



**TUGAS AKHIR - TL184834**

# **ANALISA KEGAGALAN PADA SHAFT MESIN CIRCULATING WATER PUMP DI PEMBANGKIT LISTRIK PT. X**

**BRIAN HARIMAN TRIANTORO**  
NRP. 0251154000010

Dosen Pembimbing  
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.  
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc(Eng), PhD.

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
**Surabaya 2019**





**TUGAS AKHIR - TL184834**

# **ANALISA KEGAGALAN PADA SHAFT MESIN CIRCULATING WATER PUMP DI PEMBANGKIT LISTRIK PT. X**

**BRIAN HARIMAN TRIANTORO**  
NRP. 0251154000010

Dosen Pembimbing  
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.  
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc(Eng), PhD.

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

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TL184834**

# **FAILURE ANALYSIS ON SHAFT OF CIRCULATING WATER PUMP USED IN POWER PLANT PT.X**

**BRIAN HARIMAN TRIANTORO**  
NRP 025 1 15 40000 010

**Dosen Pembimbing**  
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.  
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc(Eng), PhD.

**MATERIAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
Faculty of Industrial Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019

*(This page is intentionally left blank)*

**ANALISA KEGAGALAN PADA SHAFT MESIN  
CIRCULATING WATER PUMP DI PEMBANGKIT  
LISTRIK PT. X**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Teknik Korosi dan Kegagalan Material  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:  
**BRIAN HARIMAN TRIANTORO**  
NRP 0251154000010

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc ..... (Pembimbing I)
2. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc(Eng), PhD ..... (Pembimbing II)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# ANALISA KEGAGALAN PADA SHAFT MESIN CIRCULATING WATER PUMP PADA PEMBANGKIT LISTRIK PT. X

**Nama** : Brian Hariman Triantoro  
**NRP** : 0251154000010  
**Departemen** : Departemen Teknik Material  
**Dosen Pembimbing** : Tubagus Noor Rohmannudin,  
ST., M.Sc.  
**Co-Pembimbing** : Lukman Noerochim, ST., M.Sc(Eng),  
PhD.

## **Abstrak**

*Mesin circulating water pump (CWP) adalah mesin yang digunakan sebagai pendingin dalam sistem pembangkit listrik dengan cara memompakan air laut. Shaft merupakan bagian dari mesin CWP yang digunakan untuk menyalurkan gaya dari mesin motor ke propeler pompa. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa faktor penyebab, mekanisme kegagalan, serta solusi yang dapat digunakan pada kegagalan shaft CWP. Beberapa pengujian dilakukan untuk mendukung analisa ini. Beberapa pengujian tersebut yaitu pengujian makro, pengujian komposisi, pengujian metalografi, pengujian kekerasan, SEM dan XRD. Hasil pengujian makro didapatkan lokasi initial crack, crack propagation, final crack dan defect. Hasil uji komposisi menampilkan material shaft adalah stainless steel 316. Pengujian metalografi menunjukkan struktur mikro adalah austenit. Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui permukaan pada daerah initial crack, crack propagation, dan final crack. Uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan yang dekat patahan lebih besar daripada daerah jauh dari patahan. Pengujian XRD menghasilkan tegangan sisa dekat permukaan lebih tinggi dengan nilai 494,08 MPa dibandingkan yang jauh dari permukaan sebesar 204,58 MPa. Setelah dilakukannya pengujian-*

*pengujian tersebut didapatkan faktor penyebab kegagalan yaitu besarnya beban yang diterima shaft dengan nilai 162,19 MPa sehingga menyebabkan shaft cepat mengalami patah lelah selain itu adanya korosi yang berupa  $FeCl_2$  dan  $Fe_3O_4$  juga mempercepat shaft mengalami kegagalan. Mekanisme kegagalan shaft diawali adanya initial crack pada daerah keyway karena adanya pemusatan tegangan dan kemudian retakan merambat pada permukaan sebelum terjadi final crack dikarenakan shaft tidak mampu menahan tegangan yang terjadi.*

***Kata kunci: Shaft, circulating water pump, analisa kegagalan, korosi***

# FAILURE ANALYSIS ON SHAFT OF CIRCULATING WATER PUMP USED IN POWER PLANT PT.X

**Student Name** : Brian Hariman Triantoro  
**NRP** : 0251154000010  
**Department** : Departemen Teknik Material  
**Advisor** : Tubagus Noor Rohmannudin.  
ST., M.Sc.  
**Co-Advisor** : Lukman Noerochim, ST., M.Sc(Eng),  
PhD.

## Abstract

*Circulating water pump (CWP) is a machine that is used as a condenser in a power plant system by pumping the seawater. Shaft is a part of CWP that is used to transmit force from the motor engine to the pump's propeller. This study was conducted to analyze the factors, failure mechanism and solutions that can be used in CWP shaft failures. Several tests were carried out to support this analysis. These tests are macro testing, composition testing, metallography, SEM and XRD. From macro test result obtained the location of initial cracks, crack propagation, final cracks and defects. From composition test using optical electron microscopy (OES) shows that the shaft material is stainless steel 316. Metallography shows that the microstructure of the material is austenite. SEM testing was carried out to determine the surface in the initial crack, crack propagation, and final crack. From the result of hardness test shows that the hardness value near the surface is greater than the farther from the surface. From XRD residual stress in the edge of surface is higher 494,08 MPa and the farthest is 204,58MPa After doing these tests, it was found that the factor causing the failure were the amount of load received by the shaft with 162,1935MPa, causing the shaft to quickly experience fatigue, beside that the presence of corrosion by  $FeCl_2$  and  $Fe_3O_4$  also accelerated the shaft to fail. The shaft failure mechanism begins with the initial crack in the keyway because of the*

*concentration of stress in there and then the crack propagate on the surface before the final crack occurs because the shaft is unable to whitstand the stresses.*

***Keywords: Shaft, circulating water pump, failure analysis, corrosion.***

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur penulis haturkan kehadiran Allah Yang Mahakuasa dan Maha memberi karunia. Sehingga atas kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul :

### **“ANALISA KEGAGALAN PADA SHAFT MESIN CIRCULATING WATER PUMP PADA PEMBANGKIT LISTRIK PT. X”**

Penulis dengan penuh rasa hikmat ingin menyampaikan rasa terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan S.T., M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS
3. Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir yang telah membimbing, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
4. Bapak Lukman Noerochim, ST., M.Sc(Eng), PhD. selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir yang telah membimbing, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 3 Juli 2019

