna		

Tabel 3.3 Pengukuran ketebalan pada *tube drain superheater*

Bagian	Data		Bagian	Data	
1	X-1	X-2	4	X-7	
2	X-3	X-4	5	X-8	X-9
3	X-5	X-6	6	X-10	X-11
7	X-12	X-13	9	X-16	X-17
8	X-14	X-15	10	X-18	X-19
			11	X-20	X-21

- Pengujian Material

- Pengujian material yang dilakukan pada *tube drain superheater* adalah :

- Pengujian metalografi

Pengujian metalografi bertujuan untuk melihat perubahan struktur mikro dari material akibat lingkungan kerja serta daerah sekitar kebocoran. Pengamatan struktur mikro ini menggunakan alat bantu berupa *mounting*, *grinding/polishing*, dan *etching*. Selain itu untuk melihat perubahan struktur mikro, metalografi digunakan untuk melihat kontur kerusakan dan pengurangan ketebalan secara drastis pada *tube*.

- Pengujian komposisi kimia

Pengujian komposisi kimia menggunakan spectrometer digunakan untuk menguji *tube drain superheater*, sedangkan XRD bertujuan untuk mengetahui komposisi kimia dari



produk korosi dan lapisan tebal yang terbentuk di permukaan luar.

g. Data dan Analisa

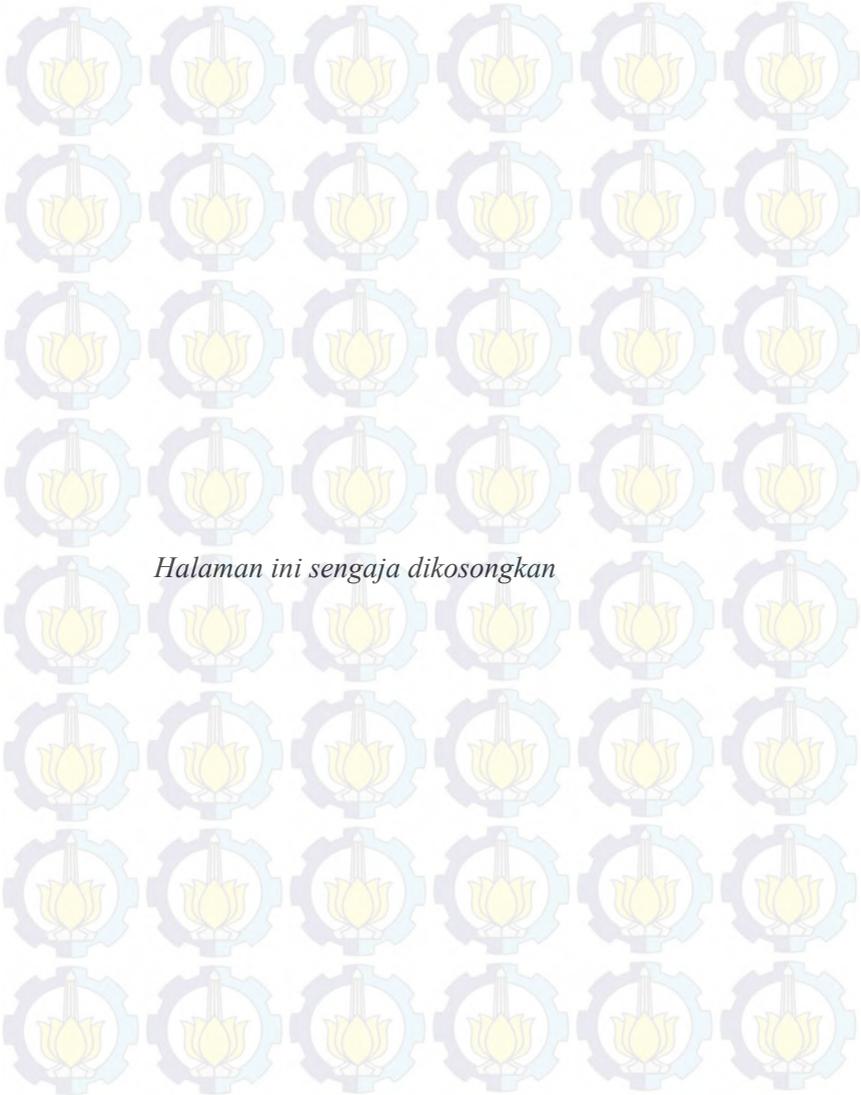
Data dari hasil langkah langkah sebelumnya yang meliputi observasi dan pengujian akan digunakan untuk analisa pada tahap ini dan akan digunakan untuk menjawab permasalahan yang telah diberikan.

h. Penyebab dan mekanisme kegagalan

Setelah dilakukan analisa pada tahap sebelumnya, akan diketahui penyebab kegagalan serta mekanisme kerusakan untuk menjawab tujuan yang telah direncanakan supaya dapat memberikan solusi yang terbaik.

i. Kesimpulan

Penarikan kesimpulan dapat dilakukan setelah melakukan seluruh metode penelitian. Hasil dari kesimpulan ini dapat dimanfaatkan untuk melakukan perawatan serta desain awal *tube drain superheater* agar tidak terjadi kegagalan yang serupa



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB IV DATA DAN ANALISA

4.1 Tube Drain Superheater

Komposisi kimia dari *tube drain superheater* diketahui dengan melakukan pengujian menggunakan spektrometer pada sampel jauh dari kerusakan, selanjutnya didapatkan persentase unsur penyusunnya (tabel 4.1).

Tabel 4.1 Persentase unsur paduan pada *tube drain superheater*

Unsur	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
%	0,15	0,56	0,015	0,015	0,5	1,3	1,1

Menurut standar ASME SA 335 P22 material jenis ini termasuk *chromium-molybdenum low alloy steel* yang sering digunakan sebagai *tube superheater* dan pipa bertekanan tinggi, sehingga sesuai apabila digunakan sebagai material *tube drain superheater*.

