



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

ANALISIS KEGAGALAN PIPA *ELBOW* DARI *HIGH PRESSURE HEATER* (HPH) KE *DEAERATOR* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)

Dwi Ariyanto
0211144000008

Dosen Pembimbing :
Suwarno, ST., MSc., PhD
198005202005011003

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

ANALISIS KEGAGALAN PIPA *ELBOW* DARI *HIGH PRESSURE HEATER* (HPH) KE *DEAERATOR* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)

Dwi Ariyanto
0211144000008

Dosen Pembimbing :
Suwarno, ST., MSc., PhD
198005202005011003

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

***FAILURE ANALYSIS OF ELBOW PIPES FROM HIGH
PRESSURE HEATER (HPH) TO DEAERATORS IN
STEAM POWER PLANTS***

Dwi Ariyanto
0211144000008

Advisor Lecturer :
Suwarno, ST., MSc., PhD
198005202005011003

Department Of Mechanical Engineering
Faculty Of Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019

**ANALISIS KEGAGALAN PIPA *ELBOW* DARI
HIGH PRESSURE HEATER (HPH) KE *DEAERATOR*
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Dwi Ariyanto

NRP. 0211144000008

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Suwarno, ST., M.Sc., PhD (Pembimbing)
NIP. 198005202005011003
2. Fahmi Mubarak, ST., M.Sc (Penguji I)
NIP. 197801152003121002
3. Indra Sidharta, ST., M.Sc (Penguji II)
NIP. 198006192006041004
4. Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA (Penguji III)
NIP. 195012111985021001

SURABAYA

JANUARI, 2019

ANALISIS KEGAGALAN PIPA *ELBOW* DARI *HIGH PRESSURE HEATER* (HPH) KE *DEAERATOR* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Nama Mahasiswa : Dwi Ariyanto
NRP : 0211144000008
Jurusan : Teknik Mesin, FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., MSc., PhD

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah salah satu pemasok listrik terbesar di Indonesia. Sehingga harus beroperasi setiap hari yang bisa mengakibatkan kegagalan pada komponen – komponennya. Umumnya suatu kegagalan berkaitan dengan adanya perpatahan, keausan, dan pengikisan. Salah satu contohnya adalah lubang pada pipa elbow dari High Pressure Heater (HPH) ke Deaerator karena pengikisan yang mengakibatkan kebocoran.

Analisis ini dimulai dari pengamatan visual untuk mengetahui bentuk dari benda uji. Kemudian pengukuran dilakukan untuk mengetahui dimensi dari benda uji. Selanjutnya dilakukan wall thickness test untuk mengetahui profil ketebalan dari benda uji. Kemudian dilakukan pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro. Dan yang terakhir dilakukan pengujian spectrometry untuk mengetahui komposisi kimia.

Berdasarkan analisis ini, didapatkan hasil berupa penyebab kegagalan yang terjadi yaitu pengikisan karena adanya proses korosi erosi oleh aliran dua fasa (steam dan air). Dan mekanisme kegagalannya dimulai dari aliran dua fasa menabrak permukaan dalam pipa dan mengakibatkan pengikisan. Selanjutnya, kontak antara besi (Fe) dengan air mengakibatkan korosi. Hal tersebut terjadi secara terus menerus hingga terjadilah lubang hanya dalam waktu 7 tahun dari awal mula pipa digunakan.

Kata kunci : analisis kegagalan, pipa elbow, high pressure heater, deaerator.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**FAILURE ANALYSIS OF ELBOW PIPES FROM HIGH
PRESSURE HEATER (HPH) TO DEAERATORS IN STEAM
POWER PLANTS**

Student Name : *Dwi Ariyanto*
NRP : *0211144000008*
Department : *Mechanical Engineering, FTI – ITS*
Advisor Lecturer : *Suwarno, ST., MSc., PhD*

ABSTRACT

The Steam Power Plant is one of the largest electricity suppliers in Indonesia. The Steam Power Plant with the rankine cycle system continues to operate every day which results in failure of its components. Generally a failure is related to the existence of fracture, wear and tear. One example is the hole in the elbow pipe from High Pressure Heater (HPH) to the Deaerator because of erosion which results in leakage.

This analysis starts from visual observation to find out the shape of the test object. Then measurements are taken to determine the dimensions of the test object. Next is a wall thickness test to determine the thickness profile of the specimen. Then metallographic testing was carried out to determine the microstructure. And the last spectrometry test is carried out to determine whether or not there are additional chemical elements.

Based on this analysis, the results obtained in the form of the cause of failure that occurs is erosion due to the erosion corrosion process by the flow of two phases (steam and water). And the mechanism of failure begins with the flow of two phases crashing into the surface of the pipe and resulting in erosion. Furthermore, contact between iron (Fe) and water results in corrosion. This happened continuously until a hole occurred in just 7 years from the start of the pipe being used.

Keywords: *failure analysis, elbow pipe, high pressure heater, deaerator.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

ميجر لان محر لاء الله امسبلا

Puji syukur Penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang atas karunia-Nya sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analisis Kegagalan Pipa *Elbow* Dari *High Pressure Heater* (HPH) Ke *Deaerator* Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)”. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Orang tua penulis, Ayahanda **Muchson** dan Ibunda **Siti Marwiyah** yang selalu memberikan bantuan baik dalam hal do'a, materi, motivasi, serta dengan kesabaran dan ketelatenan dalam membimbing hingga sekarang. “Allahummaghfirlii dzunubii waa liwaa lidaiyya warhamhumaa kamaa robbayaanii shoghiroo”. Dan juga saudara kandung penulis, Mbakyu **Yunie Faikoh** yang selalu memberikan bantuan baik dalam hal do'a dan motivasi.
2. Bapak **Suwarno, ST., M.Sc., PhD** selaku dosen pembimbing yang dengan sabar dan tidak henti-hentinya memberikan arahan, dukungan, motivasi, pengalaman hidup dan ilmu yang tak ternilai harganya sehingga Penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini. Tanpa kesabaran bapak, penulis yakin tugas akhir ini tidak akan selesai pada waktu yang tepat.
3. Bapak **Dr. Eng. Sutikno, ST., MT, Fahmi Mubarak, ST., M.Sc., PhD, Ir. Hari Subiyanto, M.Sc**, selaku dosen penguji seminar proposal tugas akhir dan Bapak **Indra Sidharta, ST., M.Sc, Fahmi Mubarak, ST., M.Sc., PhD, Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA** selaku dosen penguji sidang tugas akhir atas semua kritik, saran dan masukan serta meluangkan banyak waktunya bagi penulis sehingga

- penulisan tugas akhir ini bisa lebih baik.
4. Bapak **Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, M.Sc** selaku dosen wali penulis selama di Teknik Mesin FTI-ITS, yang karena jasanya penulis bisa mengejar ketertinggalan penulis dalam bidang akademik.
 5. Seluruh **dosen** dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS.
 6. **Angkatan M57** Teknik Mesin ITS selaku teman seperjuangan penulis, beserta seluruh **panitia POROS 2014**, terima kasih buat *personal character* yang kalian berikan.
 7. **AREK METAL** yang selalu menemani Penulis saat-saat mengerjakan Tugas Akhir di Laboratorium Metalurgi siang hari, malam hari hingga dini hari.
 8. **Semua pengurus Mesin Music Club 2015** yang telah bersama – sama belajar banyak tentang organisasi, musik, dan kepribadian seseorang dalam menghadapi setiap persoalan.
 9. **Perhimpunan Mahasiswa Kebumen ITS**, yang membantu telah memberikan arahan – arahan mengenai kehidupan perkuliahan.
 10. **Wakidut Family** mulai dari **Juragan, Fuad, Pebrot, Jembi, Asa, Hopetz, Bombogi, Karyo, dan Bachtiar** serta orang-orang yang sering singgah, rumah itu selalu jadi tempat persinggahan terbaik untuk istirahat.
 11. Tidak lupa, semua pihak yang telah banyak membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Penulis mengharapkan kritik serta saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Akhir kata semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB 2 DASAR TEORI	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)	5
2.2 Alur Proses Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)...	6
2.3 Komponen – Komponen PLTU.....	7
2.3.1 <i>Boiler</i>	7
2.3.2 Turbin	8
2.3.3 Kondensor	9
2.3.4 Pompa.....	9
2.3.5 <i>Feedwater Heater</i>	9
2.3.6 <i>Deaerator</i>	11
2.4 Jenis – Jenis Kegagalan pada Pipa <i>elbow</i>	12
2.5 Korosi	13
2.6 Erosi	14

2.7	Korosi Erosi	14
2.7.1	Aliran Turbulen.....	15
2.7.2	<i>Solid Particle Impingement</i>	16
2.7.3	<i>Liquid Droplet Impingement</i>	17
2.7.4	<i>Air Bubble Impingement</i>	18
2.7.5	<i>Cavitation</i>	19
2.8	Pengaruh Kecepatan terhadap Korosi Erosi.....	20
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		23
3.1	<i>Cause and Effect Diagram</i> atau <i>Fishbone Diagram</i> ...	23
3.2	Peralatan Penelitian.....	23
3.3	Diagram Alir Penelitian	25
BAB 4 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		29
4.1	Data Operasional Pipa <i>Elbow</i>	29
4.2	Pengamatan Visual.....	30
4.3	<i>Wall Thickness Test</i>	34
4.4	Pengukuran Ketebalan	36
4.5	Pengujian <i>Spectrometry</i>	41
4.6	Pengujian Metalografi.....	42
4.7	Penyebab dan Mekanisme Kegagalan.....	46
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		49
5.1	Kesimpulan	49
1.2	Saran	50
DAFTAR PUSTAKA		51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Posisi Pipa <i>Elbow</i> pada Alur Proses Kerja PLTU Sebalang	2
Gambar 1.2	Kegagalan yang terjadi pada Pipa <i>Elbow</i>	3
Gambar 2.1	Siklus <i>Rankine</i> pada PLTU [1].....	5
Gambar 2.2	Alur Proses Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sebalang.....	6
Gambar 2.3	Komponen Boiler jenis <i>Circulating Fluidized-Bed Boiler</i> [6].....	7
Gambar 2.4	Komponen Turbin Uap [6]	8
Gambar 2.5	<i>Closed Feedwater Heater Tipe U</i> [6]	10
Gambar 2.6	<i>Deaerator</i> , (a) tipe <i>Tray</i> (b) tipe <i>Spray</i> [6].....	11
Gambar 2.7	Penampang Aliran Turbulen.....	15
Gambar 2.8	Contoh Kerusakan oleh Aliran Turbulen [16].....	16
Gambar 2.9	Proses Abrasi karena <i>Solid Particle Impingement</i> ..	16
Gambar 2.10	Contoh Kerusakan karena Proses <i>Solid Particle Impingement</i> [16].	17
Gambar 2.11	Proses <i>Liquid Droplet Impingment</i>	17
Gambar 2.12	Contoh Kerusakan karena Proses <i>Liquid Droplet Impingment</i> [16].	18
Gambar 2.13	Abrasi karena <i>Air Bubble Impingement</i> [16].	19
Gambar 2.14	Proses <i>Cavitation</i>	20
Gambar 2.15	Contoh Kerusakan karena Proses <i>Cavitation</i> [16].	20
Gambar 3.1	<i>Fishbone Diagram</i> Kegagalan Pipa <i>Elbow</i>	23
Gambar 3.2	Diagram Alir Percobaan.	25
Gambar 4.1	Lubang pada Sudut Luar Pipa <i>Elbow</i>	30
Gambar 4.2	Perubahan Warna dan Lubang pada Permukaan Dalam Pipa <i>Elbow</i> . (a) Diameter <i>Steam Drain In</i> , (b) Diameter <i>Steam Drain Out</i>	30
Gambar 4.3	Daerah Sekitar Lubang pada Permukaan Dalam Pipa <i>Elbow</i>	33