Penulis,

Brian Hariman Triantoro  
0251154000010

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Circulating Water Pump</i> .....	5
2.2 Poros/Shaft .....	8
2.3 Baja .....	10
2.4 Baja Tahan Karat ( <i>Stainless Steel</i> ).....	11
2.4.1 Baja Tahan Karat Martensitik .....	15
2.4.2 Baja Tahan Karat Austenitik.....	16
2.4.3 Baja Tahan Karat Feritik.....	18
2.5 Kegagalan dan Analisa Kegagalan .....	19
2.5.1. Kegagalan .....	19
2.5.2. Analisa Kegagalan.....	22
2.6 Patah Ulet dan Patah Getas.....	23
2.6.1. Patah Ulet.....	25
2.6.2. Patah Getas.....	29
2.7 Patah Lelah .....	30
2.7.1. Tahap Retak Awal ( <i>Crack Intiation</i> ).....	33

2.7.2. Tahap Perambatan Retak ( <i>Crack Propagation</i> )	34
2.7.3. Tahap Patah Akhir	36
2.7.4. Faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Patah Lelah	36
2.8 Korosi	38
2.8.1 Jenis-Jenis Korosi	39
2.8.2 Korosi Pada Baja Tahan Karat	41
2.8.3 Korosi Pada Shaft CWP	43
2.9 Penelitian Sebelumnya	43
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b>	<b>45</b>
3.1 Diagram Alir penelitian	45
3.2 Metode Penelitian	45
3.3 Material	46
3.4 Alat dan Bahan	48
3.4.1 Alat	48
3.4.2 Bahan	49
3.5 Tahapan Penelitian	49
3.5.1 Pengambilan Data dan Komponen	49
3.5.2 Pengamatan Makroskopik	50
3.5.3 Pengujian Penetran	50
3.5.4 Preparasi Spesimen	51
3.5.5 Pengujian Metalografi	51
3.5.6 Pengujian Kekerasan	53
3.5.7 Pengujian SEM	53
3.5.8 Pengujian XRD	54
3.5.9 Pengujian Komposisi	55
3.6 Rancangan Penelitian	55
3.6.1 Rancangan Pengujian	56
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>57</b>
4.1 Hasil	57
4.1.1. Data Operasional	57
4.1.2. Hasil Pengamatan Makro	57



4.1.3. Hasil Pengujian Penetran .....	59
4.1.4. Hasil Pengamatan Stereomikroskop .....	60
4.1.5. Hasil Pengujian Komposisi Material <i>Shaft</i> .....	63
4.1.6. Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>Shaft</i> .....	64
4.1.7. Hasil Pengamatan SEM ( <i>Scanning Electron Microscope</i> ) .....	65
4.1.8. Hasil Pengujian Kekerasan .....	67
4.1.9. Hasil Pengujian XRD .....	68
4.2 Pembahasan .....	69
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>75</b>
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran.....	76
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>77</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>81</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	<b>93</b>
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	<b>95</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Diagram Skematik Pembangkit Listrik .....	5
<b>Gambar 2. 2</b>	Propeler dan Shaft dari Circulating Water Pump .....	6
<b>Gambar 2. 3</b>	Struktur Circulating Water Pump .....	7
<b>Gambar 2. 4</b>	Skematik Kegagalan Lower Shaft .....	10
<b>Gambar 2. 5</b>	Kelompok Klasifikasi Stainless Steel .....	13
<b>Gambar 2. 6</b>	Diagram Keseimbangan Fe-Cr .....	14
<b>Gambar 2. 7</b>	Diagram Fasa Austenitik Stainless Steel.....	15
<b>Gambar 2. 8</b>	Beberapa Representatif Kandungan Ni dan Cr dalam Baja Tahan Karat Austenitik .....	17
<b>Gambar 2. 9</b>	Skematik Ciri Patah Getas dan Patah Ulet dari Diagram Tegangan-Regangan .....	24
<b>Gambar 2. 10</b>	(a) Patahan Sangat Ulet. (b) Patahan Ulet Sedang. (c) Patahan Getas tanpa Deformasi Plastis. ....	26
<b>Gambar 2. 11</b>	Tahapan Patahan Cup Dan Cone (a) Awal Necking, (b) Terbentuknya Cavity Kecil, (c) Pengumpulan Cavity Hingga Menjadi Retakan, (d) Perambatan Retak, (e) Patahan Geser Dengan Sudut 45° Terhadap Arah Tegangan .....	27
<b>Gambar 2. 12</b>	(A) Patah Ulet (Cup dan Cone) pada Aluminium dan (B) Patah Getas pada Mild Steel. ....	28
<b>Gambar 2. 13</b>	(a) SEM yang Menunjukkan Spherical Dimple Karakteristik, Patahan Hasil Beban Tarik Uniaxial, 3300x dan (b) SEM yang Menunjukkan Spherical Dimple karakteristik hasil beban geser, 5000x. ....	28
<b>Gambar 2. 14</b>	(a) Foto yang Menunjukkan Bentuk V "Chevron" sebagai Karakteristik Patah Getas dan (b) Foto Yang Menunjukkan	

	Permukaan Patah Getas Daerah Asal Retakan.....	29
<b>Gambar 2. 15</b>	(a) Skema Perambatan Retak yang Melewati Batas Butir (Transgranular) (b) Hasil SEM Dari Patah Secara Transgranular.....	30
<b>Gambar 2. 16</b>	(a) Skema Perambatan Retak yang Terjadi Sepanjang Batas Butir (Integranular) (b) Hasil SEM Dari Patah Secara Integranular..	30
<b>Gambar 2. 17</b>	Tahapan Kegagalan Lelah.	32
<b>Gambar 2. 18</b>	Skema Pola Patahan.....	32
<b>Gambar 2. 19</b>	S-N Diagram Stainless Steel 316.....	33
<b>Gambar 2. 20</b>	Permukaan Patahan Pada Shaft yang Mengalami Patah Lelah. Awal Retak pada Sudut Keyway .....	34
<b>Gambar 2. 21</b>	Skematis Tahapan Retak Mikro dan Makro pada Kelelahan Logam .....	35
<b>Gambar 2. 22</b>	Faktor Desain (a) Desain yang Buruk dengan Sudut Tajam. (b) Desain yang Baik dengan Sudut yang tidak Tajam .....	36
<b>Gambar 2. 23</b>	Mekanisme Korosi Fe dan Au .....	39
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram Alir Penelitian .....	45
<b>Gambar 3. 2</b>	Circulating Water Pump Shaft yang Mengalami Patah .....	47
<b>Gambar 3. 3</b>	Penampang Patahan Circulating Water Pump Shaft .....	48
<b>Gambar 3. 4</b>	(a) Kamera Digital Olympus Lumix dan (b) Stereomicroscope Carl Zeiss Stemi DV4 ....	50
<b>Gambar 3. 5</b>	Satu Set Peralatan Pengujian Penetran. (a) Penetran (b) Developer (c) Cleaner/Remover .....	51
<b>Gambar 3. 6</b>	Mikroskop Optik Olympus BX51M-RF .....	52
<b>Gambar 3. 7</b>	Universal Hardness Tester .....	53
<b>Gambar 3. 8</b>	Mesin Pengujian SEM EDX.....	54