Data *tube drain superheater* dituangkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data *tube drain superheater*

Case	Data	
Material	jenis material	<i>low alloy steel</i> (SA 335 P22)
	kekuatan tarik (MPa)	≥ 415 MPa
	periode penggunaan	9 Oktober 1995 – Maret 2015
	<i>Pipe schedule - Ketebalan (wall thickness)</i>	<i>Schedule 80 – 5,5</i>
	diameter luar	60,5
	diameter dalam	49,5
	panjang	6000
batas maksimal temperatur	510°C	



Tabel 4.2 lanjutan

Case		Data
Material	batas maksimal tekanan	60 kg/cm ²
Perawatan	belum pernah ada perawatan	
Lokasi	terhadap HRSG	Di luar HRSG dan sejajar dengan letak <i>superheater</i> .
Parameter operasi	tekanan <i>start-up</i> (kg/cm ²)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 – 5 kg/cm² (HRSG cold) • 6-20 kg/cm² (HRSG warm)
	temperatur <i>start-up</i> (°C)	27°C ————— 330°C 0 menit ————— 90 menit
	tekanan <i>shut-down</i> (kg/cm ²)	18 kg/cm ² ————— 1 kg/cm ² 0 jam ————— 12 jam
	temperatur <i>shut-down</i> (°C)	330°C ————— 27°C 0 jam ————— 12 jam

Skema fungsi dari *tube drain superheater* ditunjukkan pada gambar 4.1

Gambar 4.1 Skema *tube drain superheater* pada HRSG.



Pada saat HRSG mulai *start-up* dari kondisi *shut-down*, sisa uap basah di dalam *tube superheater* harus dibuang lebih dulu supaya tidak merusak sudu-sudu pada *steam turbine*. Uap basah dialirkan menuju *blowdown tank* sebagai tempat pembuangan akhir. *Valve 2* (*valve* menuju *blowdown tank*) akan tertutup secara otomatis apabila tekanan terukur menunjukkan angka 18 kg/cm^2 dan temperaturnya mencapai 330°C . Pada saat yang sama, *valve 1* (*valve* dari *superheater* menuju *steam turbine*) akan terbuka, sehingga uap panas dari *tube superheater* mengalir melalui *main tube* menuju *steam turbine* untuk memutar sudu-sudu nya. Uap panas di dalam *tube drain superheater* akan tetap diam selama HRSG beroperasi.

Pada saat HRSG *shut down*, temperatur dan tekanan di dalam *tube drain superheater* akan turun dari parameter kerja hingga nilainya sama dengan kondisi lingkungan dalam kurun waktu 12 jam. Dari data operasional, dapat disimpulkan bahwa bagian dalam *tube drain superheater* masih dalam rentang temperatur dan tekanan parameter kerja yang ditentukan.

4.2 Observasi Tube Drain Superheater

Observasi dilakukan di permukaan dalam dan luar *tube drain superheater* untuk melihat lokasi kerusakan yang terjadi.



Gambar 4.2 Lokasi pembagian sampel *tube drain superheater*

Untuk mempermudah observasi *tube drain superheater*, maka sampel dipotong satu persatu menjadi 11 bagian. Setiap bagiannya akan dipotong melintang menjadi dua, setengah bagian atas dan bawah supaya dapat diamati pola kerusakan dari permukaan dalam dan luarnya.



4.2.1 Permukaan Dalam *Tube Drain Superheater*

Sampel yang telah dipotong, selanjutnya difoto supaya dapat diamati secara visual (gambar 4.3).

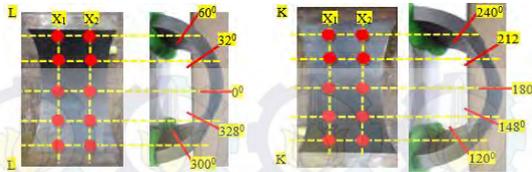


Gambar 4.3 (a) Permukaan dalam setengah bagian atas *tube drain superheater*, dan (b) permukaan setengah bagian bawahnya.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh permukaan *tube drain superheater* masih rata, memiliki warna yang sama, serta tidak terdapat cacat, sehingga dapat disimpulkan bahwa permukaan dalam *tube drain superheater* tidak mengalami kerusakan.

4.2.2 Permukaan Luar *Tube Drain superheater*

Pada permukaan luar *tube drain superheater* terdapat penurunan ketebalan akibat korosi, sehingga diperlukan pengukuran yang dilakukan dari sisi dalam. Pengukuran dilakukan pada 11 bagian sampel *tube drain superheater* (gambar 4.2) setengah bagian atas dan bawah, selanjutnya ditandai dengan lingkaran merah (gambar 4.4). Data pengukuran *tube drain superheater* dituangkan dalam tabel 4.3



Gambar 4.4 (a) Lokasi pengukuran setengah bagian atas dan (b) setengah bagian bawah *tube drain superheater*

Tabel 4.3 Hasil pengukuran *tube drain superheater* (satuan mm)