Gambar 4.4	Plot <i>Wall Thickness Test</i> dengan jarak antar titik sebesar 2 mm.	34
Gambar 4.5	Plot Pengukuran Ketebalan	36
Gambar 4.6	Penampang Potongan. (a) Potongan A – A, (b) Potongan B – B, (c) Potongan C – C, (d) Potongan D – D, dan (e) Potongan E – E.	37
Gambar 4.7	Plot Spesimen Uji Metalografi.....	42
Gambar 4. 8	Mekanisme Kegagalan pada Pipa <i>Elbow</i>	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Jenis dan Pengertian Kegagalan pada pipa <i>elbow</i>	12
Tabel 4.1	<i>Material Properties</i>	29
Tabel 4.2	Data Operasional Pipa <i>Elbow</i>	29
Tabel 4.3	Hasil Pengamatan Visual pada Pipa <i>Elbow</i>	31
Tabel 4.4	Hasil <i>Wall Thickness Test</i> dengan satuan mm.....	35
Tabel 4.5	Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Depan (Potongan A – A)	38
Tabel 4.6	Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Tengah (Potongan B – B).....	38
Tabel 4.7	Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Tengah (Potongan C – C).....	39
Tabel 4.8	Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Tengah (Potongan D – D)	39
Tabel 4.9	Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Belakang (Potongan E – E)	40
Tabel 4.10	Hasil pengujian komposisi kimia menggunakan <i>spectrometer</i> yang dibandingkan dengan komposisi kimia menurut ASTM A216 <i>grade</i> WCB.....	41
Tabel 4.11	Tabel struktur mikro yang diamati pada sisi kanan spesimen	43

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

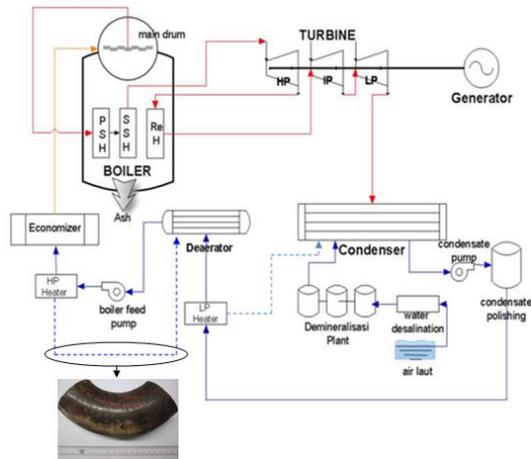
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik dari tahun ke tahun semakin meningkat. Peningkatan ini sejalan dengan meningkatnya laju pertumbuhan ekonomi, laju pertumbuhan penduduk, dan pesatnya perkembangan sektor industri. Hal tersebut menyebabkan konsumsi listrik terus meningkat namun tidak diimbangi dengan jumlah ketersediaan listrik yang ada. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada kuartal I tahun 2018, persentase wilayah yang teraliri listrik atau rasio elektrifikasi Indonesia sebesar 97,13% dengan komposisi : PLN 94,65%; Non-PLN 2,36%; dan LTSHE 0,12% [Kementerian ESDM, 2018]. Salah satu provinsi yang memiliki rasio elektrifikasi rendah dibandingkan provinsi lain pada pulau Sumatera adalah provinsi Lampung yang memiliki rasio elektrifikasi sebesar 93,84% [Kementerian ESDM, 2018]. Defisit listrik di Indonesia sangat besar, khususnya pada PT.PLN (Persero) wilayah Lampung yang memiliki defisit listrik sebesar 165 MW pada tahun 2018. Sehingga pemerintah melalui program percepatan pembangunan pembangkit listrik tahap 35.000 MW pada tahun 2018 mengembangkan Pembangkit listrik thermal berkapasitas 2 x 100 MW yakni Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Lampung atau dikenal dengan nama PLTU Sebalang pada unit 1 dan unit 2 yang menggunakan bahan bakar utamanya adalah batubara.

PLTU Sebalang memiliki beberapa komponen penting dalam menghasilkan listrik. Mulai dari *boiler*, turbin, kondensor, pompa, *feedwater heater*, dan *deaerator*. Dalam pengoperasiannya sering kali ditemukan kegagalan pada beberapa komponen di PLTU. Kegagalan pada suatu peralatan operasional industri dapat disebabkan oleh

berbagai macam hal, baik dari segi operasi, segi desain, maupun dari segi lain yang menyangkut peralatan tersebut. Kegagalan (*failure*) ini dapat didefinisikan sebagai ketidakmampuan suatu material/komponen untuk berfungsi sebagaimana mestinya dengan alasan apa pun. Umumnya suatu kegagalan berkaitan dengan adanya perpatahan, keausan, ataupun pengikisan karena korosi dan erosi.



Gambar 1.1 Posisi Pipa *Elbow* pada Alur Proses Kerja PLTU Sebalang

Salah satu contoh kegagalan pada pembangkit listrik adalah kegagalan pipa *elbow*. Kegagalan tersebut dapat berupa lubang yang mengakibatkan kebocoran karena adanya proses penipisan pada pipa *elbow*. Kegagalan dapat terjadi pada pipa *elbow* yang beroperasi pada temperatur tinggi, tekanan tinggi, dan lingkungan yang abrasif sehingga memungkinkan munculnya variasi mekanisme kegagalan seperti *overheating*, *pitting corrosion*, *creep*, *erosion*, *thermal fatigue*, *corrosion fatigue* dan *stress corrosion cracking*.



Gambar 1.2 Kegagalan yang terjadi pada Pipa Elbow

Untuk itu diperlukan adanya suatu analisis yang menyeluruh untuk mengetahui penyebab dari kegagalan tersebut. Untuk tujuan tersebut, dilakukan kegiatan analisis pengujian pengamatan visual, pengujian *Non Destructive Test* (NDT), pengamatan struktur mikro, dan pengamatan komposisi kimia. Sehingga nantinya dapat diambil langkah-langkah untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama di kemudian hari.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Bagaimana penyebab kegagalan pipa *elbow* dari *High Pressure Heater* (HPH) ke *Deaerator*?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan pipa *elbow* dari *High Pressure Heater* (HPH) ke *Deaerator*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui penyebab kegagalan pipa *elbow* dari *High Pressure Heater* (HPH) ke *Deaerator*?
2. Untuk mengetahui mekanisme kegagalan pipa *elbow* dari *High Pressure Heater* (HPH) ke *Deaerator*?

1.4 Batasan Masalah

Ada beberapa faktor yang tidak terkontrol sehingga dapat mempengaruhi pengambilan data dan analisa. Untuk itu perlu diberikan batasan agar mempermudah menganalisa terhadap permasalahan tersebut yaitu:

1. Material untuk pipaelbow dari *High Pressure Heater* (HPH) ke *Deaerator* sesuai dengan standard dan tidak ada cacat awal.
2. Proses perakitan dan perawatan sudah sesuai dengan standar operasional yang sudah ditentukan.
3. Spesimen diambil dari PLTU Sebalang yang terletak diantara *High Pressure Heater* (HPH) dan *Deaerator*.

1.5 Manfaat

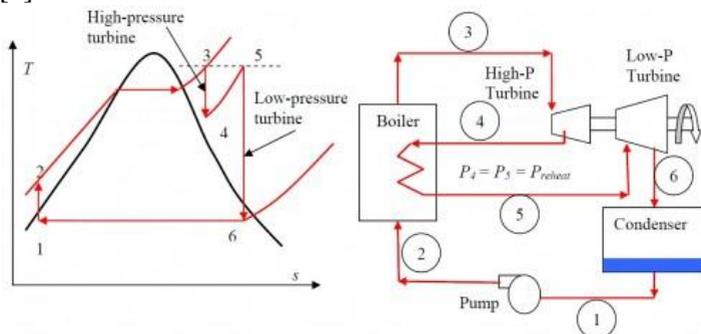
Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Bagi perusahaan industri pembangkit dan bagian perawatan harian, dengan adanya penelitian analisis kegagalan ini, dapat dijadikan pertimbangan dalam pelaksanaan operasi dan perawatan sehingga tidak terjadi kegagalan yang serupa.
2. Bagi kalangan akademis, dengan adanya analisis kegagalan ini diharapkan dapat menjadi tambahan ilmu yang dapat diaplikasikan untuk menangani kasus kegagalan serupa.
3. Terjalin hubungan baik antara institusi pendidikan dengan perusahaan yang bersangkutan.

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

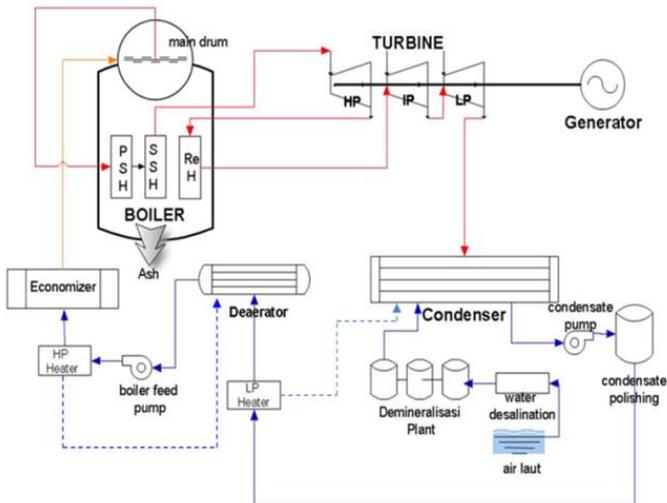
Pembangkit listrik tenaga uap merupakan suatu sistem tenaga listrik yang mengkonversikan tenaga uap menjadi listrik [1]. Pembangkit tenaga listrik uap mempunyai komponen-komponen penyusun yang menjadi suatu sistem yang sering disebut dengan siklus *rankine* [2]. Siklus *rankine* merupakan siklus termodinamika yang digunakan untuk mengubah panas menjadi kerja. Siklus *rankine* biasanya digunakan sebagai siklus dasar dalam pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan mekanisme kerja dimulai dari aliran uap bergerak menuju turbin dimana sebagian dari energi panas diubah ke energi mekanik yang kemudian di transmisikan oleh poros untuk menggerakkan generator listrik. Suatu pengurangan energi dari aliran uap yang keluar dari turbin mengalami kondensasi menjadi air di dalam kondesor. Kehilangan panas setelah memasuki kondesor karena adanya pemisah antara air dingin yang berputar di dalam kondesor. Air dingin tersebut berasal dari air laut atau juga udara atmosfer [3].



Gambar 2.1 Siklus *Rankine* pada PLTU [1].

2.2 Alur Proses Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Seperti pada umumnya, alur proses yang terjadi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dimulai dari air laut masuk ditampung dalam *water desalination* yang kemudian dialirkan ke *demineralisasi plant* dan selanjutnya dikirim ke kondensor. Air dari kondensor kemudian dialirkan menuju *boiler* dengan melewati beberapa bagian diantaranya *condensate pump*, *condensate polishing*, *low pressure heater*, *deaerator*, *boiler feed pump*, *high pressure heater*, dan kemudian masuk ke *boiler*. Setelah air berubah menjadi uap yang diproses pada *boiler*, kemudian uap tersebut dikirimkan ke turbin untuk menggerakkan turbin agar menghasilkan energi mekanik yang akan dikirimkan ke generator. Uap pada turbin akan dialirkan kembali ke kondensor untuk dirubah menjadi air menggunakan air laut sebagai media pendingin dan dilakukan proses yang sama sehingga membentuk sebuah siklus yang dinamakan siklus *rankine* [2].

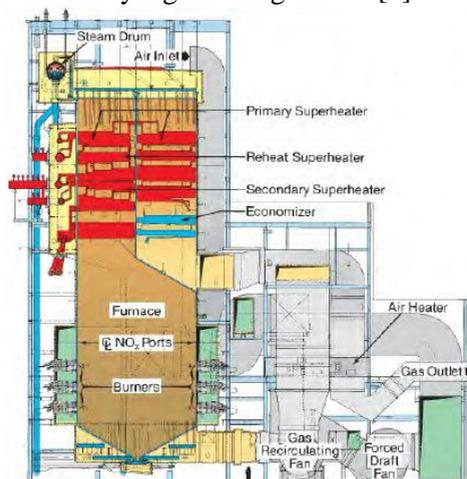


Gambar 2.2 Alur Proses Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sebalang

2.3 Komponen – Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

2.3.1 Boiler

Boiler adalah suatu peralatan yang berfungsi mengubah air menjadi uap yang biasanya terdapat pada suatu perangkat pembangkit [4]. *Boiler* mempunyai susunan komponen – komponen yaitu *furnance*, *steam drum*, *superheater*, *reheater*, *air heater* dan *economizer*. Di dalam *boiler* terdapat pipa – pipa yang berisi air yang pada bagian dasar terdapat *furnance* sehingga menghasilkan panas. Panas inilah yang digunakan untuk menguapkan air yang berada dalam pipa – pipa tersebut. Uap yang dihasilkan *boiler* adalah uap *superheated* dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Selanjutnya uap ini akan menggerakkan sudu-sudu turbin [5]. Energi kalor yang dibangkitkan dalam sistem *boiler* memiliki tekanan, temperatur, dan laju aliran yang menentukan pemanfaatan *steam* yang akan digunakan [6].