<b>Gambar 3. 9</b>	Mesin XRD PAN Analytical Xpert Pro .....	55
<b>Gambar 4. 1</b>	Permukaan Patahan Shaft Mesin CWP .....	58
<b>Gambar 4. 2</b>	Pola Garis Striasi yang Terlihat Setelah Shaft Dibersihkan .....	59
<b>Gambar 4. 3</b>	Hasil Pengujian Penetran .....	60
<b>Gambar 4. 4</b>	Titik Initial Crack .....	61
<b>Gambar 4. 5</b>	Titik <i>Defect</i> dan Rambatan Retak .....	61
<b>Gambar 4. 6</b>	Daerah Garis Striasi .....	62
<b>Gambar 4. 7</b>	Crack pada Daerah Patah Cepat .....	62
<b>Gambar 4. 8</b>	Struktur Mikro Daerah Jauh dari Permukaan Patahan dengan dengan Pembesaran 1000x .....	64
<b>Gambar 4. 9</b>	Struktur Mikro Daerah Dekat dari Permukaan Patahan dengan dengan Pembesaran 1000x .....	65
<b>Gambar 4. 10</b>	Fraktografi Bagian Initial Crack .....	66
<b>Gambar 4. 11</b>	Fraktografi Bagian Daerah Striasi .....	66
<b>Gambar 4. 12</b>	Fraktografi Bagian Daerah Patah Cepat .....	67
<b>Gambar 4. 13</b>	Perbandingan Kekerasan Pada Daerah Initial Crack, Propagation, dan Final Crack	68
<b>Gambar 4. 14</b>	Hasil Uji XRD pada Daerah yang Dekat dan Jauh dari Patahan .....	69

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **DAFTAR TABEL**

<b>Tabel 2. 1</b>	Kodifikasi Baja Tahan Karat.....	13
<b>Tabel 2. 2</b>	Kasus Kegagalan Material Akibat Perawatan Komponen Mesin. ....	20
<b>Tabel 2. 3</b>	Kasus Kegagalan Material Akibat Perawatan Komponen Mesin. ....	21
<b>Tabel 2. 4</b>	Penyebab Kegagalan dalam Komponen Mesin	21
<b>Tabel 2. 5</b>	Patah Ulet Vs Getas .....	24
<b>Tabel 2. 6</b>	Variabel yang Mempengaruhi Kekuatan Lelah	37
<b>Tabel 2. 7</b>	Pitting Resistance Equivalent Numbers .....	42
<b>Tabel 3. 1</b>	Rancangan Penelitian.....	56
<b>Tabel 4. 1</b>	Data Operasional dan Spesifikasi Mesin CWP	57
<b>Tabel 4. 2</b>	Perbandingan Uji Komposisi Shaft dengan Standard Stainless Steel 316L .....	63
<b>Tabel 4. 3</b>	Distribusi Kekerasan Shaft.....	67
<b>Tabel 4. 4</b>	Hasil Perhitungan Regangan Kristal.....	69
<b>Tabel 4. 5</b>	Senyawa Korosi Hasil Analisa XRD .....	69

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Listrik merupakan gerakan partikel dari tempat berpotensi tinggi ke tempat yang berpotensi rendah melewati konduktor atau penghantar. (Bintoro, 2000). Listrik merupakan energi yang vital untuk keberlangsungan aktivitas manusia baik bagi individu, kelompok masyarakat maupun industri. Energi khususnya listrik merupakan bahan bakar untuk aktivitas ekonomi. Energi memicu pertumbuhan ekonomi sehingga menjadi perhatian bagi semua negara. (Hartono, 2017). Maka dari itu ketersediaan listrik pun mempengaruhi pertumbuhan ekonomi. Menurut data laporan perekonomian tahun 2015, pertumbuhan ekonomi Indonesia terus meningkat pada kisaran 5% pada tahun 2012-2015 dan cenderung stabil pada tahun-tahun selanjutnya. Menurut data statistik ketenagalistrikan tahun 2017, sampai dengan akhir tahun 2017 pembangkit tenaga listrik terpasang di Indonesia mencapai 60.789 MW dengan pertumbuhan 1.9% dibandingkan tahun 2016. (Kementerian ESDM, 2017). Walaupun ketersediaan listrik sebesar 219.544 GWh. (Kementerian ESDM, 2017) , tetapi pada tahun 2015 elektrifikasi nasional masih di angka 76% dari seluruh wilayah Indonesia dan salah satu masalahnya adalah kurangnya pertumbuhan pembangkit tenaga listrik yang setara dengan pertumbuhan penduduk Indonesia sebesar 6.2% per tahun. (Dewan Energi Nasional, 2016).

Pembangkit listrik adalah salah satu sistem proses pembangkitan listrik yang memanfaatkan uap air sebagai penggerak turbin yang dimana turbin tersebut akan menggerakkan generator listrik dan menghasilkan listrik. Sistem *circulating water* adalah salah satu fasilitas penting yang ada pada unit pembangkit daya termal, Sistem ini menggunakan

proses pemompaan air laut dan kemudian memberikannya ke kondesator untuk mendinginkan. *Circulating water pump* (CWP) selain menyediakann air untuk pendingin juga menyediakan untuk *water tank*. CWP mempunyai fungsi yang sangat penting pada sistem pembangkit listrik, jika terdapat gangguan pada pompa sistem kerja pembangkit listrik akan terganggu atau bahkan dapat mati total. (Susanto)

Pada tanggal 24 Oktober 2018 ditemukan *shaft* dari mesin CWP yang mengalami kegagalan. Patahnya material tersebut dapat dikarenakan mesin yang bekerja secara terus menerus dan berulang yang dimana *shaft* juga ikut di dalamnya sehingga material mengalami kelelahan. Selain itu lingkungan yang korosif juga dapat mempercepat laju patahnya material. Oleh karena itu, diperlukan analisis kegagalan pada *shaft* sehingga kegagalan seperti itu tidak terulang kembali.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Apa faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan material *shaft* pada mesin *circulating water pump* untuk pembangkit listrik?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan material *shaft* pada mesin *circulating water pump* untuk pembangkit listrik?
3. Bagaimana solusi penyelesaian dari kegagalan material *shaft* pada mesin *circulating water pump* untuk pembangkit listrik?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa faktor penyebab terjadinya kegagalan material *shaft* pada mesin *circulating water pump* untuk pembangkit listrik
2. Menganalisa mekanisme kegagalan material *shaft* pada mesin *circulating water pump* untuk pembangkit listrik