Bagian	Data		Bagian	Data	
1	X-1	X-2	4	X-7	
	0° = 5,4	0° = 5,4		0° = 2,1	
	32° = 5,1	32° = 5,0		32° = 2,1	
	60° = 5,1	60° = 5,0		60° = 3,1	
	120° = 4,9	120° = 4,8		120° = 5	
	148° = 4	148° = 4		148° = 4,5	
	180° = 5,4	180° = 5,4		180° = 5,1	
	212° = 5,1	212° = 5,2		212° = 4,5	
	240° = 5,1	240° = 5,1		240° = 4,8	
	300° = 5,3	300° = 5,3		300° = 3	
328° = 3,6	328° = 3,9	328° = 2,5			
2	X-3	X-4	5	X-8	X-9
	0° = 3,6	0° = 3,2		0° = 1,6	0° = 0,2
	32° = 4,9	32° = 3,2		32° = 3,3	32° = 3,7
	60° = 4,1	60° = 3,8		60° = 3,1	60° = 3,5
	120° = 4,3	120° = 4,3		120° = 4,9	120° = 5
	148° = 4,5	148° = 4,8		148° = 4,7	148° = 4,7
	180° = 5,2	180° = 5,2		180° = 4,9	180° = 4,9
	212° = 5,2	212° = 4,7		212° = 4,8	212° = 4,7
	240° = 5,1	240° = 5		240° = 5,1	240° = 4,9
	300° = 4,3	300° = 3,3		300° = 3,7	300° = 3,2
328° = 4,0	328° = 3,5	328° = 2,7	328° = 3,7		
3	X-5	X-6	6	X-10	X-11
	0° = 2,7	0° = 2,5		0° = 1,3	0° = 1,6
	32° = 2,7	32° = 2,7		32° = 2,7	32° = 2,7
	60° = 3,3	60° = 3,1		60° = 3,4	60° = 3,6
	120° = 4,8	120° = 4,6		120° = 4,7	120° = 4,8
	148° = 4,9	148° = 4,6		148° = 4,8	148° = 4,8
	180° = 5,1	180° = 5,1		180° = 5	180° = 4,9
	212° = 5,2	212° = 4,9		212° = 5	212° = 4,8
	240° = 5,3	240° = 5,1		240° = 4,9	240° = 5
	300° = 3,3	300° = 3,1		300° = 2,9	300° = 3,3
328° = 2,9	328° = 2,6	328° = 2,5	328° = 2,8		



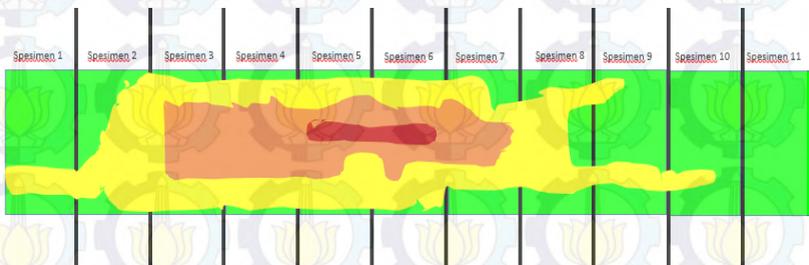
Tabel lanjutan

7	X-12	X-13	9	X-16	X-17
	0° = 2,3	0° = 2,6		0° = 4,0	0° = 4,4
	32° = 2,6	32° = 2,7		32° = 4,1	32° = 4,1
	60° = 3,5	60° = 4		60° = 3,9	60° = 4,4
	120° = 4,8	120° = 4,7		120° = 4,7	120° = 4,7
	148° = 4,9	148° = 4,9		148° = 4,8	148° = 4,8
	180° = 4,8	180° = 4,8		180° = 5	180° = 5
	212° = 4,8	212° = 4,5		212° = 4,7	212° = 4,7
	240° = 4,9	240° = 4,9		240° = 4,8	240° = 4,8
300° = 4,7	300° = 4,8	300° = 4,0	300° = 4,5		
328° = 2,9	328° = 3,5	328° = 3,8	328° = 3,9		
8	X-14	X-15	10	X-18	X-19
	0° = 3,8	0° = 4,3		0° = 4,0	0° = 4,4
	32° = 3,8	32° = 4,1		32° = 4,1	32° = 4,1
	60° = 3,9	60° = 3,9		60° = 3,9	60° = 4,4
	120° = 4,8	120° = 4,5		120° = 4,7	120° = 4,9
	148° = 4,8	148° = 4,9		148° = 4,7	148° = 4,7
	180° = 4,8	180° = 4,9		180° = 4,7	180° = 4,8
	212° = 4,6	212° = 4,7		212° = 4,5	212° = 4,8
	240° = 4,7	240° = 4,8		240° = 4,5	240° = 4,9
300° = 4,8	300° = 4,7	300° = 4,0	300° = 4,5		
328° = 3,9	328° = 3,9	328° = 3,8	328° = 3,9		
11	X-22		X-21		
	0° = 4,2	180° = 4,8	0° = 4,2	180° = 4,8	
	32° = 4,5	212° = 4,5	32° = 4,8	212° = 4,8	
	60° = 4,5	240° = 4,5	60° = 4,9	240° = 4,9	
	120° = 4,7	300° = 4,7	120° = 4,9	300° = 4,9	
	148° = 4,7	328° = 4,4	148° = 4,7	328° = 4,4	



Tube drain superheater harus memiliki ketebalan minimal 4 mm agar dapat menahan tekanan maksimal standart operasi kerja sebesar 18 kg/cm^2 [11]. Apabila ketebalan *tube drain superheater* pada sekitar kebocoran bernilai ≥ 4 mm maka ketebalan lokasi tersebut masih memiliki kemampuan untuk menahan tekanan maksimal (aman). Daerah dengan ketebalan *tube drain superheater* di bawah 4 mm menunjukkan bahwa di lokasi tersebut sudah tidak mampu menahan tekanan maksimal operasi kerjanya (tidak aman).

Penurunan ketebalan pada *tube drain superheater* dimulai dari *outer surface*. Lingkaran berwarna hijau menunjukkan bahwa ketebalan *tube drain superheater* pada daerah tersebut masih aman. Pada gambar 4.5 seluruh bagian bawah *tube drain superheater* masih berwarna hijau, sehingga bagian bawah dianggap masih aman. Pada bagian atas berbagai nilai ketebalan ditunjukkan dengan warna berbeda yang lebih jelasnya dituangkan pada gambar 4.6.