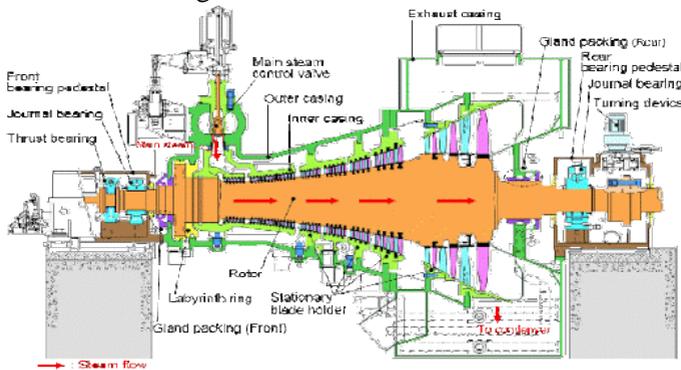


Gambar 2.3 Komponen Boiler jenis *Circulating Fluidized-Bed Boiler* [6]

2.3.2 Turbin

Turbin berfungsi untuk mengubah energi panas yang terkandung dalam uap menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran. Uap dengan tekanan dan temperatur yang tinggi mengalir melalui *nozzle* sehingga kecepatannya naik dan mengarah dengan tepat untuk mendorong sudu – sudu turbin yang dipasang pada poros. Akibatnya poros turbin bergerak menghasilkan putaran (energi mekanik). Selanjutnya, putaran turbin akan memutar generator yang nantinya akan menghasilkan listrik [6].

Pada dasarnya turbin terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor yang merupakan komponen utama pada turbin kemudian di tambah komponen pendukung seperti bantalan, kopling dan sistem bantu lainnya agar kerja turbin dapat lebih baik [5]. Sebuah turbin uap memanfaatkan energi kinetik air yang bertambah akibat penambahan energi termal.



Gambar 2.4 Komponen Turbin Uap [6]

Macam-macam turbin yang digunakan dibedakan berdasarkan tekanannya [6]:

- a. Turbin tekanan rendah
- b. Turbin tekanan sedang
- c. Turbin tekanan tinggi

2.3.3 Kondensor

Kondensor adalah alat yang digunakan untuk mengubah uap yang pemutar turbin menjadi air dengan sistem kondensasi [5]. Hasil dari kondensasi ditampung dalam *hotwell* kemudian dipompa ke *boiler* melalui *feedwater heater*. Dalam instalasi ini, kondensor yang digunakan adalah jenis *shell and tube* dimana air dingin yang berasal dari air laut mengalir di dalam *tube* dan uap mengalir di luar *tube* [6].

2.3.4 Pompa

Pompa merupakan peralatan untuk mengalirkan air dari tekanan rendah ke tekanan tinggi. Pompa pada pembangkit tenaga uap terdiri dari beragam jenis dan fungsi, salah satunya adalah *boiler feed pump*. *Boiler feed pump* menjadi bagian tidak terpisahkan dari sebuah pembangkit listrik tenaga uap. Pompa ini memiliki fungsi untuk mensuplai air dalam proses pembakaran di dalam *boiler*. Untuk mengalirkan air dalam kondisi uap dibutuhkan energi yang lebih besar dibandingkan dalam kondisi cair [6].

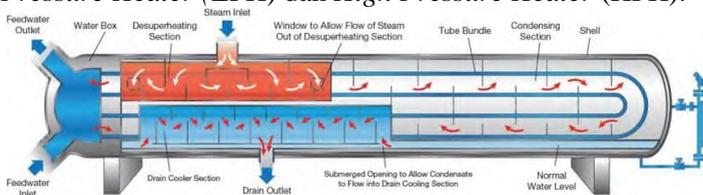
Pompa yang banyak di gunakan di PLTU adalah [5]:

- a. *Condensate pump* adalah sebuah pompa yang berfungsi untuk memompa air pengisi dari *hot well* (penampung air kondensor) ke deaerator.
- b. *Boiler feed pump* adalah pompa bertekanan tinggi yang berfungsi untuk memompa air dari *deaerator* ke *boiler*.

2.3.5 Feedwater Heater

Feedwater heater merupakan suatu peralatan yang digunakan pada siklus pembangkit uap *regenerative*. Dengan adanya *feedwater heater* ini, diharapkan ada dua hal yang bisa didapat, yaitu yang pertama untuk meningkatkan temperatur air dari *feedwater* yang mana akan meningkatkan efisiensi keseluruhan. Kedua, yaitu

untuk meminimalkan efek termal pada *boiler*. Prinsip kerja dari *feedwater heater* yaitu dengan memanaskan lagi air keluaran kondensor dengan menggunakan ceratan uap dari turbin dan pada instalasi tertentu ditambahkan juga drain dari *feedwater heater* lainnya [5]. Umumnya, *feedwater heater* menggunakan gabungan beberapa pemanas dengan tekanan tertentu sesuai dengan tekanan yang dicerat dari turbin. Jumlah dan tipe dari *feedwater heater* sangat tergantung dari siklus uapnya dan tekanan operasi darisiklusnya. Contoh dari *feedwater heater* adalah *Low Pressure Heater (LPH)* dan *High Pressure Heater (HPH)*.



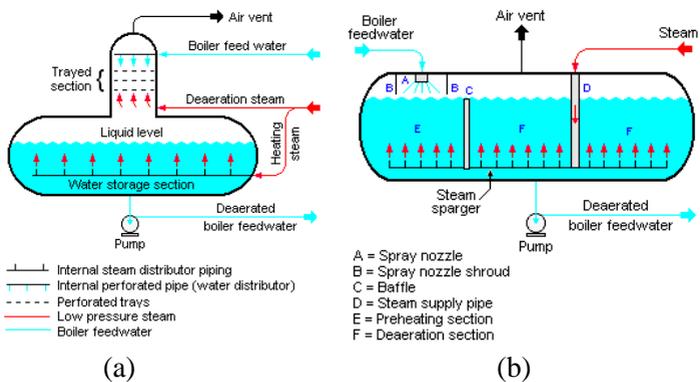
Gambar 2.5 *Closed Feedwater Heater Tipe U* [6]

Feedwater heater beroperasi pada tiga zona operasi. Ketiga zona tersebut yaitu :

- a. *Desuperheating zone (DSZ)* : daerah dalam sisi *shell* yang disekat-sekat oleh *baffle*. Pada zona ini terjadi penurunan temperatur uap panas lanjut sampai pada temperatur uap jenuhnya. Pada zona ini tidak terjadi perubahanfasa.
- b. *Condensing zone (CZ)* : daerah terbesar pada *feedwater heater*. Pada zona ini terjadi proses perubahan fasa dimana uap jenuh berubah menjadi cairjenuh.
- c. *Subcooling zone (SCZ)* : daerah yang juga disekat-sekat oleh *baffle*. Pada zona ini terjadi penurunan temperatur sampai dibawah temperatur cair jenuh untuk mengurangi potensi kerusakan dan erosi pada pipa dan katup akibat *flashing*. Perubahan fasa tidak terjadi pada zonaini.

2.3.6 Deaerator

Deaerator adalah alat yang berfungsi untuk menyerap atau menghilangkan gas – gas yang terkandung pada air pengisi *boiler*, seperti gas O_2 dan gas CO_2 , karena gas – gas ini akan menimbulkan korosi. Prinsip kerjanya air yang masih mengandung O_2 dan CO_2 disemprotkan ke *Steam Daerator*, sehingga gas-gas tersebut diserap oleh senyawa Hydrazine (N_2H_4) atau senyawa lain yang berfungsi sebagai penyerap oksigen (senyawa sulfite, DEHA, Hydroquinone) yang telah diinjeksikan di deaerator. Kemudian dikeluarkan melalui valve pelepas udara/gas. *Deaerator* juga bekerja berdasarkan sifat oksigen yang kelarutannya pada air akan berkurang dengan adanya kenaikan suhu. *Deaerator* terdiri dari dua drum, drum yang lebih kecil merupakan tempat pemanasan awal dan pembuangan gas-gas dari air, sedangkan drum yang lebih besar merupakan tempat penampungan air sebelum masuk ke *boiler*[6].



Gambar 2.6 *Deaerator*, (a) tipe *Tray* (b) tipe *Spray* [6]

Terdapat dua jenis *deaerator* yang sering digunakan yaitu tipe *Tray* dan tipe *Spray*:

a. *Deaerator* tipe *Tray* dengan prinsip kerja berupa air pada *deaerator* masuk melalui bagian atas *deaerator* melewati *tray* dan uap masuk melalui bagian bawah.

Tray menyebabkan permukaan kontak antara air dengan uap menjadi lebih luas. Gas – gas yang tidak terlarut akan dipisahkan oleh uap dan keluar melalui lubang bagian atas *deaerator*. Air yang telah dideaerasi mengalir ke dalam tangki penyimpanan yang kemudian dipompa ke *boiler*.

- b. *Deaerator* tipe *Spray* hanya terdiri dari tangki *horizontal* yang berfungsi sebagai tempat deaerasi dan tempat penyimpanan air. Tipe *dearator* ini memiliki bagian pemanasan awal dan bagian deaerasi yang dipisahkan oleh penyekat. Uap bertekanan rendah masuk melalui tangki dengan cara disemprotkan dari bagian bawah tangki, sedangkan air umpan disemprotkan dari atas dan dipanaskan oleh uap yang disemprotkan ke atas oleh *steam sparger* [6].

2.4 Jenis – Jenis Kegagalan pada Pipa *elbow*

Kegagalan pada pipa *elbow* yang beroperasi pada temperatur tinggi, tekanan tinggi, dan lingkungan yang abrasif memungkinkan munculnya variasi mekanisme kegagalan seperti *overheating* [7], *pitting corrosion* [8], *creep* [9], *erosion* [10], *thermal fatigue* [11], *corrosion fatigue* [12], dan *stress corrosion cracking* [12]. Berikut tabel penjelasan dari berbagai macam penyebab kegagalan :

Tabel 2.1 Jenis dan Pengertian Kegagalan pada pipa *elbow*

Jenis kegagalan	Pengertian
<i>Overheating</i>	Operasional mesin yang berlebihan menyebabkan timbulnya panas.
<i>Pitting corrosion</i>	Korosi berbentuk sumur karena komposisi logam yang tidak homogen.
<i>Creep</i>	Deformasi plastik karena pembebanan yang sama dalam waktu yang sama dengan suhu tinggi.
<i>Erosion</i>	Pengikisan karena aliran fluida/uap yang tinggi.

<i>Thermal fatigue</i>	Kegagalan karena temperatur dinamik yang berfluktuasi dibawah <i>yield strength</i> yang terjadi dalam waktu yang lama.
<i>Corrosion fatigue</i>	Korosi yang terjadi karena logam mendapatkan beban siklus yang terus berulang sehingga logam mengalami patah.
<i>Stress corrosion cracking</i>	Korosi yang terjadi karena butiran logam yang berubah bentuk akibat perlakuan khusus (seperti diregang, ditebuk dll). Sehingga butiran menjadi tegang dan menyebabkan keretakan.

2.5 Korosi

Pengertian korosi menurut NACE (*National Association of Corrosion Engineer*) adalah kerusakan logam karena interaksi dengan lingkungannya. Karena interaksi tersebut, maka akan terjadi reaksi kimia ataupun elektrokimia yang menghasilkan produk korosi. Korosi juga dapat didefinisikan sebagai berikut [12]:

- a. Secara umum, proses perusakan atau penurunan kualitas bereaksi dengan lingkungan. Suatu material karena bereaksi dengan lingkungan.
- b. Berdasarkan pengertian secara *engineering*, proses perusakan suatu material dimana penyebabnya bukan karena mekanik murni.
- c. Berdasarkan pengertian secara metalurgi, kebalikan proses ekstraksi metalurgi.