3. Menganalisa hal-hal yang perlu dilakukan untuk menjadi solusi agar kegagalan dapat ditanggulangi

#### **1.4 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Desain *shaft* dalam *circulating water pump* memenuhi standard operasional.
2. Material dianggap homogen di semua sisi.
3. Lingkungan atau air yang digunakan merupakan air laut pada umumnya.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat kepada seluruh pihak. Mahasiswa sebagai pelaksana penelitian mampu memahami serta mengaplikasikan ilmu yang telah didapatkan khususnya cabang ilmu analisa kegagalan. Pihak-pihak tertentu yang memiliki sistem pembangkit listrik dapat merapkan hasil penelitian ini untuk:

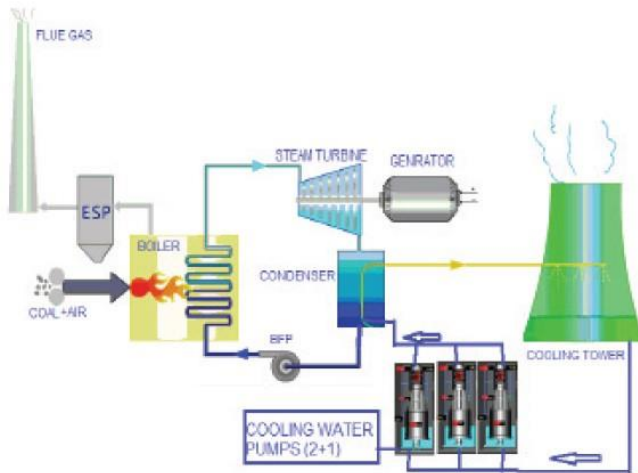
1. Menentukan faktor-faktor penyebab terjadinya kegaglaan pada *shaft* mesin *circulating water pump*.
2. Mencegah terjadinya kegagalan pada mesin serupa dikemudian hari.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Circulating Water Pump*

Sistem sirkulasi pompa air (*circulating water pump/ CWP*) adalah salah satu fasilitas penting pada unit pembangkit daya termal, yang digunakan untuk memompa air laut dan kemudian meneruskannya ke kondesator untuk mendinginkan uap pembuangan dari penukar panas (*heat exchanger*). (Yue-Ma, 2014). Gambar 2.1 menunjukkan sistem dari *circulating water pump* pada pembangkit listrik.



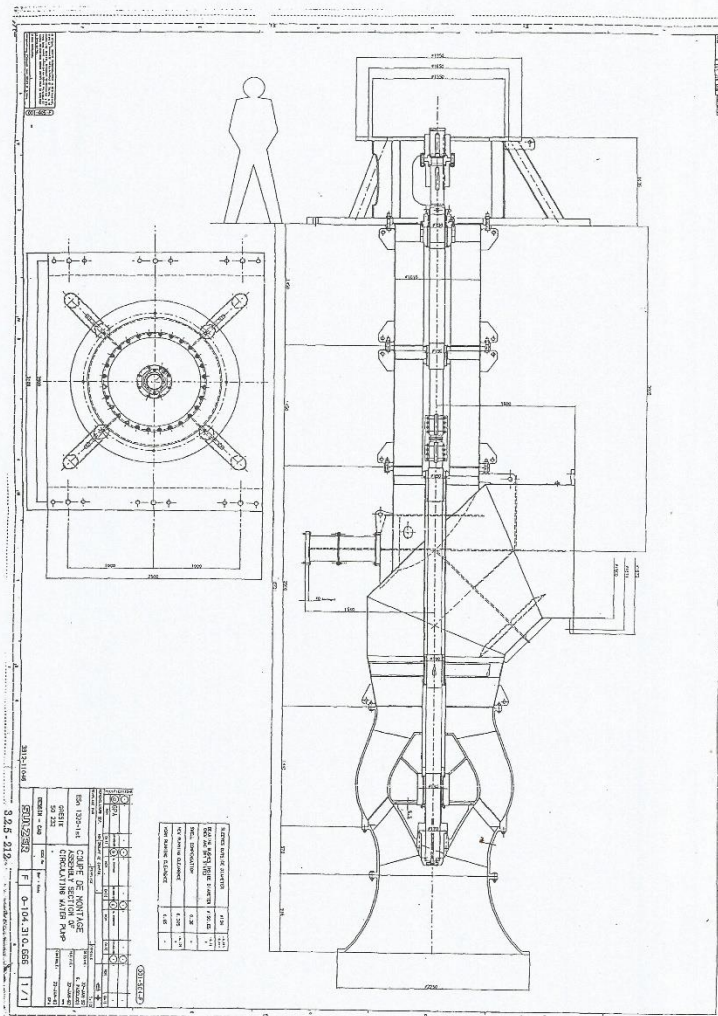
**Gambar 2. 1** Diagram Skematik dari Pembangkit Listrik  
(Kushwaha, 2015)

CWP juga merupakan salah satu bagian dari *cooling water system* dimana berfungsi untuk mendinginkan sistem dari pembangkit listrik.



**Gambar 2. 2** Propeler dan *Shaft* dari *Circulating Water Pump* (Dokumen Pribadi)

Pada Gambar 2.2 merupakan gambar propeler dan *shaft* CWP dan Gambar 2.3 merupakan gambar struktur CWP pada PT X.



**Gambar 2. 3** Struktur *Circulating Water Pump*  
(Operation and Maintenance Manual PT X)

Dikarenakan pada lingkungan sekitar CWP adalah air laut yang biasa mengandung garam yang tinggi, ion klorin, dan partikel sedimen sehingga diperlukan material yang tahan terhadap korosi dan sifat mekanis yang baik.

## 2.2 Poros/Shaft

Poros adalah logam batangan yang biasanya berbentuk silindris yang digunakan untuk membantu komponen yang berputar. (Muhammad, 2010). Poros berfungsi meneruskan tenaga baik berupa putaran, torsi, maupun *bending* dari satu bagian ke bagian yang lain. Akibat beban tersebut, poros dapat mengalami pembebanan yang berulang dan sering mengalami kegagalan dalam operasinya. Kegagalan akibat beban berulang sangat tidak diinginkan karena tanda-tandanya tidak diketahui secara langsung. Kegagalan ini dapat berupa retak (*crack*) yang terus berkembang hingga menjadi perambatan retak (*crack propagation*) dan kemudian menjadi patah. (Sugiarto, 2013).

Menurut Basselo (2014), secara garis besar poros dibedakan menjadi:

1. Poros Transmisi

Poros ini mendapat beban puntir murni atau kombinasi dari beban puntir dan lentur (*bending*). Daya ditransmisikan ke poros ini melalui kopling, roda gigi, sabuk dan rantai

2. Spindel

Spindel adalah poros transmisi yang relatif pendek, seperti poros utama mesin perkakas, dimana beban utamanya berupa puntiran. Syarat yang harus dipenuhi oleh poros ini adalah deformasinya harus kecil dan bentuk serta ukurannya harus diteliti.