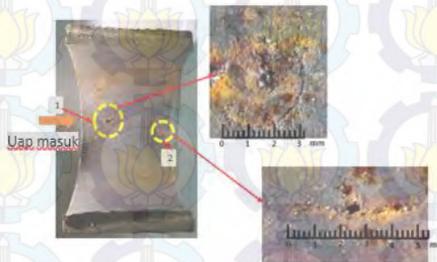
Gambar 4.6 Sketsa penurutan ketebalan setengah bagian atas di sekitar kebocoran

Ketebalan dari *tube drain superheater* pada setengah bagian atas masih aman di daerah yang jauh dari kebocoran. Semakin ke dalam, ketebalan semakin menurun dan terfokus di tengah *tube drain superheater* yang ditunjukkan dengan warna merah. Gambar 4.6 menunjukkan jangka waktu serta jumlah media korosif yang kontak dengan logam. Kerusakan permukaan di sekitar kebocoran mengikuti bentuk genangan air yang kontak



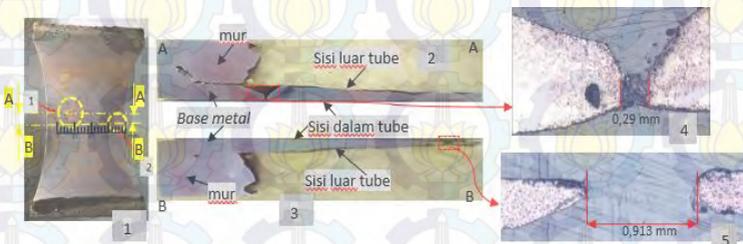
dengan permukaan *tube drain superheater*. Permukaan logam yang semakin lama kontak dengan air, maka pada lokasi tersebut akan mengalami penurunan ketebalan yang progresif hingga berlubang (ditengarai dengan kebocoran) karena reaksi antara air dan logam terjadi secara terus menerus (warna merah).

- **Kebocoran**



Gambar 4.7 Lokasi kebocoran (a) pertama dan (b) kedua.

Terdapat dua kebocoran yang memiliki bentuk berbeda. Pada kerusakan pertama, lubang kebocoran yang ditemui memiliki diameter 0,6 dan ditemui kerusakan di sekitarnya berupa lingkaran dengan diameter 3,2 mm. Kerusakan yang kedua memiliki lubang kebocoran sebesar 0,4 mm dan kerusakan yang terbentuk memanjang searah dengan aliran gas sepanjang 5,4 mm.



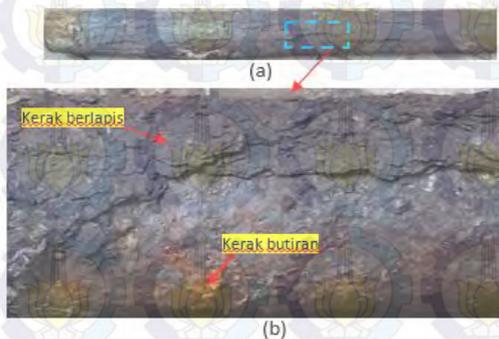
Gambar 4.8. (1) Lokasi kebocoran yang dipotong pada garis A dan B *tube drain superheater*. (3) Penampang makroskopik pada potongan A-A dan (4) B-B. (5) Penampang pada lokasi kebocoran pertama dan dua (6) dengan perbesaran 50x



Arah penurunan ketebalan dan kebocoran yang terjadi pada *tube* dapat dilihat dengan memotong tepat pada titik kebocoran. Pemotongan dilakukan menggunakan *wire cut* pada posisi A-A dan B-B seperti yang ditunjukkan (gambar 4.8). Dari potongan A-A, terlihat bahwa kebocoran pertama mengarah dari sisi luar *tube drain superheater* menuju ke dalam. Pada sisi luar *tube drain superheater*, diameter lubang lebih besar yaitu 4,2 mm dan semakin mengecil hingga menembus sisi dalam sebesar 0,29 mm. Lubang yang terbentuk terlihat seperti akibat adanya tetesan air pada lokasi tersebut. Pada potongan B-B kebocoran tampak akibat dari penurunan ketebalan pada sisi luar tube yang sangat besar hingga mencapai ketebalan kritis dan berlubang. Kebocoran terlihat seperti goresan memiliki lebar 0.3 mm dan panjang 0,913 mm akibat adanya kontak dengan air dalam jangka waktu yang lama.

- **Kerak**

Penurunan ketebalan pada *tube drain superheater* disertai dengan terbentuknya kerak akibat korosi. Kerak tersebut memiliki penampakan yang berbeda. Pertama, kerak yang tertinggal di permukaan *tube drain superheater* berupa butiran dengan warna kuning kecoklatan. Kedua, kerak mudah terkelupas yang berlapis dan berwarna hitam.



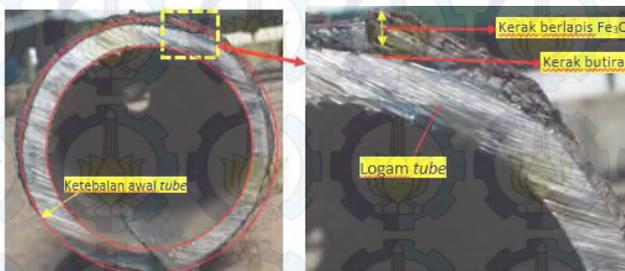
Gambar 4.9 (a) Potongan sampel, (b) perbedaan letak kerak berlapis dan butiran.



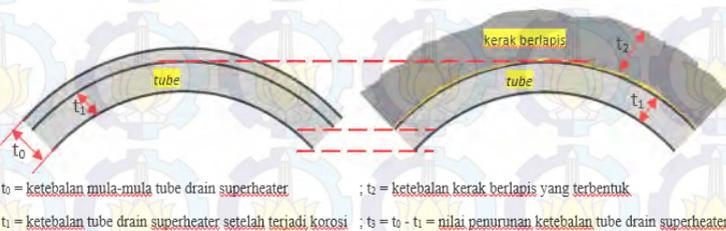
Kerak berlapis dan kerak butiran diuji untuk mengetahui komposisi kimia serta kontaminan yang terkandung di dalamnya (tabel 4.4).

Tabel 4.4 Senyawa dan kontaminan yang terdapat pada kerak berlapis dan butiran

Nama sampel	Nama komposisi kimia	Kontaminan
Kerak berlapis	<i>Iron oxide</i> ; Fe_3O_4	<i>Chloride</i> ; 1060ppm
Kerak butiran	<i>Iron oxide</i> ; Fe_2O_3	<i>Chloride</i> ; 600ppm



Gambar 4.10 Kerak berlapis dan kerak butiran yang telah diuji X-RD dan Argentometri.