Proses korosi melibatkan perubahan dan pertukaran energi. Di alam, logam ditemukan dalam bentuk senyawa, kemudian dimurnikan (dikurangi unsur – unsur yang tidak diperlukan) dengan pemanasan. Logam ini berada pada tingkat logam yang mengalami berbagai macam proses dan menaikkan tingkat energi yang dimilikinya. Penggunaan

logam sebagai produk jadi yang berinteraksi dengan lingkungan secara kimiawi akan menyebabkan korosi. Dimana proses korosi ini membuat logam berada pada tingkat energi yang paling rendah, hampir sama dengan keadaan awal ditemukan di alam [12].

2.6 Erosi

Pengertian erosi hampir sama dengan korosi yaitu kegagalan atau penurunan mutu dari suatu material akibat bereaksi dengan lingkungan. Jika korosi, interaksi yang terjadi secara kimiawi maka berbeda dengan erosi dimana interaksi yang terjadi secara fisik. Proses kegagalan pada sebuah material sangat jarang yang disebabkan oleh erosi murni. Sebagian disebabkan oleh korosi meskipun jumlahnya sedikit. Sehingga proses kegagalan materialnya disebut proses kegagalan korosi erosi [10].

2.7 Korosi Erosi

Korosi erosi adalah proses pengikisan material yang diinduksi oleh aliran. Hal ini dapat mempengaruhi ketahanan logam terhadap korosi yang menyebabkan terjadinya pembentukan lapisan oksida. Lapisan oksida dipengaruhi oleh aliran turbulensi atau aliran uap basah diikuti oleh korosi pelarutan logam yang tidak dilindungi [13].

Ada beberapa macam penyebab terjadinya proses korosi erosi, diantaranya :

- a. Aliran turbulen, tekanan geser berfluktuasi, dan dampak tekanan.
- b. Dampak partikel padat tersuspensi.
- c. Dampak *liquid droplet* yang tersuspensi dalam aliran berbentuk uap berkecepatan tinggi.
- d. Dampak gelembung gas yang tersuspensi dalam aliran berbentuk cair.

- e. Pecahnya gumpalan gelembung udara pada proses kavitasi.

Pelarutan dan penipisan lapisan pelindung pada aliran yang ditingkat adalah bentuk "kimiawi" dari erosi pada lapisan pelindung yang mengarah ke percepatan korosi pada logam dasarnya.

2.7.1 Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah aliran fluida yang partikel – partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan berfluktuasi yang saling berinteraksi. Akibat dari hal tersebut garis alir antar partikel fluidanya saling berpotongan. Aliran turbulen mengirim partikel-partikel dengan dua cara yaitu dengan penambahan gaya fluida dan penurunan tekanan lokal ketika pusat turbulen bekerja padanya. Keduanya adalah penyebab terjadinya korosi erosi yang terjadi dalam fase tunggal pada pipa [13].



Gambar 2.7 Penampang Aliran Turbulen

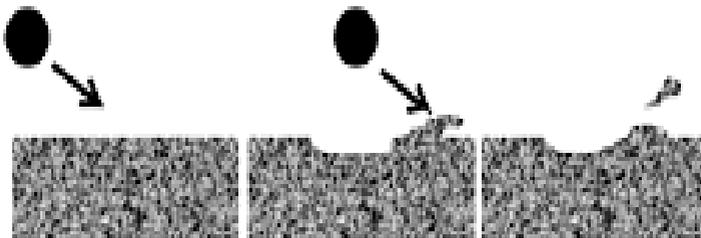
Pengikisan pada lapisan dinding dalam pipa pada aliran fase tunggal selalu dikaitkan dengan vortisitas (putaran karena akibat perbedaan kecepatan) yang terjadi pada kondisi aliran turbulen hasil dari perubahan makro atau mikro secara cepat dalam geometri aliran. Cukup sulit untuk menghindari ketidaksempurnaan geometris mikroskopis dalam sistem aliran turbulen selama percobaan untuk menentukan nilai – nilai tegangan geser kritis [13].



Gambar 2.8 Contoh Kerusakan oleh Aliran Turbulen [16]

2.7.2 *Solid Particle Impingement*

Solid Particle Impingement adalah sebuah proses yang terjadi dimana beberapa partikel solid saling berbenturan. Benturan tersebut dapat merusak kedua jenis lapisan pelindung (hambatan difusi tebal dan lapisan pasif tipis) yang mengakibatkan terjadinya korosi erosi. Partikel – partikel yang saling berbenturan juga dapat mengikis logam yang mengakibatkan kegagalan logam secara keseluruhan. Tingkat erosi yang terjadi merupakan fungsi dari energi kinetik dimana kecepatan dan sudut dampak dari benturan ditentukan oleh kerapatan dan ukuran partikel [13].



Gambar 2.9 Proses Abrasi karena *Solid Particle Impingement*

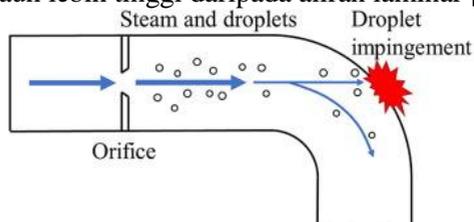
Bentuk partikel dan kekerasan mikro dari permukaan partikel mempengaruhi kekuatan efektif yang dihasilkan di dinding saat terjadi benturan. Dengan demikian partikel pasir bulat menghasilkan tingkat erosi dua orde lebih besar dari erosi oleh manik-manik kaca dalam sistem yang sama. Perbedaan dalam perilaku itu terkait dengan kekerasan mikro partikel pasir, yang bisa dilihat pada pembesaran tinggi oleh mikroskop elektron [13].



Gambar 2.10 Contoh Kerusakan karena Proses *Solid Particle Impingement* [16].

2.7.3 *Liquid Droplet Impingement*

Liquid Droplet Impingement adalah salah satu jenis kegagalan yang terjadi pada material karena pengikisan/erosi. Mekanisme terjadinya *Liquid Droplet Impingement* yaitu dengan cara menubrukan *liquid droplet* yang dibawa dalam aliran uap atau gas berkecepatan tinggi. Tubrukan ini melibatkan material solid dengan tetesan cairan yang membuat adanya tekanan impulsif dan destruktif. Erosi jenis ini jika terjadi pada aliran turbulen hasilnya jauh lebih tinggi daripada aliran laminar [13].



Gambar 2.11 Proses *Liquid Droplet Impingement*

Proses terjadinya erosi *Liquid Droplet Impingement* dimulai dari tahap inkubasi, dimana pada tahap ini permukaan material tidak berubah karena material hanya mengalami deformasi elastis. Pada tahap percepatan, erosi mulai terjadi di permukaan yang disebabkan oleh konsentrasi tegangan melebihi batas *fatigue* material, dan tingkat penipisan pada dinding material meningkat dengan cepat. Kemudian, tingkat penipisan pada dinding material mencapai nilai maksimum (tingkat maksimum erosi). Ketika permukaan material menjadi kasar oleh deformasi plastik, tingkat penipisan pada dinding material menurun karena efek bantalan oleh kehadiran pelapis cair di atas permukaan kasar (tahap deselerasi). Setelah itu, tingkat penipisan dinding mendekati tahap akhir, dimana tingkat erosi menjadi konstan terhadap waktu [14].

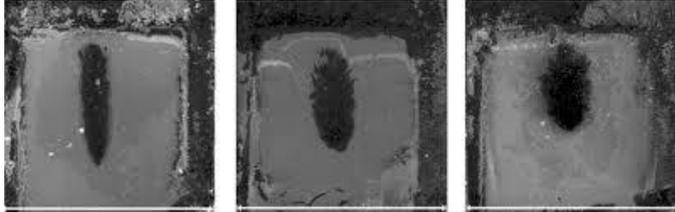


Gambar 2.12 Contoh Kerusakan karena Proses *Liquid Droplet Impingement* [16].

2.7.4 *Air Bubble Impingement*

Air Bubble Impingement adalah proses erosi yang terjadi karena adanya tubrukan antara beberapa macam gelembung udara dengan kecepatan tinggi. Semakin tinggi nilai kecepatan antara gelembung udara tersebut maka tingkat erosi yang dihasilkan akan semakin besar.

Kecepatan aliran yang tinggi mengakibatkan aliran menjadi tidak stabil sehingga kecepatan tumbukan yang terjadi antar gelembung udara menjadi lebih besar dan menyebar [13].

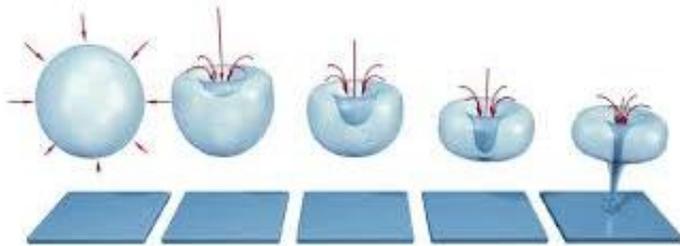


Gambar 2.13 Abrasi karena *Air Bubble Impingement* [16].

Tumbukan itu awalnya berupa "sepatu kuda" terisolasi, kemudian menyebar ke karakteristik kasar umum korosi erosi. Pola tapal kuda serupa diproduksi oleh turbulensi mikro di batas butir pada pelarutan asam benzoat padat yang menggambarkan peran turbulensi mikro dan hidrodinamika dalam pola korosi erosi yang dihasilkan pada pipa tembaga [13].

2.7.5 Cavitation

Cavitation adalah proses perubahan fase uap dari zat cair saat sedang mengalir. Perubahan fase tersebut terbentuk dalam cairan yang mengalir ketika tekanan hidrostatik turun di bawah tekanan uap cairan. Misalnya, air pada tekanan 1 atm akan mendidih dan menjadi uap pada suhu 100° C. Tetapi jika tekanan direndahkan maka air akan bisa mendidih pada temperatur yang lebih rendah bahkan jika tekanannya cukup rendah maka air bisa mendidih pada suhu kamar. Apabila zat cair mendidih, maka akan timbul gelembung – gelembung uap zat cair. Hal ini dapat terjadi pada zat cair yang sedang mengalir di dalam pipa dengan temperature yang tinggi.



Gambar 2.14 Proses *Cavitation*

Kavitasi menyerang bentuk lubang sisi yang curam, kadang-kadang membentuk struktur seperti sarang lebah [13]. Kavitasi biasanya sering dijumpai pada baling-baling kapal, pompa hidrolis dan turbin, katup, pelat orifis, dan semua tempat di mana tekanan statis sangat bervariasi berdasarkan prinsip *Bernoulli*.



Gambar 2.15 Contoh Kerusakan karena Proses *Cavitation* [16].

2.8 Pengaruh Kecepatan terhadap Korosi Erosi

Kecepatan fluida sangat berpengaruh pada peristiwa korosi – erosi. Peristiwa korosi – erosi amat ditentukan oleh kecepatan fluida. Korosi akan lebih dominan jika kecepatan fluida amat lambat, sedangkan jika kecepatan fluida amat tinggi maka erosi lah yang akan lebih dominan. Hal ini dikarenakan waktu kontak fluida dengan material. Semakin lambat kecepatan fluida maka waktu kontak antara fluida dengan material akan semakin lama, jadi waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya proses korosi semakin lama pula [15].

Besarnya kecepatan fluida sangat berpengaruh terhadap bentuk kerusakan yang terjadi pada material. Pada kecepatan yang relatif rendah akan menyebabkan terjadinya korosi yang berbentuk pitting. Sedangkan pada kecepatan tinggi, bentuk kerusakan yang terjadi pada permukaan bagian dalam pipa akan membentuk kawah atau cekungan yang berbentuk seperti telapak kuda (*horseshoe*). Besarnya kecepatan fluida juga berpengaruh terhadap besarnya pengikisan yang terjadi pada material. Pada kecepatan yang relatif rendah, pengikisan yang terjadi juga relatif kecil. Sedangkan pada kecepatan yang relatif tinggi, pengikisan yang terjadi juga relatif tinggi. Hal ini menyebabkan ketebalan material akan berkurang secara signifikan pada kecepatan fluida yang tinggi [15].