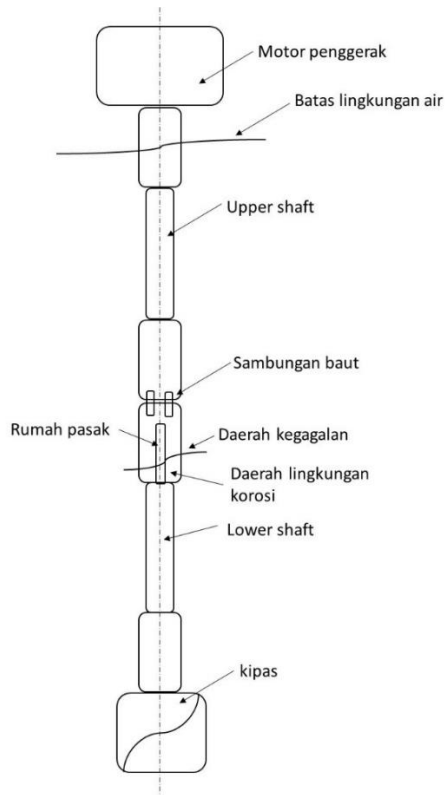
3. Gandar

Gandar adalah poros yang dipasang diantara roda-roda kereta barang dimana tidak mendapat beban puntir. Gandar hanya mendapat beban lentur, kecuali jika digerakkan oleh



penggerak mula dimana akan mengalami beban puntir juga. (Basselo, 2014).

Salah satu komponen pembangun *circulating water pump* (CWP) adalah poros. Poros pompa biasanya langsung terkena dengan air yang dipompakan. Pada saat penggunaan, poros pompa biasanya terkena degradasi yang disebabkan oleh korosi atau degradasi mekanis, yang menyatu dan mengakibatkan patah lelah. Korosi dapat menyebabkan korosi *fatigue* dan mempercepat laju patahnya poros. (Hamid, 2018). Kebanyakan poros pompa mengalami beban yang berflutuasi dari gabungan beban *bending* dan torsi pada konsentrasi tegangan yang bervariasi. (Haryadi, 2017). Gambar 2.4 merupakan skematik dari *lower shaft* CWP yang terjadi pada pembangkit listrik PT X.



**Gambar 2. 4** Skematik Kegagalan *Lower Shaft*  
(Hamid, 2018)

### 2.3 Baja

Baja merupakan paduan besi-karbon dan dapat mengandung konsentrasi elemen paduan lainnya. Sifat mekanik baja sangat sensitif dengan komposisi elemen paduan yang terdapat didalamnya. Baja merupakan logam yang paling banyak digunakan dalam bidang teknik dalam bentuk pelat, pipa, batang dan sebagainya. Secara garis besar, menurut komposisinya baja dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu baja karbon (*plain carbon steel*) dan baja paduan. Untuk baja

karbon diklasifikasikan menjadi 3 berdasarkan komposisi karbon di dalam baja tersebut. Baja karbon rendah ( $<0,3\%$  C), baja karbon menengah ( $0,3-0,7\%$  C) dan baja karbon tinggi ( $0,7\%-1,4\%$  C). (Smallman, 1999).

Untuk penggunaan dan sifat dari masing-masing baja sangat berbeda. Baja karbon rendah sangat luas pemakaiannya, sebagai baja konstruksi umum, rangka bangunan, baja tulangan beton, rangka kendaraan, mur, baut, pelat, perpipa, dan lain lain. Baja karbon menengah banyak digunakan untuk konstruksi mesin, seperti poros, batang torak, roda gigi, pegas dan lain-lain, yang memerlukan kekuatan dan ketangguhan yang lebih tinggi. Baja karbon tinggi dengan kadar karbon lebih dari  $0,7\%-1,4\%$  mempunyai sifat yang paling kuat dan lebih keras, tetapi keuletan dan ketangguhannya paling rendah. Baja ini digunakan terutama digunakan untuk konstruksi mesin yang memerlukan kekuatan lebih tinggi, serta untuk perkakas yang biasanya memiliki sifat tahan aus, misalnya digunakan untuk gunting, mata bor, reamer, tap dan perkakas tangan yang lain (Suherman, 1999).

#### **2.4 Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)**

Baja tahan karat (*stainless steel*) dikembangkan pada awal dekade abad 20 di United Kingdom dan Jerman dengan tipe yang paling pertama adalah tipe martensitik dan ferritik yang pada akhirnya penggunaan paling banyak adalah tipe austenitik. Pada tahun 1889, Riley menemukan bahwa penambahan nikel dapat menambah kekuatan tarik dari *mild steel* secara signifikan, dan pada tahun 1905 Portevin mempelajari bahwa baja yang mengandung krom lebih dari  $9\%$  mempunyai ketahanan terhadap serangan asam. (Gunn, 1997)

Sebagai salah satu dari klasifikasi material, baja tahan karat menjadi salah satu tulang punggung dari industri modern sejak ditemukan dan banyak digunakan di industri kimia, petrokimia, *off-shore*, pembangkit listrik, dan industri rumahan. (Khatak, 2002). Baja tahan karat banyak digunakan

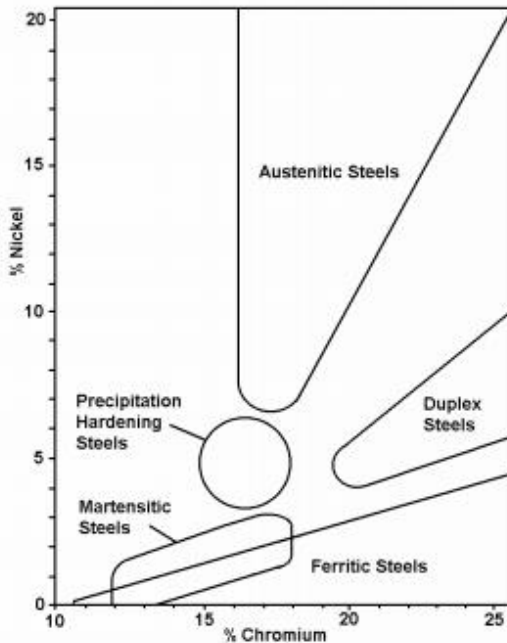
dalam konstruksi karena sifatnya yang baik antara lain, ketahanan korosi, perawatan yang mudah dan penampilan yang estetis. (Tao, 2017). Baja tahan karat mendapatkan sifat ketahanan korosi dengan adanya unsur Cr dengan konsentrasi minimal 11 wt% Cr, dengan kadar krom sebesar itu baja akan membentuk lapisan oksida yang melindungi dari korosi. Ketahanan korosi dapat diperkuat dengan penambahan nikel dan molybdeneum.