Gambar 4.11 Ilustrasi penurunan ketebalan yang terjadi (a) dan (b) kerak berlapis yang terbentuk

Pada lokasi tertentu (gambar 4.10) terdapat penurunan ketebalan dan kerak berlapis yang terbentuk dengan nilai seperti pada tabel 4.5.

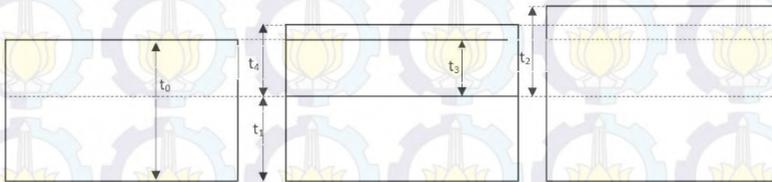


Tabel 4.5 Data awal perhitungan ketebalan

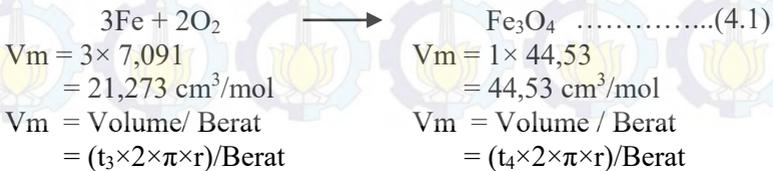
No	Simbol	Nilai
1	t_0	ketebalan mula-mula tube drain superheater
2	t_1	ketebalan tube drain superheater setelah terjadi korosi
3	t_2	ketebalan kerak berlapis yang terbentuk
4	t_3	nilai penurunan ketebalan tube drain superheater
5	t_4	perhitungan ketebalan produk korosi
6	$V_m \text{ Fe}$	volume jenis Fe
7	$V_m \text{ Fe}_3\text{O}_4$	volume jenis Fe_3O_4

Dari data ketebalan yang didapatkan, dipertanyakan apakah kerak berlapis hanya merupakan hasil reaksi antara air dengan permukaan luar *tube drain superheater* atau terdapat elemen lain karena nilai ketebalannya yang cukup besar. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan secara sederhana untuk memastikan hal tersebut.

Reaksi yang terjadi pada pembentukan kerak berlapis ditunjukkan pada persamaan 4.1. Diasumsikan tidak ada unsur lain selain Fe yang bereaksi dengan oksigen.



Gambar 4.12 Ilustrasi penurunan ketebalan





Apabila berat dari $\text{Fe} = \text{Fe}_3\text{O}_4$ yang bereaksi adalah sama (W_0), serta luasan yang bereaksi sama (A_0) maka parameter tersebut bisa diabaikan.

$$\begin{aligned} 21,273 \text{ cm}^3/\text{mol} &= (t_3 \times A_0)/W_0 & 44,53 \text{ cm}^3/\text{mol} &= (t_4 \times A_0)/W_0 \\ 21,273 \text{ cm}^3/\text{mol} &= 1,5 & 44,53 \text{ cm}^3/\text{mol} &= t_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sehingga } t_4 &= \frac{1,5 \text{ mm} \times 44,53 \text{ cm}^3/\text{mol}}{21,273 \text{ cm}^3/\text{mol}} \\ &= 3,14 \text{ mm} \end{aligned}$$

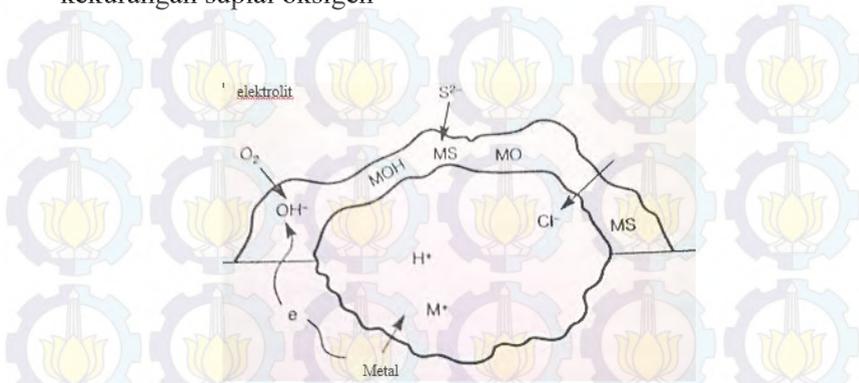
Dari hasil perhitungan diketahui bahwa $t_4 < t_2$, dapat disimpulkan bahwa ketebalan kerak berlapis jauh lebih besar dari ketebalan wajar produk korosi. Terdapat kemungkinan bahwa ketebalan kerak yang berlebih tersebut telah bercampur dengan *glasswool* akibat adanya air. Sifat kerak berlapis yang rapuh dan mudah terkelupas membuktikan bahwa *glasswool* telah ikut bereaksi dengan produk korosi.

Hasil pengujian pada kerak berlapis dan butiran menunjukkan bahwa air sebagai media korosif telah terkontaminasi. Sumber air dapat berasal dari hujan, lokasi perusahaan yang terletak dipinggir pantai dan wilayah perindustrian memungkinkan terkontaminasinya air dengan natrium klorida bersama dengan polutan industri. Polutan industri mengandung partikel sulfida, klorida, dan asam sulfat dengan konsentrasi 2-1000 mg/m³[14]. Air yang membentuk genangan akan mengakibatkan permukaan *tube drain superheater* terhubung secara elektrolit dan kerak berfungsi menjadi celah (tempat terjebaknya air).