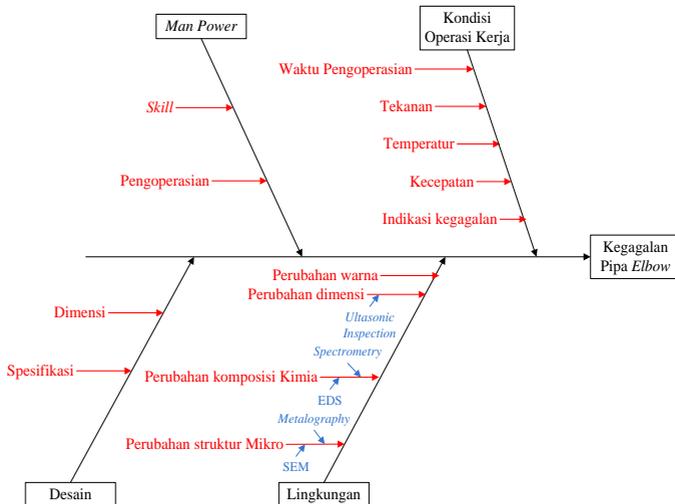
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Cause and Effect Diagram atau Fishbone Diagram

Cause and effect diagram atau fishbone diagram adalah salah satu metode untuk menganalisis penyebab dari sebuah permasalahan. Pada penelitian analisis kegagalan pipa elbow digunakan fishbone diagram untuk mengidentifikasi dan mengorganisasi penyebab – penyebab dari permasalahan yang ada seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Fishbone Diagram Kegagalan Pipa Elbow

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penggaris dan Jangka Sorong

Penggaris yang digunakan pada penelitian ini memiliki ketelitian 0,1 mm, sedangkan jangka sorong yang digunakan memiliki ketelitian 0,01 mm. Penggaris dan

jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi panjang dan diameter dari material yang akan menjadi benda kerja serta mengukur dimensi lain yang dianggap perlu.

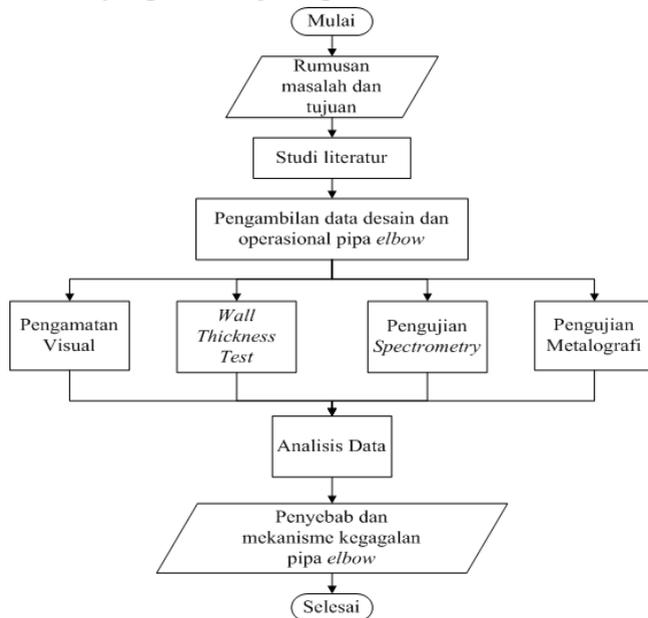
2. Kamera Digital
Merupakan alat yang digunakan untuk melakukan pengamatan visual yang dilakukan pada benda kerja sekaligus mendokumentasikan bentuk benda kerja.
3. Mesin Potong *Jigsaw*
Merupakan mesin potong otomatis dengan merk CPSG model G7016 digunakan untuk memotong benda kerja sesuai dimensi yang diinginkan dan telah diukur sebelumnya.
4. Perangkat *Grinding* dan *Polishing*
Proses *grinding* spesimen benda kerja menggunakan mesin grinder Metkon GRIPO 300-IV dengan kertas amplas grit 80, 120, 240, 320, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, dan 2000. Sedangkan proses *polishing* menggunakan mesin yang sama seperti proses *grinding* dengan menggunakan kain beludru dan serbuk alumina.
5. Perangkat *etching*
Proses ini menggunakan larutan nital 2% yang terdiri dari 2 ml HNO_3 ditambah 98 ml etanol. Diperlukan gelas ukur, pipet, wadah kaca, pengering, dan aquades untuk menunjang proses etsa spesimen benda kerja.
6. *Spectrometer ARC-Met 8000*
Merupakan alat yang digunakan untuk pengujian komposisi kimia agar mengetahui kandungan komposisi kimia serta unsur-unsurnya secara *kuantitatif* yang terdapat pada benda kerja yang akan diamati.

7. Mikroskop Optis *digital olimpus BX60M*

Merupakan alat yang digunakan untuk melakukan pengamatan struktur mikro dan melihat kontur kerusakan serta pengurangan ketebalan pada benda kerja.

3.3 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian adalah salah satu metode yang digunakan untuk menjelaskan langkah – langkah dalam sebuah proses penelitian. Pada penelitian kegagalan pipa *elbow* digunakan diagram alir penelitian untuk menjelaskan langkah – langkah dalam sebuah proses penelitian yang terlihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.2 Diagram Alir Percobaan.

Diagram alir penelitian akan menunjukkan alur penelitian ini secara sistematis. Berikut ini penjelasan tentang tahapan – tahapan yang terdapat pada diagram alir:

1. Perumusan Masalah

Perumusan masalah didapatkan saat spesimen dan data operasional diterima dari perusahaan. Perumusan masalah dilakukan untuk mengetahui batasan batasan dan ruang lingkup penelitian. Dan didapatkan tujuan yang merupakan jawaban dari perumusan masalah yang telah ditentukan.

2. Studi Literatur

Pada tahap studi literatur, dilakukan proses untuk mencari informasi yang dapat membantu menjawab pertanyaan yang didapatkan dari perumusan masalah. Informasi yang dicari dapat berupa dasar teori atau penelitian sebelumnya yang memiliki permasalahan yang sama namun dalam kasus yang berbeda. Studi literatur dapat dilakukan terus menerus hingga penelitian selesai.

3. Pengamatan visual

Pada tahap analisis visual, dilakukan dengan cara pengamatan visual pada spesimen. Hasil dari pengamatan ini berupa data pengukuran ketebalan bagian ujung spesimen, perubahan warna bagian luar dan dalam spesimen, pengurangan dimensi spesimen dan menemukan kecacatan yang terlihat tanpa alat bantu. Semua hasil dari pengamatan ini digunakan untuk mengetahui keadaan fisik dari spesimen.

4. *Wall Thickness Test*

Pada tahap ini dilakukan pengujian *Wall Thickness Test* yaitu pengujian *non destructive* yang berfungsi untuk mengetahui ketebalan bahan atau adanya cacat dalam bahan dengan gelombang *ultrasonic*. Hasil yang didapatkan dari pengujian ini berupa *profile* ketebalan yang digunakan untuk mendeteksi penyebab terjadinya

kegagalan pada spesimen. Ketika *profile* ketebalan berubah secara signifikan dapat diprediksi kegagalan tersebut lebih dominan disebabkan oleh erosi karena pengikisan terjadi secara terpusat pada area yang terdapat lubang pada pipa. Sebaliknya saat *profile* ketebalan berubah secara perlahan dapat diprediksi kegagalan tersebut lebih dominan disebabkan oleh korosi karena pengikisan terjadi secara meluas dan tidak terpusat.

5. Pengamatan Struktur Mikro

Pada tahap ini, dilakukan pengujian *metallography* untuk mengetahui bentuk mikrostruktur dari spesimen. Dengan mengetahui mikrostruktur dapat dilakukan analisis lebih lanjut tentang pengerjaan dan keadaan lingkungan kerja spesimen. Pengujian *metallography* memiliki empat tahap yaitu *sampling*, *grinding*, *polishing*, dan *etching*. Setelah itu, sampel spesimen akan dilihat mikro struktur dengan mikroskop elektronik dengan perbesaran 100 hingga 1500.

6. Pengamatan Komposisi Kimia

Dan yang terakhir dilakukan pengamatan komposisi kimia material untuk mengetahui perubahan komposisi kimia pada setiap titik pada spesimen. Pengamatan komposisi kimia dilakukan menggunakan pengujian *Spectrometry*. Pengujian ini dilakukan dengan cara menembak sinar X ke titik yang akan diamati komposisinya. Hasil pengujian berupa *persentase* yang mewakili unsur yang terkandung dengan nilai tertentu.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Operasional Pipa *Elbow*

Dalam cara kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) terdapat komponen – komponen yang mendukung kinerjanya agar berjalan sesuai standar operasional. Salah satunya adalah pipa *elbow* yang berfungsi untuk mengalirkan *steam* (uap) dari *High Pressure Heater* (HPH) ke *Deaerator*. Pada penelitian ini, pipa *elbow* yang diteliti mengalami kegagalan yang berupa lubang. Sehingga terjadi kebocoran saat *steam* mengalir di dalamnya. Berikut ini tabel penjelasan tentang data operasional pipa *elbow* :

Tabel 4.1 *Material Properties*

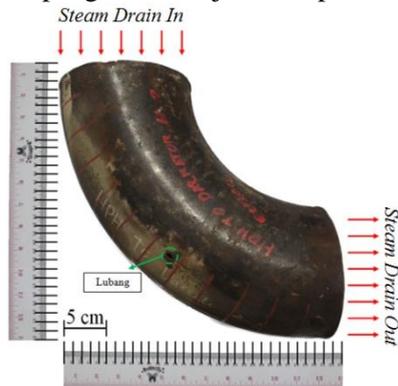
Jenis Material	<i>Low Carbon Steel (Cast)</i>
Standar Material	ASTM A216 Gr. WCB
Diameter Dalam	147,62 mm
Diameter Luar	158,69 mm
Ketebalan	5,535 mm
Radius	320 mm
<i>Lifetime</i>	25 Tahun
Bekerja Sejak Tahun	2011
<i>Density</i>	7,89 g/cm ³
Modulus Elastisitas	190 Gpa
<i>Yield Strength</i>	280 MPa
Temperatur	-30 °C – 425 °C

Tabel 4.2 Data Operasional Pipa *Elbow*

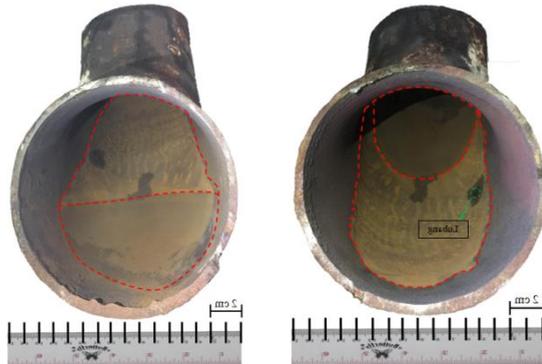
Laju Aliran Massa	57,73 t/h – 66,35 t/h
Tekanan	1,38 MPa – 1,49 Mpa
Kecepatan	33,42 m/s – 35,38 m/s
Temperatur	194,4 °C – 197,9 °C
Energi Per Satuan Massa	828,6 KJ/Kg – 835,5 KJ/Kg

4.2 Pengamatan Visual

Pengamatan visual pada permukaan luar pipa *elbow* memperlihatkan adanya lubang dan perubahan warna di sekitar lubang pada sudut luar pipa, seperti yang terlihat pada gambar 4.1. Sedangkan pengamatan visual pada permukaan dalam pipa *elbow* memperlihatkan adanya perubahan warna, seperti yang terlihat pada gambar 4.2. Kemudian hasil pengamatan dijelaskan pada tabel 4.3.