Menurut Khatak (2002), faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam mendesain baja tahan karat adalah:

1. Ketahanan korosi dan oksidasi di lingkungan kerja.
2. Sifat fisik dan mekanik
3. Karakteristik dalam fabrikasi seperti *hot* dan *cold work*.
4. Kemampuannya saat dilas. Kebanyakan *stainless steel* mengalami korosi *intergranular* saat dilas.

(Khatak, 2002)

Secara general, baja tahan karat dapat dikategorikan menjadi 3 grup besar dengan dasar fasa dominan yang dimiliki yaitu austenitik, feritik, dan martensitik. Austenitik *stainless steel* biasanya mengandung 17-18% Cr dan 8-11% nikel tetapi terkadang ditemukan kadar Cr sampai 23% dengan kandungan elemen lainnya. Baja tahan karat feritik biasanya mengandung 10.5-18% Cr dan sedikit nikel. Untuk martensitik mempunyai kadar Cr 11.5-18% Cr. (Tao, 2017). Untuk pengelompokkan baja tahan karat berdasarkan fasanya dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2. 5** Kelompok Klasifikasi *Stainless Steel*  
(Atlas Specialty Metals, 2008)

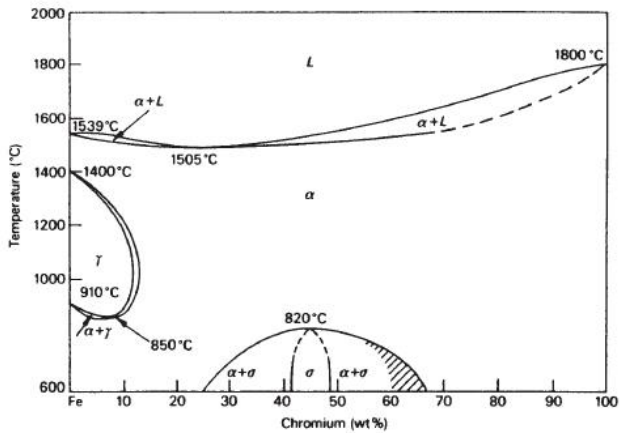
Kodifikasi baja tahan karat menurut AISI berbeda dengan kodifikasi baja paduan baja paduan biasa. Baja tahan karat hanya menggunakan tiga angka, angka pertama menunjukkan grupnya sedangkan angka kedua dan ketiga tidak banyak artinya. Berikut adalah penjelasan kodifikasi sesuai dengan Tabel 2.1

**Tabel 2. 1** Kodifikasi Baja Tahan Karat (*Suherman, 1999*)

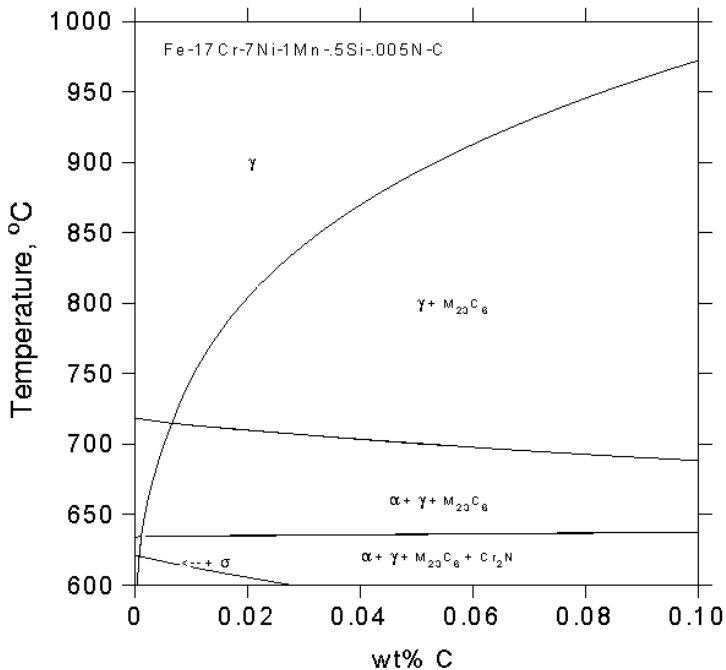
Series	Groups
2xx	Krom-nikel-mangan; tidak dapat dikeraskan, austenitik, non-magnetik
3xx	Krom-nikel; tidak dapat dikeraskan, austenitik, non-magnetik

4xx	Krom; dapat dikeraskan, martensitik, magnetic
4xx	Krom; tidak dapat dikeraskan, feritik, magnetic
5xx	Krom; krom rendah, tahan panas

Gambar 2.6 merupakan gambar diagram kesetimbangan dari Fe-Cr, dan Gambar 2.7 merupakan gambar diagram fasa *austenitic stainless steel* dengan perbandingan penambahan karbon



**Gambar 2. 6** Diagram Kesetimbangan Fe-Cr  
(Bhadeshia, 2006)



**Gambar 2. 7** Diagram Fasa Austenitik *Stainless Steel*  
(Lee, 1999)

### 2.4.1 Baja Tahan Karat Martensitik

Seperti namanya, martensit adalah struktur mikro primer kelompok ini. Pada dasarnya baja ini merupakan baja austenitik namun dipanaskan sampai 1050°C, lalu berubah menjadi martensit pada saat pendinginan cepat. Penambahan unsur-unsur lain seperti molybdenum, titanium, tembaga, vanadium dapat diatur sesuai kebutuhan untuk mendapatkan sifat mekanik tertentu. Baja tahan karat yang termasuk kelompok ini beberapa yang dikenal adalah tipe 403, 410, 416, 420, 440A, 501, dan 502. Kelompok baja tahan karat ini bersifat magnetik, dapat dikeraskan, dapat dicold-work dengan mudah, terutama yang dengan kadar karbon rendah, dan sifat *machinability*

cukup baik. (Suherman, 1999). Baja tahan karat ini dapat dikenal mempunyai sifat kekuatan tinggi dan ketangguhan rendah. *Tempering* dapat menambah nilai ketangguhan. Tetapi temperatur *tempering* yang berlebihan akan mengurangi sifat tahan karat karena terjadinya presipitasi karbida krom, terutama bagi yang berkadar karbon agak tinggi. Aplikasi yang biasa digunakan adalah untuk turbin, per, rangka pesawat, alat bedah, pisau, alat cukur ataupun alat yang membutuhkan ketahanan aus yang tinggi. (Khatak, 2002)