Pada kerak dan permukaan *tube* terdapat perbedaan potensial yang mengakibatkan terjadinya korosi celah. Daerah katoda baru terbentuk di area kelebihan suplai oksigen dimana terjadi korosi merata yang membutuhkan banyak oksigen dalam reaksi



reduksinya sedangkan lokasi anoda baru merupakan wilayah yang kekurangan suplai oksigen



Gambar 4.13 Ilustrasi mekanisme korosi celah di bawah deposit metal jika elektrolitnya mengandung Cl^- [8]

Reaksi yang terjadi secara terus menerus akan membuat berkurangnya *liquid* dan oksigen di dalam celah hingga reaksi reduksi pada sekitar celah akan terhenti. Reaksi oksidasi yang terus terjadi mengakibatkan celah kelebihan ion positif. Kecenderungan ion positif untuk menjadi stabil membuat ion tersebut menarik ion negatif yang lebih agresif yaitu Cl^- ke dalam celah membentuk senyawa M_xCl_y . Di dalam air senyawa tersebut akan terurai menjadi *metal hydroxide* dan *free acid*. Laju pelarutan logam yang semakin meningkat pada daerah anodik akan mempercepat migrasi dari ion klorida, sehingga akan memperbanyak terbentuknya M^+ dan Cl^- .

- **Susunan isolasi**

Untuk melindungi dan menjaga temperatur di dalam *tube drain superheater* tetap stabil, maka diperlukan isolasi dengan data seperti pada tabel 4.6

Tabel 4.6 Observasi pada permukaan luar *tube drain superheater*

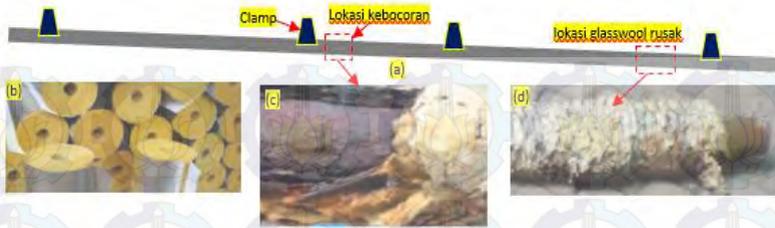
Case		Kondisi awal	Kondisi saat ditemukan
Isolasi	bahan	<i>glasswool</i>	<i>glasswool</i> lembab cenderung basah
	ketebalan	50 mm	menyusut hingga 25 mm
	warna	kuning cerah	keabuan karena memudar
Penutup isolasi	bahan	aluminium foil	aluminium foil mulai terkelupas
	ketebalan	2 mm	2 mm, beberapa diantaranya berubah posisi
	warna	abu-abu cerah	abu-abu kusam

Terdapat perbedaan antara kondisi awal dan saat ditemukan pada susunan isolasi *tube drain superheater* (gambar 4.14)



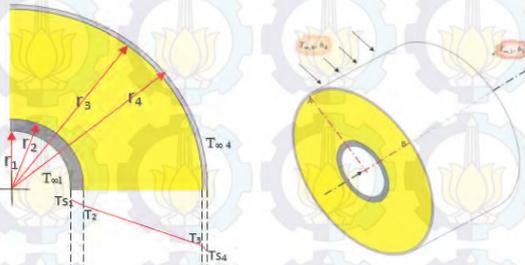
Gambar 4.14 Sketsa instalasi isolasi pada *tube drain superheater*
 (a) susunan kondisi awal, (b) kondisi saat ditemukan

Isolasi *glasswool* yang digunakan pada *tube drain superheater* memiliki serat fiber yang relatif lebih panjang dari pada jenis *mineral wool* yang lain sehingga tidak mudah robek. Isolasi tersebut hanya dapat menerima temperatur kerja hingga 230 °C, sedangkan temperatur operasi kerja *tube drain superheater* yang mencapai angka 330 °C. *Glasswool* tersebut akan mudah rusak karena tidak bisa menahan temperatur kerja yang tinggi, sehingga panas yang keluar dari *tube drain superheater* cukup besar.



Gambar 4.15 Lokasi pengambilan gambar isolasi (a), (b) warna isolasi baru, (c) isolasi pada lokasi kebocoran dan (d) *glasswool* jauh dari kebocoran yang telah rusak .

Pada gambar 4.15 menunjukkan bahwa isolasi telah memudar, lembab, dan basah. Lokasi pengambilan gambar yang cukup jauh dari kebocoran mengindikasikan bahwa penyebab kerusakan dari isolasi tidak dipengaruhi oleh lingkungan luar maupun instalasi isolasi. Terdapat kemungkinan bahwa kerusakan tersebut dipengaruhi oleh perpindahan panas yang tidak berlangsung dengan baik di dalam instalasi isolasi.



Gambar. 4.16 Sketsa pertukaran panas pada *tube drain superheater*

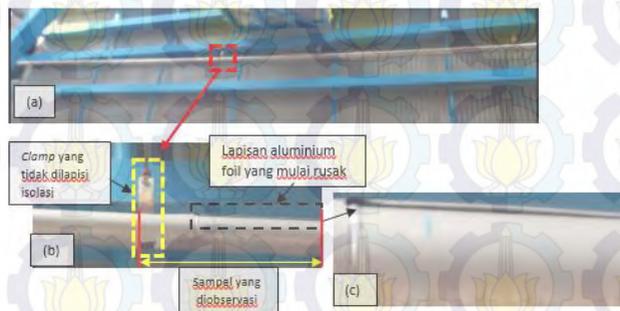
Berdasarkan data dari instalasi *tube drain superheater* dilakukan perhitungan secara sederhana (lampiran), selanjutnya diketahui bahwa temperatur di permukaan luar *tube drain superheater* masih cukup tinggi. Kondisi lingkungan yang berubah ubah dan relatif lebih rendah menyebabkan panas yang



keluar dari *tube drain superheater* akan bertemu dengan udara mengandung uap air di dalam *glasswool* yang temperaturnya jauh lebih rendah.

Isolasi yang tertutup rapat menyebabkan terjadinya pengembunan di permukaan dalam aluminium foil dan permukaan luar *tube drain superheater* sehingga membentuk titik-titik air pada permukaannya. *Glasswool* dapat kehilangan fungsinya sebagai isolasi apabila mengandung air yang membuatnya basah dan lembab [5].