Gambar 4.1 Lubang pada Sudut Luar Pipa *Elbow*



(a) (b)
Gambar 4.2 Perubahan Warna dan Lubang pada Permukaan Dalam Pipa *Elbow*. (a) Diameter *Steam Drain In*, (b) Diameter *Steam Drain Out*

Tabel 4.3 Hasil Pengamatan Visual pada Pipa *Elbow*

Lokasi Pengamatan	Hal yang Diamati	Hasil Pengamatan
Permukaan Luar	Bentuk Spesimen	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak terdapat kerak yang menempel di permukaan • Terdapat lubang pada sudut luar pipa <i>elbow</i>
	Warna	<ul style="list-style-type: none"> • Secara keseluruhan tidak mengalami perubahan warna
	Ketebalan	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak mengalami perubahan ketebalan
Permukaan Dalam	Bentuk Spesimen	<ul style="list-style-type: none"> • Terdapat kerak yang menempel di permukaan • Terdapat lubang pada sudut luar pipa <i>elbow</i>
	Warna	<ul style="list-style-type: none"> • Untuk bagian tepi berwarna hitam • Untuk bagian tengah pada area sudut luar pipa mengalami perubahan warna menjadi coklat muda.
	Ketebalan	<ul style="list-style-type: none"> • Untuk bagian tepi mengalami pengurangan ketebalan • Untuk bagian tengahnya mengalami pengurangan ketebalan secara signifikan

Dari pengamatan visual, pengurangan ketebalan yang terjadi pada pipa *elbow* dapat disebabkan oleh pengikisan yang terjadi pada permukaan dalam pipa *elbow* karena aliran dua fasa dari *steam drain* yang masih mengandung air. Pengikisan yang terjadi secara terus menerus menyebabkan pipa *elbow* mengalami kebocoran. Hal ini dibuktikan dengan adanya lubang yang berada pada daerah sekitar sudut luar pipa tersebut. Perubahan warna pada permukaan dalam pipa *elbow* menunjukkan indikasi terjadinya proses korosi yang berhubungan dengan unsur oksigen (O) dari air sebagai media korosif atau elektrolit dan menyebabkan pipa *elbow* mengalami kegagalan. Warna merah bata pada permukaan dalam pipa *elbow* merupakan produk korosi dari Fe_2O_3 atau *hematite*. Sedangkan warna hitam kecoklatan terbentuk akibat Fe yang berada pada lingkungan kerja berkontak pada permukaan dalam pipa *elbow* merupakan produk korosi dari Fe_3O_4 atau *magnetite*. *Hematite* dan *magnetite* terbentuk akibat Fe yang berada pada lingkungan kerja berkontak langsung dengan air secara terus menerus. Semakin cerah warna yang terlihat pada permukaan dalam pipa *elbow* menandakan pengurangan ketebalan yang terjadi semakin besar. Hal ini terlihat dari cekungan pada permukaan dalam pipa tersebut. Dimana saat terjadi perubahan warna, cekungan mulai timbul dan akan membesar saat berada pada warna yang paling cerah (putih kekuningan).



Gambar 4.3 Daerah Sekitar Lubang pada Permukaan
Dalam Pipa *Elbow*

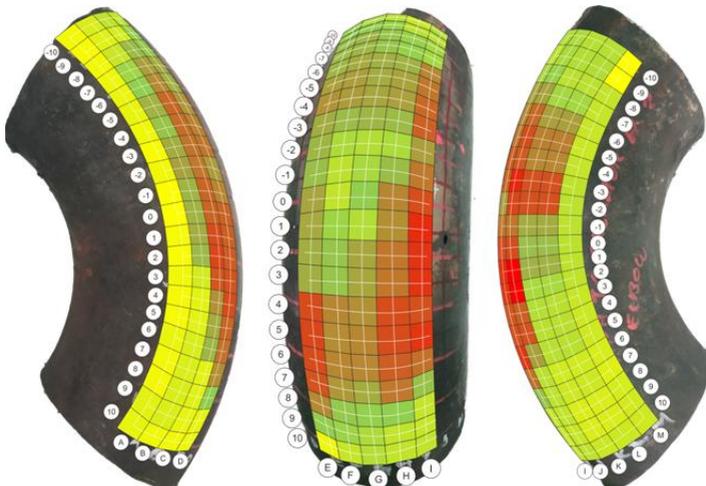
Jika dilihat pada gambar 4.3 menunjukkan persamaan bentuk dengan gambar 2.9 yaitu contoh kerusakan karena proses *Liquid Droplet Impingment* (LDI) [13]. Dimana pengurangan ketebalan yang terjadi berbentuk garis – garis. Garis – garis tersebut terbentuk karena *droplet* dari air yang terbawa oleh uap (*steam*) menubruk dinding sehingga pola pengikisan yang terjadi akan mengikuti pola dari alirannya. Pola garis yang terlihat sangat jelas terdapat pada daerah – daerah yang memiliki selisih ketebalan yang besar.

Secara teori, lokasi lubang yang berada tidak di tengah sudut luar membuat kegagalan ini termasuk pada jenis kegagalan yang jarang terjadi. Hal tersebut dapat disebabkan oleh aliran dua fasa (*steam* dan air) dengan volume *droplet* dari air terbagi menjadi dua pada setiap tepinya (*droplet* banyak ke bagian tepi). Pengikisan dan perubahan warna yang terjadi menunjukkan indikasi terjadinya proses erosi yang disertai korosi karena aliran dua fasa (*steam* dan air) [13]. Sehingga proses erosi yang terjadi termasuk dalam golongan kegagalan material karena *Liquid Droplet Impingment* (LDI) [13]. Terjadinya pengikisan hingga membuat pipa *elbow* menjadi bocor

menandakan bahwa pipa *elbow* sudah tidak aman lagi digunakan karena akan mengakibatkan kerugian dari segi efisiensi yang menurun dan membuat proses kerja tidak efektif.

4.3 Wall Thickness Test

Setelah dilakukan pengamatan visual, selanjutnya dilakukan pengujian *wall thickness test* untuk mengetahui *profile* ketebalan spesimen terutama pada bagian yang mengalami perubahan warna. Pengujian ini dilakukan dengan cara membuat garis pada bidang uji setiap 2 cm kearah vertikal dan horizontal. Sehingga terjadi titik persimpangan dari pertemuan dua garis tersebut. Pada setiap titik tersebut dilakukan pengujian *wall thickness test* dengan metode *uktrasonic inspection*. Sehingga didapatkan hasil seperti yang terlihat pada gambar 4.3 (berbentuk indikasi warna). Dan hasil pengujian seperti yang terlihat dalam tabel 4.4 (berbentuk angka).



Gambar 4.4 Plot *Wall Thickness Test* dengan jarak antar titik sebesar 2 mm.

Tabel 4.4 Hasil *Wall Thickness Test* dengan satuan mm.

No	Location	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	-10	4,78	4,40	4,02	4,07	3,50	3,76	3,90	4,18	3,81	3,77	3,91	3,91	4,94
2	-9	4,83	4,51	4,35	3,48	3,39	3,34	3,48	3,96	3,96	3,74	3,85	3,98	4,92
3	-8	4,78	4,16	3,06	3,27	3,08	2,96	3,20	3,44	3,66	3,47	3,96	4,14	4,08
4	-7	4,70	3,59	2,59	2,81	2,97	2,80	2,76	3,12	2,66	2,65	3,66	4,01	4,12
5	-6	4,66	3,36	2,27	2,88	2,69	2,77	2,85	2,90	2,21	1,72	2,59	4,20	4,14
6	-5	4,61	2,91	1,69	2,44	2,59	2,57	2,80	2,67	1,94	1,28	2,09	4,22	4,18
7	-4	4,72	3,19	1,79	2,14	2,39	2,54	2,70	2,61	1,72	1,50	2,21	4,12	4,09
8	-3	4,86	2,81	1,89	1,95	2,81	3,04	2,97	3,05	1,60	0,64	1,33	4,02	4,00
9	-2	4,74	2,63	1,97	2,55	2,97	3,74	3,86	3,74	2,57	1,15	1,31	4,11	4,05
10	-1	4,91	2,94	1,65	2,18	3,09	3,98	3,68	3,08	1,97	1,93	2,80	4,00	3,99
11	0	4,93	2,91	1,64	1,64	2,71	4,06	3,35	2,19	1,28	1,27	3,09	3,94	3,98
12	1	4,82	2,82	1,25	1,56	2,75	3,56	3,84	2,34	0,73	0,00	2,88	3,91	4,00
13	2	4,85	3,03	1,16	1,49	2,83	3,21	2,70	1,94	0,87	0,00	3,70	3,85	4,04
14	3	4,75	4,31	1,41	1,35	1,64	2,78	2,65	1,30	1,39	1,58	3,87	4,00	4,15
15	4	4,80	4,54	2,36	1,27	1,24	2,19	2,37	1,25	1,32	1,35	3,95	4,13	4,21
16	5	4,82	4,52	2,78	1,67	1,16	2,28	2,18	1,24	0,89	2,60	3,94	4,18	4,25
17	6	4,64	4,40	2,99	1,88	1,24	2,18	2,21	1,55	1,83	3,95	4,27	4,39	4,36
18	7	4,68	4,43	4,52	2,30	1,38	2,46	2,80	1,97	3,16	4,01	4,23	4,31	4,47
19	8	4,77	4,40	4,51	3,33	2,24	3,26	3,40	3,36	4,08	4,07	4,40	4,40	4,34
20	9	4,53	4,41	4,60	4,60	3,34	3,52	3,76	4,05	4,11	4,13	4,40	4,40	4,30
21	10	4,60	4,71	4,73	4,69	4,10	4,11	3,86	4,06	4,06	4,03	4,21	4,29	4,25

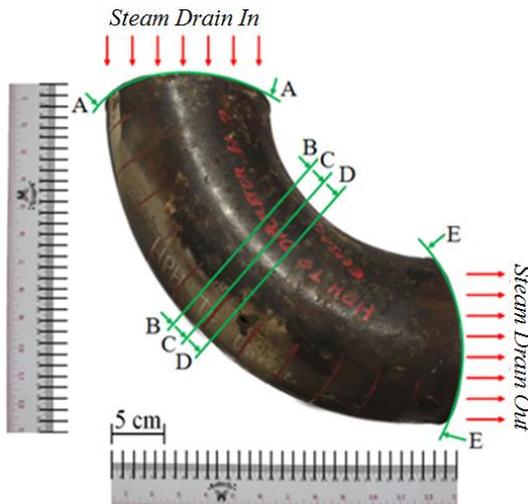
Dari gambar 4.4 diatas terlihat perbedaan warna pada setiap titiknya. Perbedaan warna tersebut menjelaskan besarnya ketebalan. Dimana warna kuning menunjukkan ketebalan paling besar, warna hijau menunjukkan ketebalan sedang, warna merah menunjukkan ketebalan paling kecil, degradasi antara warna kuning – hijau menunjukkan ketebalan diantara besar ke sedang, dan degradasi warna hijau – merah menunjukkan ketebalan diantara sedang ke kecil. Jumlah garis vertikal ada 13 buah dan yang horizontal ada 21 buah, sehingga jumlah titik yang diuji ada 273 buah titik. Sedangkan tabel 4.3 memperlihatkan hasil dari pengujian *Wall Thickness Test* pada setiap titiknya. Hasil paling tinggi berada pada titik -10M dengan nilai ketebalan sebesar 4,94 mm. Hasil paling kecil berapa pada titik 12J dan 13J dengan nilai ketebalan sebesar 0,00 mm (tepat pada lubangnya). Selain itu, dari hasil pengujian didapatkan perbedaan ketebalan yang ekstrim. Salah satu contohnya perbedaan ketebalan dari titik 14B ke titik 14C

dengan nilai ketebalan dari 4,31 mm ke 1,41 mm (selisih 2,9 mm).

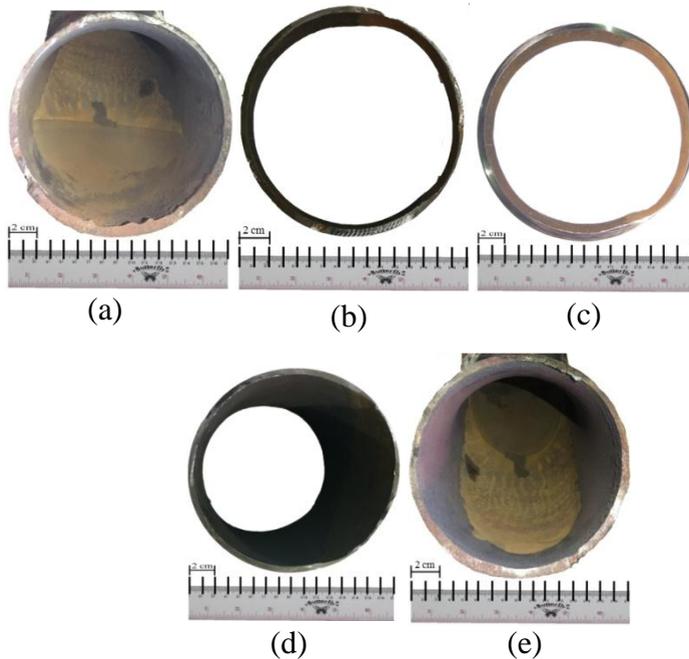
Penipisan ketebalan yang berbeda dan letak ketebalan terkecil (warna merah) tidak di tengah menunjukkan jika bentuk aliran yang menabrak dinding merupakan aliran dua fasa (*steam* dan air) dengan volume *droplet* dari air terbagi menjadi dua pada setiap tepinya (*droplet* banyak ke bagian tepi). Dan adanya perbedaan ketebalan yang tergolong ekstrim (selisih ketebalan tinggi) menunjukkan jika kegagalan lebih dominan disebabkan oleh erosi [15].