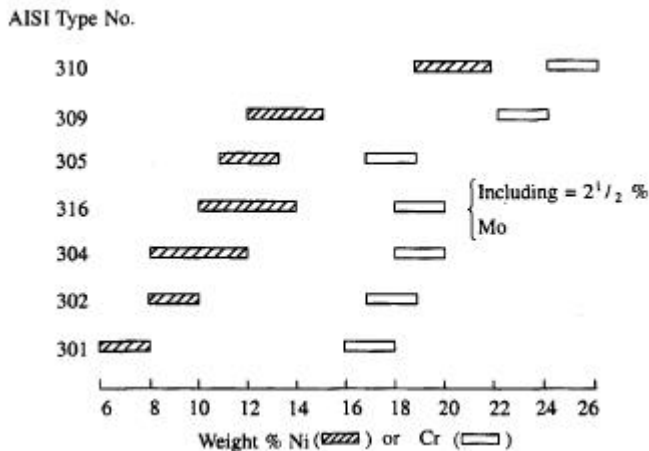
#### **2.4.2 Baja Tahan Karat Austenitik**

Grup ini mengandung minimal 16% krom dan 6% nikel. Mempunyai struktur austenitik, bersifat *non-hardenable*, non-magnetik, mudah dihot-work, tetapi tidak bisa dilaku panas, sedikit sulit dicold-work. Baja tahan karat austenitik adalah baja dengan ketahanan korosi paling tinggi karena tingginya kandungan krom dan juga penambahan kandungan nikel. Penambahan elemen seperti molybdenum, titanium atau tembaga dapat mengubah atau memperbaiki sifat mekanik dari tipe ini, membuat penggunaan semakin bagus untuk temperatur tinggi. (Atlas Specialty Metals, 2008)

Kelompok ini terdiri dari baja krom-nikel (seri 3xx) dan baja krom-nikel-mangan (seri 2xx). Pada dasarnya baja tahan karat austenitik adalah tipe 302 yang berkembang menjadi sejumlah tipe lain. Tipe 302, baja tahan karat 18-8 (18% Cr, 8% Ni) pertama dengan kadar karbon maksimum 0.15%. Baja tipe 302 ini mempunyai masalah dalam pengelasan yaitu dapat terbentuknya karbida krom yang menurunkan sifat anti korosinya. Dengan menurunkan kadar karbon menjadi 0,08% tercipta tipe 304, dengan sifat mampu las yang lebih baik. Untuk mencegah terjadinya presipitasi karbida krom selama pengelasan maka dibuat tipe baru dengan kadar karbon sangat rendah, yaitu dibawah 0,03% C, tipe 304 L (*low carbon*). Sering berkembangnya jaman, tipe-tipe tersebut masih kurang memuaskan pada proses pengelasan dengan *multiple pass*



kemudian dikembangkan tipe *stabilized* dengan penambahan Ti (tipe 321) dan juga penambahan Cb atau Ta (tipe 347). Unsur tambahan ini akan membentuk karbida sehingga mencegahnya terbentuknya karbida krom. Dengan makin langka dan mahalnya nikel lalu dikembangkan beberapa tipe lain dengan menambahkan mangan sebagai pengganti sebagian Ni. Diperolehlah tipe 201 dan 202. Tipe 301 hampir sama dengan tipe 302, hanya kadar Cr dan Ni-nya lebih rendah (17% Cr dan 7% Ni). Sifat tahan korosi dari baja tahan karat ini akan lebih baik jika kadar paduan dipertinggi. Tipe 308, 309, 310, 310S, dan 314 mempunyai kadar paduan Cr Ni yang lebih tinggi. Sifat tahan korosi *pitting* dan *creep* akan lebih baik dengan adanya unsur tambahan Mo, maka tipe 302 dikembangkan menjadi tipe 316 ataupun 316L. (Suherman, 1999). Gambar 2.8 merupakan beberapa perbandingan unsur Ni dan Cr dalam baja tahan karat austenitik.



**Gambar 2. 8** Beberapa Representatif Kandungan Ni dan Cr dalam Baja Tahan Karat Austenitik (Khatak, 2002)

Baja tahan karat austenitik mempunyai banyak manfaat dari sisi metalurgi. Mereka bisa dibuat lunak (kekuatan tarik 200 MPa) ataupun dibuat kuat dengan cara *cold work* dan dapat

mencapai kekuatan tarik 2000 MPa. Fasa austenit dan struktur kristal *face-centered cubic* (FCC) membuat tipe ini sangat tangguh dan bersifat ulet hingga temperatur *absolute zero*. Efek kandungan dari nikel juga dapat menghilangkan efek dari kegetasan pada temperatur rendah. Baja tahan karat austenitik juga tidak kehilangan banyak kekuatan pada suhu tinggi secepat kelompok feritik (BCC). Walaupun grup ini mempunyai banyak keunggulan tetapi grup ini mempunyai beberapa kelemahan seperti:

1. Baja tahan karat austenitik tidak tahan dengan oksidasi siklik dibandingkan dengan grup feritik, dikarenakan tipe ini mempunyai koefisien perpanjangan panas yang lebih tinggi sehingga lapisan pelindung oksida mudah rusak.
2. Baja tahan karat austenitik dapat mengalami *stress corrosion cracking* (SCC) jika digunakan dalam lingkungan yang tidak mendukung daya tahan korosi tipe ini.
3. Daya tahan leleh maksimal (*fatigue endurance limit*) hanya 30% dari *tensile strength* (dibandingkan ~50-60% untuk baja tahan karat feritik). Dengan kombinasi tingginya koefisien perpanjangan panas dapat menyebabkan sifat yang lemah terhadap leleh panas (*thermal fatigue*). (ASM International, 2008).

### 2.4.3 Baja Tahan Karat Feritik

Baja tahan karat feritik merupakan paduan Fe-Cr dengan kandungan sekitar 15-30% Cr dengan tidak ada kandungan Ni, kandungan rendah C, dan terkadang mempunyai kandungan rendah Mo, Al, Nb, atau Ti. Sifat kemampuan dibentuk dan dilas baja ini rendah tetapi mempunyai ketahanan korosi yang cukup baik. (Khatak, 2002). Sifat lainnya dari baja ini yaitu: tidak dapat dikeraskan dengan perlakuan panas (*non-hardenable*), dapat menjadi keras dengan cold work (*work-harden*), magnetik, dapat diberikan perlakuan *cold-work*

maupun *hot-work*. Sifat tahan korosi dan keuletan tertinggi akan dicapai pada kondisi anil. Salah satu kelemahan yang terkenal dari baja ini adalah mempunyai sifat penggetasan pada temperatur tinggi (*high temperature embrittlement*). Dalam kelompok ini dikenal tipe 405, 430, 434, dan 446. Tipe ini biasa digunakan untuk barang-barang yang dibuat dengan *deep-drawing*, seperti alat industry kimia dan makanan, dan benda arsitektural dan beberapa hiasan pada bagian mobil. (Suherman, 1999).