Pada saat ditemukan, terdapat kerusakan pada permukaan aluminium foil. Posisinya lebih turun dari susunan awal akibat ketebalan *glasswool* yang menyusut, kondisi tersebut semakin parah karena lokasi *tube drain superheater* berada di luar ruangan, sehingga aluminium foil kontak langsung dengan lingkungan luar seperti hujan.



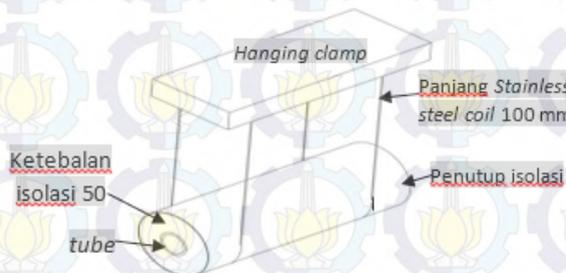
Gambar 4.17 (a) *Tube drain superheater* yang diisolasi dan dicekam menggunakan *hanging clamp* (b) lokasi *hanging clamp* di permukaan sampel *tube drain superheater*, (c) gambar perbesaran lapisan aluminium foil yang rusak.

Pada gambar 4.17 terlihat bahwa aluminium foil mulai rusak, dengan keadaan *hanging clamp* yang terkorosi. *Hanging clamp* merupakan peralatan yang digunakan untuk memegang *tube drain superheater* supaya tetap pada posisi yang ditentukan, serta menjaga *glasswool* melekat di permukaannya. *Hanging*



clamp yang dipasang pada *tube drain superheater* bersentuhan langsung dengan *glasswool* dan tidak ditutup aluminium foil seperti permukaan yang lain (gambar 4.17). *Hanging clamp* dipasang setiap jarak 1,5 – 2 meter sepanjang *tube drain superheater*. Pada instalasi isolasi *tube drain superheater*, lokasi *hanging clamp* tidak tertutup oleh aluminium foil, sehingga dapat menjadi laluan air dan udara dari atmosfer untuk masuk sehingga membuatnya basah. Masuknya air ke dalam isolasi melalui *hanging clamp*, mengakibatkan ketebalan *glasswool* semakin menyusut. Semakin banyak air yang masuk, maka aluminium foil yang mulanya menutupi *glasswool* dengan baik, akan menurun posisinya dan memperparah keadaan dengan membentuk laluan air yang baru.

Hasil penelitian dari penulis S.Winnink pada fenomena yang sama dalam buku “*Corrosion under insulation guidelines*”, menjelaskan bahwa peralatan yang berdekatan seperti peralatan penunjang dan besi konstruksi harus memiliki jarak minimal dengan pipa terisolasi lebih dari 2x desain ketebalan isolasinya (gambar 4.18) serta isolasi yang tertutup dengan sempurna. Hal ini dilakukan supaya geometri isolasi tidak mudah rusak sehingga memungkinkan air dari luar masuk ke dalam instalasi [12].



Gambar 4.18 Susunan isolasi yang sesuai standar [12].

Dari penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa isolasi harus tertutup sempurna oleh penutup isolasi, tidak diijinkan untuk kontak dengan udara luar maupun logam lain, sedangkan



pada *tube drain superheater* aluminium foil tidak menutupi permukaan *glasswool* pada lokasi *hanging clamp* sehingga memudahkan air untuk masuk. Kedua, *hanging clamp* tidak boleh bersentuhan langsung dengan pipa terisolasi, harus ada jarak minimal 2x ketebalan isolasi dengan konstruksinya. Pipa terisolasi dihubungkan pada *hanging clamp* dengan cara memasang *stainless steel coil* terlebih dahulu. Berbeda dengan konstruksi isolasi pada *tube drain superheater*, dimana *hanging clamp* bersentuhan langsung dengan *glasswool*.

Lokasi kebocoran ditemukan berada di dekat *hanging clamp* setelah kerak tebal dibersihkan dari permukaan *tube drain superheater* (gambar 4.19).



Gambar 4.19 Kondisi isolasi dan kerak yang terbentuk di sekitar kebocoran

Dari penjelasan di atas menunjukkan bahwa susunan isolasi pada *tube drain superheater* tidak sesuai dengan standar, sehingga wajar apabila ada air yang masuk ke dalamnya. Keadaan tersebut diperparah dengan isolasi *glasswool* yang beroperasi di atas temperatur ijinnya sehingga menyebabkan pengembunan terjadi di atas permukaan *tube drain superheater*.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian analisa kegagalan pada *tube drain superheater* memiliki beberapa kesimpulan yaitu :

1. Kerusakan *tube drain superheater* tidak dipengaruhi oleh pengoperasian kerja apabila dilihat dari permukaan dalamnya, akan tetapi disebabkan oleh penurunan ketebalan secara progresif akibat korosi yang dimulai dari permukaan luar.
2. Korosi terjadi karena permukaan luar kontak dengan air sebagai media korosif yang dapat berasal dari luar dan dari panas yang mengembun pada permukaan *tube drain superheater*.
3. Air dari luar dapat memasuki isolasi melalui *hanging clamp* yang kontak langsung dengan *glasswool*, sedangkan udara panas yang mengembun disebabkan karena temperatur di permukaan *tube drain superheater* jauh lebih tinggi dari temperatur yang mampu ditahan oleh *glasswool*.