4.4 Pengukuran Ketebalan

Pengukuran ketebalan secara makroskopis menggunakan jangka sorong dilakukan pada diameter bagian atas (*steam drain in*), tengah, dan bawah (*steam drain out*) seperti yang terlihat pada gambar 4.5. Sedangkan hasil pengukuran ketebalan terlihat pada tabel 4.5 sampai 4.9.



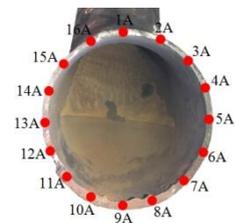
Gambar 4.5 Plot Pengukuran Ketebalan



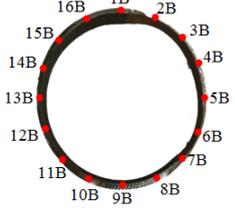
Gambar 4.6 Penampang Potongan. (a) Potongan A – A, (b) Potongan B – B, (c) Potongan C – C, (d) Potongan D – D, dan (e) Potongan E – E.

Pengukuran ketebalan setiap sampel diperlukan untuk mengetahui ketersediaan ukuran spesimen dengan desain awal atau tidak. Serta untuk mengetahui besarnya nilai penipisan atau pengurangan ukuran spesimen yang mengalami kegagalan. Pertama spesimen dipotong menjadi sampel. Kemudian dilakukan pengukuran dengan mengambil nilai pengukuran sebanyak 16 titik dari 0^0 hingga $337,5^0$ dengan setiap perbedaan sebesar $22,5^0$ seperti yang terlihat pada tabel 4.5 sampai tabel 4.9.

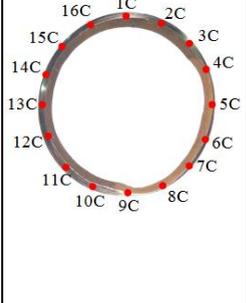
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Depan (Potongan A – A)

	1A	5,73 mm	9A	6,98 mm
	2A	5,38 mm	10A	6,83 mm
	3A	5,82 mm	11A	6,47 mm
	4A	6,14 mm	12A	6,14 mm
	5A	6,31 mm	13A	5,75 mm
	6A	6,56 mm	14A	5,41 mm
	7A	6,73 mm	15A	5,56 mm
	8A	7,33 mm	16A	6,38 mm

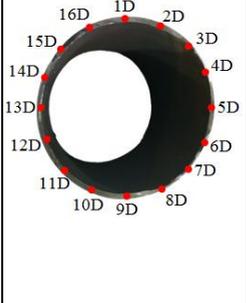
Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Tengah (Potongan B – B)

	1B	4,67 mm	9B	4,83 mm
	2B	0,72 mm	10B	4,85 mm
	3B	1,67 mm	11B	4,91 mm
	4B	3,05 mm	12B	4,83 mm
	5B	4,45 mm	13B	4,97 mm
	6B	0,93 mm	14B	4,91 mm
	7B	4,92 mm	15B	4,85 mm
	8B	4,94 mm	16B	4,79 mm

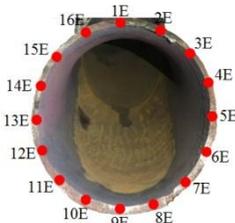
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Tengah (Potongan C – C)

	1C	4,89 mm	9C	3,92 mm
	2C	4,53 mm	10C	4,47 mm
	3C	4,55 mm	11C	3,98 mm
	4C	1,12 mm	12C	4,42 mm
	5C	1,67 mm	13C	5,23 mm
	6C	3,20 mm	14C	5,87 mm
	7C	1,91 mm	15C	5,43 mm
	8C	0,97 mm	16C	4,91 mm

Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Tengah (Potongan D – D)

	1D	4,82 mm	9D	4,57 mm
	2D	4,75 mm	10D	4,63 mm
	3D	0,37 mm	11D	4,89 mm
	4D	1,91 mm	12D	5,02 mm
	5D	3,42 mm	13D	4,91 mm
	6D	1,83 mm	14D	4,83 mm
	7D	0,84 mm	15D	4,64 mm
	8D	4,41 mm	16D	4,93 mm

Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Ketebalan pada Diameter bagian Belakang (Potongan E – E)

	1E	5,58 mm	9E	6,12 mm
	2E	4,67 mm	10E	6,48 mm
	3E	4,58 mm	11E	6,61 mm
	4E	5,72 mm	12E	5,63 mm
	5E	5,38 mm	13E	4,89 mm
	6E	5,72 mm	14E	4,87 mm
	7E	6,05 mm	15E	5,09 mm
	8E	6,24 mm	16E	5,35 mm

Dari hasil pengukuran ketebalan, didapatkan hasil perbandingan antara dimensi awal dengan dimensi setelah gagal. Dimana perbedaan dimensi yang ekstrim terjadi pada diameter bagian tengah (Potongan B – B, Potongan C – C, dan Potongan D – D). Salah satu contohnya ada pada potongan B – B, tepatnya pada titik 5B dan 6B. dimana dari hasil pengukuran yang di dapat menghasilkan perbedaan ketebalan yang cukup ekstrim yaitu dari ketebalan 4,45 mm ke 0,93 mm.

Perbedaan ketebalan ini menunjukkan jika bentuk aliran yang menabrak dinding merupakan aliran dua fasa (*steam* dan air) dimana *droplet* dari air menabrak permukaan dalam pipa sehingga terjadi deformasi oleh *droplet* dari air ke permukaan dalam pipa. Gaya tekan dari *droplet* ke permukaan dalam pipa secara terus menerus menyebabkan permukaan terkikis hingga terbentuk lubang [13,15]. Dan adanya perbedaan ketebalan yang tergolong ekstrim (selisih ketebalan tinggi) menunjukkan jika kegagalan lebih dominan disebabkan oleh erosi [15].

4.5 Pengujian *Spectrometry*

Pengujian komposisi kimia yang terdapat pada material pipa *elbow* dilakukan dengan metode pengujian *spectrometry*. Pengujian ini dilakukan dengan cara memotong sebagian dari material untuk dijadikan sampel uji. Sampel tersebut kemudian diuji menggunakan *spectrometer* dan dibandingkan dengan komposisi kimia menurut standar ASTM A216 *grade WCB (Wrought Carbon grade B)* seperti yang terlihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil pengujian komposisi kimia menggunakan *spectrometer* yang dibandingkan dengan komposisi kimia menurut ASTM A216 *grade WCB*.

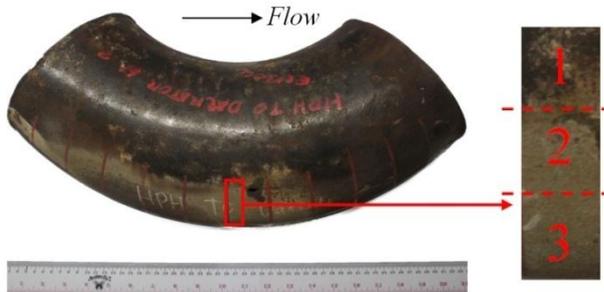
Unsur – Unsur Penyusun	%		
	ASTM A 216 <i>Grade WCB</i>	Spesimen 1	Spesimen 2
C	0,30 max	0,230	0,223
Fe	<i>Balance</i>	<i>balance</i>	<i>balance</i>
Si	0,60 max	0,265	0,259
Mn	1,0 max	0,550	0,532
P	0,04 max	0,019	0,017
S	0,045 max	0,010	0,009
Ni	-	0,011	0,011
Cr	-	0,013	0,013

Setelah dibandingkan dengan komposisi kimia standar yaitu ASTM A216, baik spesimen 1 maupun spesimen 2 memiliki komposisi kimia sesuai dengan ASTM A216. Dari pengujian *spectrometry* didapatkan beberapa komposisi kimia penyusun material yang salah satunya adalah kandungan karbon (C) yang bernilai 0,23 pada spesimen 1 dan 0,223 pada spesimen 2. Hal ini menunjukkan bahwa pipa *elbow* merupakan jenis material *low carbon steel (cast)*. Hasil *spectrometer* menunjukkan sedikit perbedaan komposisi kimia namun secara

keseluruhan masih dianggap sesuai dengan ASTM A216 [17]. Hasil ini menunjukkan pengaruh unsur korosi yang membuat pipa *elbow* mengalami kegagalan sangat sedikit.

4.6 Pengujian Metalografi

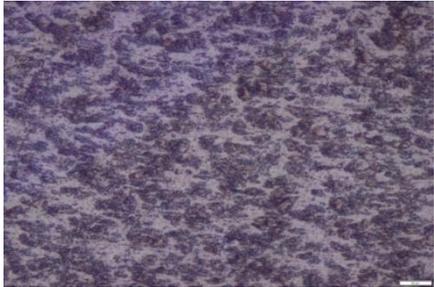
Analisa mikrostruktur dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro dari suatu spesimen uji yang diambil dari bagian pada pipa *elbow* ASTM A216 dengan Grade WCA akibat lingkungan kerjanya. ASTM A216 dengan Grade WCA merupakan golongan *low carbon steel (cast)* dengan komposisi karbon maksimal 0,3%. Permukaan dalam pipa *elbow* berkontak langsung dengan uap dari HPH pada kisaran temperatur 194,4 – 197,9 °C dan permukaan luar pipa *elbow* terinsulasi. Sampel yang digunakan pada pengujian mikro struktur adalah spesimen 1, 2 dan 3 seperti pada gambar 4.5.

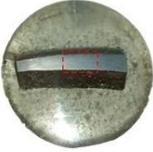


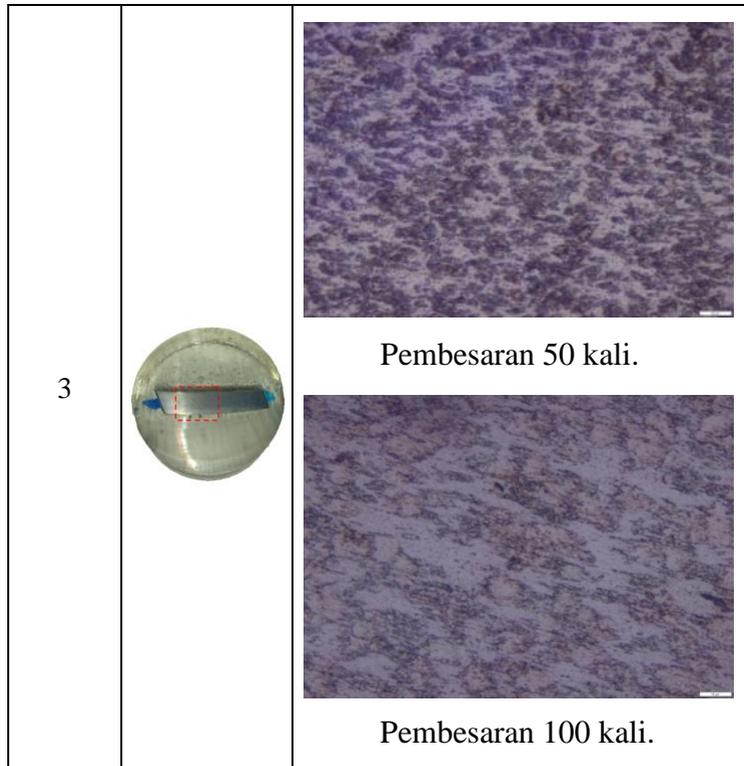
Gambar 4.7 Plot Spesimen Uji Metalografi

Setelah sampel diambil dari spesimen dengan cara dipotong menggunakan *wire cute* kemudian spesimen tersebut di *mounting* agar lebih mudah dalam proses *grinding* dan *polishing*. Selanjutnya spesimen di etsa menggunakan alkohol dan nitel dengan perbandingan 9,8 : 0,2. Kemudian dilakukan proses metalografi yang hasilnya terlihat pada tabel 4.11.

Tabel 4.11 Tabel struktur mikro yang diamati pada sisi kanan spesimen

Potongan Ke	Titik Pengujian	Hasil Pengujian
1		 <p>Pembesaran 50 kali.</p>  <p>Pembesaran 100 kali.</p>

<p>2</p>		 <p>Pembesaran 50 kali.</p>  <p>Pembesaran 100 kali.</p>
----------	---	--

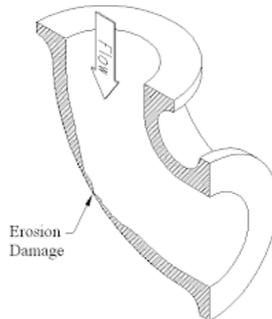


Spesimen 1, 2, dan 3 merupakan spesimen pipa yang mengalami kegagalan. Perbedaan terletak pada besarnya pengikisan yang terjadi. Spesimen 1 mengalami pengikisan terkecil sedangkan spesimen 3 mengalami pengikisan terbesar. Pada hasil pengamatan struktur mikro, fasa yang terbentuk yaitu *ferrite* ditunjukkan dengan warna putih dan *pearlite* yang terbentuk pada spesimen ditunjukkan dengan warna hitam kecoklatan. Hal ini sesuai dengan kandungan mikrostruktur yang ada pada diagram Fe-Fe₃C. Dengan komposisi kimia dari spesimen yang berstandar ASTM A216, spesimen pipa *elbow* tergolong *low carbon steel (cast)*. Gambar-gambar yang terdapat pada tabel 4.11

menunjukkan kesesuaian pipa *elbow* dengan struktur mikro *low carbon steel (cast)*. Tidak adanya perbedaan fasa pada spesimen 1, 2, dan 3 menunjukkan bahwa spesimen tersebut tidak mengalami perlakuan seperti tarik atau tekan yang mengakibatkan perubahan bentuk secara makroskopis sehingga struktur mikronya pun ikut berubah. Hal ini sesuai dengan teori dimana kegagalan karena korosi erosi yang disebabkan oleh aliran dua fasa (*steam air*) [13].

4.7 Penyebab dan Mekanisme Kegagalan

Setelah semua pengujian dilakukan, didapatkan penyebab dari kegagalan yang terjadi pada pipa *elbow* dari *High Pressure Heater* (HPH) ke *deaerator* yaitu korosi erosi jenis *Liquid Droplet Impingement* (LDI) oleh aliran dua fasa (*steam* dan air) [13]. Hal ini dibuktikan dari pengamatan visual dengan hasil perubahan ketebalan secara signifikan karena adanya pengaruh erosi oleh aliran dua fasa (*steam* dan air) dan perubahan warna karena adanya pengaruh korosi oleh air (H_2O) yang berkontak langsung dengan besi (Fe). Dari pengujian *wall thickness test* dan pengukuran ketebalan dengan hasil ketebalan terkecil berada di sisi tepi yang disebabkan oleh volume dari *droplet* yang lebih besar pada sisi tepi. Dari pengujian *spectrometry* dan *metalography* dengan hasil tidak adanya perubahan komposisi kimia dan struktur mikro. Hal ini sesuai dengan teori yang ada bahwa kegagalan karena korosi erosi tidak menyebabkan perubahan komposisi kimia dan struktur mikro [13].



Gambar 4. 8 Mekanisme Kegagalan pada Pipa *Elbow*

Untuk mekanisme hingga terjadinya lubang karena dari aliran dua fasa yaitu *steam* dan air yang berbentuk *droplet* mengalir secara bersamaan menabrak permukaan dalam pipa *elbow*. Tubrukan ini melibatkan material solid dengan tetesan cairan (*droplet*) yang membuat adanya tekanan impulsif dan destruktif. Prosesnya dimulai dari tahap inkubasi, dimana pada tahap ini permukaan material tidak berubah karena material hanya mengalami deformasi elastis. Pada tahap percepatan, erosi mulai terjadi di permukaan yang disebabkan oleh konsentrasi tegangan melebihi batas *fatigue* material, dan tingkat penipisan pada dinding material meningkat dengan cepat. Kemudian, tingkat penipisan pada dinding material mencapai nilai maksimum (tingkat maksimum erosi). Ketika permukaan material menjadi kasar oleh deformasi plastik, tingkat penipisan pada dinding material menurun karena efek bantalan oleh kehadiran pelapis cair di atas permukaan kasar (tahap deselerasi). Setelah itu, tingkat penipisan dinding mendekati tahap akhir, dimana tingkat erosi menjadi konstan terhadap waktu [14]. Hal tersebut terjadi secara terus menerus dengan kecepatan aliran 33,42 m/s – 35,38 m/s hingga terjadilah lubang hanya dalam waktu 7 tahun dari sejak awal mula pipa digunakan. Secara ilustrasi mekanismenya bisa dilihat pada gambar 4.8 dimana aliran

yang menabrak dinding permukaan menyebabkan permukaan terkikis dan daerah pengikisan tersebut disebabkan karena erosi.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dari analisis kegagalan pipa *elbow* dari *high pressure heater* ke *deaerator* pada pembangkit listrik tenaga uap yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal pada penelitian ini. Diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Pada pengamatan visual didapatkan hasil berupa lubang yang terlihat dari permukaan luar pipa. Sedangkan dari permukaan dalam pipa terlihat adanya perubahan warna, perubahan ketebalan, dan terdapat lubang.
2. Hasil dari *wall thickness test* menunjukkan adanya pengurangan ketebalan pada daerah sudut luar pipa *elbow* secara signifikan (ekstrim). Salah satu contohnya perbedaan ketebalan dari titik 14B ke titik 14C dengan nilai ketebalan dari 4,31 mm ke 1,41 mm (selisih 2,9 mm). Dan ketebalan terkecil berada pada bagian tepi yang disebabkan oleh aliran dua fasa (*steam* dan air) dengan volume *droplet* dari air terbagi menjadi dua pada setiap tepinya (*droplet* banyak ke bagian tepi).
3. Hasil pengukuran ketebalan juga menunjukkan adanya pengurangan ketebalan pada daerah sudut luar pipa *elbow* secara signifikan (ekstrim) pada potongan B – B, potongan C – C, potongan D – D.
4. Pengujian *spectrometry* menghasilkan komposisi kimia yang secara keseluruhan sesuai dengan komposisi kimia jenis materi pipa *elbow* yang digunakan yaitu ASTM A216 Grade WCB.
5. Pengujian metalografi menghasilkan struktur mikro yang sesuai dengan struktur mikro *low carbon steel*

(*cast*). Dimana material dengan standar ASTM A216 Grade WCB merupakan jenis material *low carbon steel (cast)*.

6. Perubahan warna dan perubahan ketebalan yang terjadi pada pipa *elbow* dapat disebabkan oleh pengikisan karena adanya proses erosi yang disertai korosi oleh aliran dua fasa (*steam* dan air). Sehingga proses erosi yang terjadi termasuk dalam golongan kegagalan material karena *Liquid Droplet Impingment (LDI)*.
7. Mekanisme kegagalannya dimulai dari aliran dua fasa yaitu *steam* dan air yang berbentuk *droplet* mengalir secara bersamaan menabrak permukaan dalam pipa *elbow* dan mengakibatkan pengikisan. Selanjutnya, kontak antara besi (Fe) dengan air mengakibatkan korosi. Hal tersebut terjadi secara terus menerus dengan kecepatan aliran 33,42 m/s – 35,38 m/s hingga terjadilah lubang hanya dalam waktu 7 tahun dari sejak awal mula pipa digunakan.

1.2 Saran

Beberapa hal yang dapat disarankan untuk pencegahan dan penanganan kegagalan serupa adalah sebagai berikut :

1. Sistem kontrol dan pemeriksaan ketebalan pipa secara rutin agar dapat meminimalkan terjadinya kerusakan serupa.
2. Pada penelitian lebih lanjut diperlukan analisa yang lebih detail mengenai laju pengikisan pada pipa *elbow* sehingga dapat diketahui umur pipa akibat proses erosi.
3. Pada penelitian lebih lanjut diperlukan simulasi mengenai kecepatan *steam* yang mengalir melewati pipa *elbow* sehingga dapat diketahui kegagalan pipa akibat kecepatan *steam*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Marsudi, Ditjeng., 2006. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga.
2. Moran MJ, Shapiro HN., 2006. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons Inc..
3. Srinivas T, Gupta A.V. S. S. K.S., Reddy B.V., 2007. *Generalized Thermodynamic Analysis of Steam Power Cycles with 'n' Number of Feedwater Heaters*, International Journal of Thermodynamics, Vol. 10, No. 4, p 177-185.
4. UNEP, 2008, *Boiler & Pemanas Fluida Thermis*, United Nation EnvironmentProgram.
5. Woodruff, Everett B., dkk., 2005, *Steam Plant Operation 8th Edition*, McGraw-Hill, New York.
6. Kurnia, Akbar., 2015, *Gatecycle Simulation Of The Effect Of Off Service High Pressure Heater To Performance Of 200 Mw Steam Power Plant Pt. Pjb Gresik*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
7. H.M. Tawancy, A. Ul-Hamid, N.M. Abbas., 2014. *Practical Engineering Failure Analysis*. Vol 27 :715.
8. Hamed Mansoori, Reza Mirzaee, dkk., 2017. *Pitting corrosion failure analysis of a wet gas pipeline*, Engineering Failure Analysis, Vol 82 : 16 – 25.
9. J. H. Shi., 2015. *Creep-fatigue Crack Growth Assessments of Elbow end Welds*, Procedia Engineering 130 : 893 – 901.
10. L. Zeng, S. Shuang, X. P. Guo, G. A. Zhang., 2016. *Erosion-corrosion of stainless steel at different locations of a 90° elbow*, Corrosion Science 111 : 72 – 83.
11. R. Tunstall, D. Laurence, R. Prosser, A. Skillen., 2016. *Large eddy simulation of a T-Junction with upstream elbow: The role of Dean vortices in thermal fatigue*, Applied Thermal Engineering 107 : 672 – 680.
12. Q. Qiao, G. Cheng, Y. Li, W. Wu, H. Hu, and H. Huang., 2017. *Corrosion failure analyses of an elbow and an elbow-to-pipe weld in a natural gas gathering pipeline*, Eng. Fail.

- Anal.
13. S. Nestic, J. Postlethwaite., 2000. *Erosion-Corrosion in Single and Multiple Phase*, Uhlig's Corrosion Handbook 2nd Edition.
 14. T. Ikehagi., 2011. *On evaluation of Liquid Droplet Impingement erosion rate based on fluid/solid coupled simulation*, Proc. 8th Int. Conf. Flow Dynamics, Sendai, Japan.
 15. Ashbaugh W.G., 1986. *Failure Analysis and Prevention, Volume 11 of ASM Handbook*, p 188-202.
 16. D.P. Robert, M.H. Harvey., 1991. *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis 2nd edition*, McGraw-Hill, New York.
 17. ASTM A216 Gr. WCB material properties, <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ASTM-A216-Grade-WCB-Cast-Steel> (diakses pada 10 Desember 2018)

BIODATA PENULIS



Dwi Ariyanto, anak kedua bagi orangtuanya, lahir di Kebumen 18 Mei 1997. Anak kedua dari pasangan Muchson dan Siti Marwiyah ini sudah mengenyam pendidikan dari TK Nurul Iman Kertodeso sehingga tahun 2002 masuk MI Nurul Iman Kertodeso dan lulus pada tahun 2008, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMPN 1 Mirit hingga lulus pada tahun 2011 dan berlanjut di SMAN 2 Kebumen hingga lulus pada tahun 2014. Kemudian penulis merantau hingga Surabaya dengan status sebagai mahasiswa Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya angkatan 2014 (M-57). Selama kuliah penulis aktif dalam dunia kemahasiswaan. Menjabat sebagai pengurus Mesin Music Club selama dua kali periode kepengurusan. Pada periode kepengurusan pertama menjabat sebagai staff *Human Resourch Development* (HRD) dan peridode kepengurusan menjabat sebagai Sektretaris Umum. Penulis juga menjadi asisten lab dan pernah dipercaya sebagai kordinator praktikum laboratorium metalurgi 1. Selain itu banyak pula pelatihan dan kegiatan yang diikuti penulis selama menjadi mahasiswa, baik internal maupun eksternal kampus.