5.2 Saran

Tindakan pencegahan yang dapat dilakukan untuk menghindari terjadinya kegagalan yaitu:

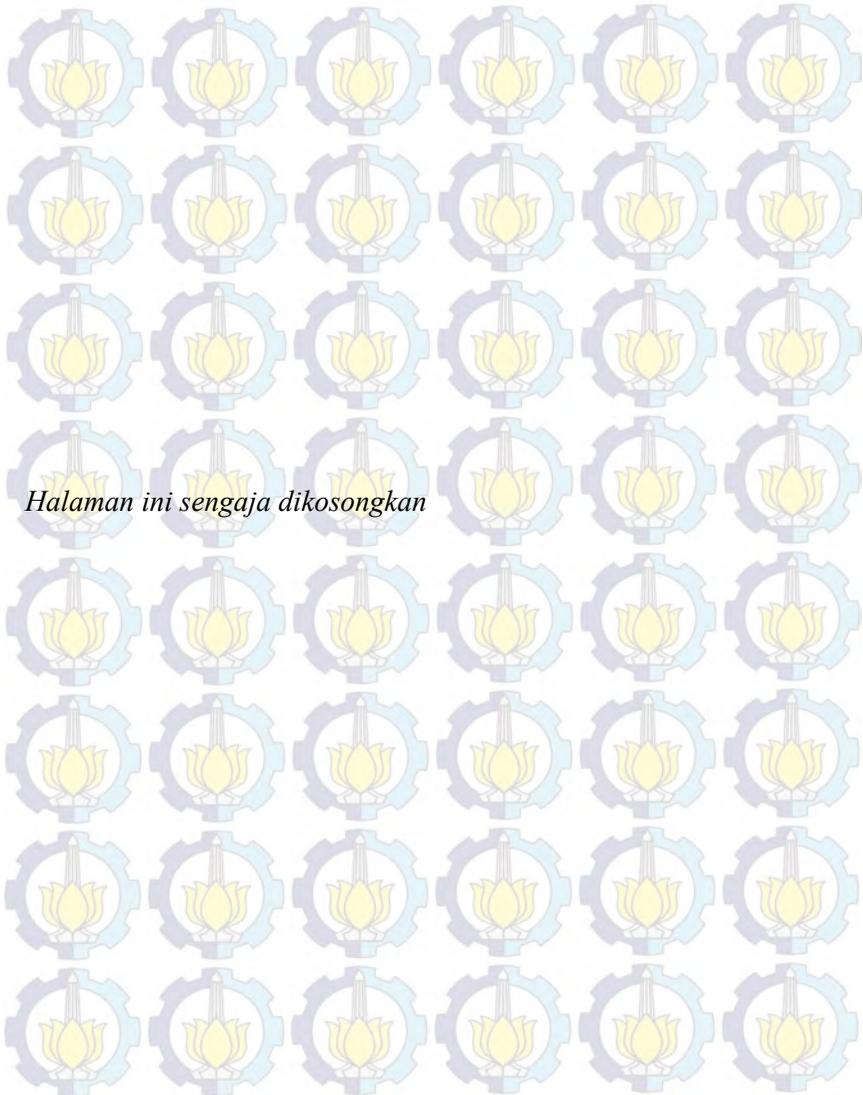
1. Diperlukan perbaikan instalasi isolasi *tube drain superheater* supaya tidak ada udara maupun air yang bisa kontak langsung dengan logam.
2. Sistem kontrol secara periodik kondisi luar dari *tube drain superheater*
3. Diperlukan peninjauan ulang tentang pemilihan isolasi yang disesuaikan dengan parameter kerja *tube drain superheater*





DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ganapathy,V. 2015. Steam Generators and Waste Heat Boilers: For Process and Plant Engineers. USA : Taylor and Francis Group CLC
- [2] Cockerill Maechanical Industries.1993.**Design Manual Heat Recovery Steam Generator**.Gresik.PT.PJB Gresik.
- [3] ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys.
- [4] http://id.wikipedia.org/wiki/Insulasi_termal diakses pada tanggal 25 April 2015.
- [5] Kelly,Michael, Industrial Insulation Material Science and Application,AS, 2014.
- [6] National Association of Corrosion Engineer (NACE). Basic Corrosion Course. Loop South Houston Texas 77027
- [7] Joseph R Davis 2000 Corrosion :Understanding the Basics USA ASM International.
- [8] Fontana, Mars G. 1987. **Corrosion Engineering**. Singapore : McGraw-Hill.
- [9] Agarwal,A . 2014 . Open Journal of Stomatology 4. Greater Noida India. Scirp.org
- [10] Jones, Denny A. 1996. Principles and Prevention of Corrosion. New Jersey, Amerika : Prentice-Hall, Inc.
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki> diakses pada tanggal 8 mei 2015.
- [12] S.Winnik.[].Corrosion under insulation (CUI) guidelines. New York Washington,DC. CRC Press.
- [13] Geary,W. 2013. Analysis of corrosion under insulation failure in a carbon steel refinery hydrocarbon line. UK.
- [14] ASM International Volume 13, *Corrosion :Fundamental testing and protection*, 2003.
- [15] Metals Handbook, Volume 10, *Failure Analysis and Preventions*, 1975, USA.
- [16] Chang Raymond. 2003. *The Essential Concepts*. USA. McGraw-Hill





BIOGRAFI PENULIS



Esty Wulandari, lahir tanggal 19 Maret 1993 di Kota Kediri adalah anak sulung dari pasangan Sugeng Triyono dan Endah Sri Wulandari. Penulis mulai mengenyam pendidikan di TK Dharma Wanita (1997-1999), SDS Pawayatan Dhaha I (1999-2005), SMPN 1 Kediri (2005-2008), SMAN 2 Kediri (2008-2011), dan kemudian memutuskan untuk melanjutkan bangku kuliah di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menyelesaikan masa kuliah, penulis aktif mengikuti beberapa organisasi mahasiswa yaitu Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) sebagai staff hubungan luar periode 2012/2013 dan Sekertaris Umum periode 2013/2014. Saya pernah dipercaya sebagai asisten dosen pada mata kuliah Kinematika Mekanisme dan sebagai asisten praktikum di Laboraturium Metalurgi. Untuk mengaplikasikan ilmu dibangku perkuliahan pada bidang industri, penulis mengambil Tugas Akhir mengenai Analisa Kegagalan *Tube Drain Superheater* pada *Heat Recovery Steam Generator* yang diselesaikan pada tanggal 27 Januari 2016.



halaman ini sengaja dikosongkan