## 2.5 Kegagalan dan Analisa Kegagalan

### 2.5.1. Kegagalan

Definisi dari kegagalan adalah suatu sistem atau komponen yang bekerja tetapi tidak bekerja secara fungsi yang benar. Kegagalan dapat termasuk hilangnya fungsi ataupun hilangnya waktu kerja (*service life*) dari suatu sistem ataupun material. Kegagalan material tidak hanya berujung pada kerugian ekonomi, tetapi lebih penting lagi kerugian karena hilangnya nyawa. Kegagalan fisik material dapat disebabkan oleh korosi, aus, deformasi yang tidak diinginkan maupun patah. (Courtney, 2000).

Salah satu konsiderasi untuk mengetahui sebab dari suatu material mengalami kegagalan adalah dengan mengetahui *active stressor*. *Stressor* adalah faktor-faktor eksternal yang menyebabkan kegagalan secara langsung maupun tidak langsung. *Stressor* mempengaruhi gagal-nya material sangat bergantung dari besarnya paparan *stressor* dan ketahanan material terhadap *stressor* yang diterima. 6 *streesor* yang utama adalah: (ASM Handbook Vol 11: Failure Analysis and Prevention, 2002)

1. Mekanik: tekanan, dampak, gerakan, beban statis dan dinamis.
2. Kimia: paparan akut maupun kronik dari lingkungan zat kimia yang bersifat agresif dan merusak.

3. Elektrokimia: ketahanan material khususnya logam dalam lingkungan yang korosif.
4. Panas: paparan temperatur yang tinggi menghasilkan degradasi material
5. Radiasi: sinar ultraviolet, fusi nuklir yang dapat mengionisasi dan merubah struktur material.
6. Listrik: Pemberian beban listrik yang dikarenakan adanya medan listrik.

Menurut sumber yang ada, pada dunia industri faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industry dapat dikarenakan:

1. Faktor kesalahan pemilihan material  
Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan yang dominan yaitu faktor kesalahan dan pemilihan material. Tabel 2.2 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material.

**Tabel 2. 2** Kasus Kegagalan Material Akibat Perawatan Komponen Mesin. (Brooks, 2002)

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

2. Perawatan komponen yang kurang baik  
Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan material yang paling dominan. Tabel 2.3 menunjukkan data mengenai kasus kegagalan material yang pernah terjadi.

**Tabel 2. 3** Kasus Kegagalan Material Akibat Perawatan Komponen Mesin. (Brooks, 2002).

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

3. Kesalahan dalam perancangan komponen  
Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:
  - a. Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
  - b. Kegagalan getas akibat beban kejut
  - c. Kegagalan pada temperatur tinggi (peuluran)
  - d. Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan.
  - e. Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*.
4. Kondisi kerja ekstrim  
Permasalahan spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.4.

**Tabel 2. 4** Penyebab Kegagalan dalam Komponen Mesin (Brooks, 2002)

Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan ( <i>fatigue</i> )	25
Kegagalan getas ( <i>brittle fracture</i> )	16
Kelebihan beban	11

Korosi temperatur tinggi	7
Korosi retak tegang, korosi leleh, penggetasan hydrogen	6
Pemuluran ( <i>creep</i> )	3
Abrasi, Erosi	3

### 2.5.2. Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan adalah suatu proses pengumpulan dan analisa data untuk menentukan penyebab dari kegagalan, dengan tujuan untuk langkah pembenaran ataupun pencegahan. (Bloch & Geitner, 1994). Dalam beberapa kasus, tujuan dari analisa kegagalan adalah untuk menentukan akar permasalahan (*root cause*). Penentuan akar permasalahan baik untuk dunia teknik karena dapat menjadi acuan untuk *quality-assurance* dan program pengembangan berkala. Setelah akar permasalahan ditemukan, perlakuan pembenaran dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya kegagalan di masa depan, dengan ini dapat meningkatkan efektifitas produksi. (ASM Handbook Vol 11: Failure Analysis and Prevention, 2002).

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan pencegahan dengan cara menginvestigasi dan menganalisa kegagalan komponen yang terjadi. Adapaun tindakan dan informasi yang diperlukan untuk menginvestigasi komponen yaitu: (Nishida, 1992).

1. Data produksi: *melting, rolling, forming, casting, heat treatment*, dan proses *machining*.
2. Analisa kimia: pengujian X-ray, komposisi kimia
3. Sifat mekanik: *tensile, hardness, impact*, dan *fatigue*
4. Struktur metalurgi: struktur makro dan mikro struktur
5. Patah permukaan.

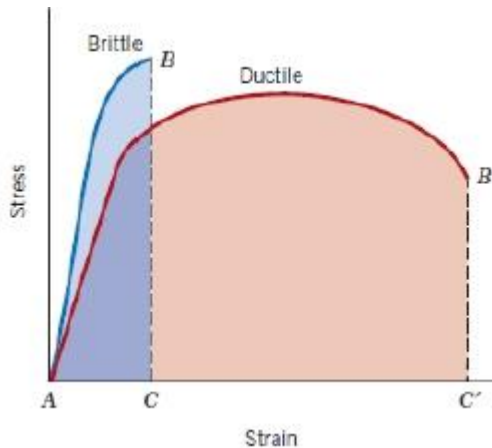
Tugas utama sebagai analis pada saat investigasi fisik adalah mencari tau urutan kejadian yang terjadi. Analisa kegagalan adalah proses mencari segala sesuatu yang dapat mengakibatkan kegagalan dan mengeliminasi segala yang

tidak sesuai. Langkah-langkah dasar dalam analisa kegagalan adalah: (ASM Handbook Vol 11: Failure Analysis and Prevention, 2002)

1. Mengumpulkan data
2. Mengidentifikasi moda kerusakan
3. Mengidentifikasi mekanisme kegagalan yang mungkin terjadi
4. Pengujian untuk menentukan mekanisme yang terjadi
5. Mengidentifikasi penyebab yang primer dan sekunder
6. Mengidentifikasi akar permasalahan yang terjadi
7. Pengujian untuk mencari akar permasalahan yang terjadi
8. Mengevaluasi dan mengimplementasikan langkah pencegahan yang sesuai.

## **2.6 Patah Ulet dan Patah Getas**

Patahan yang paling sederhana adalah pemisahan badan menjadi 2 atau lebih sebagai respon dari tegangan yang diterima. Tegangan dapat berupa tegangan tarik, tekan, geser, dan putar ataupun kombinasi dari itu. Untuk logam, dua jenis patahan yang mungkin terjadi adalah patah ulet dan getas. Klasifikasi ini berdasarkan suatu material mengalami deformasi plastis. Patah ulet dapat menerima deformasi plastis yang cukup banyak pada saat perambatan retak hingga patah. Patah getas dapat dikarakterisasikan dengan deformasi mikro ataupun tanpa deformasi sama sekali pada saat perambatan retak. Deformasi plastis pada ulet dapat dijadikan tanda bahaya yang dapat terjadi selanjutnya. Pada patah getas harus dihindari karena dapat terjadi tanpa tanda bahaya. (Kailas). Pada Gambar 2.9 ditunjukkan diagram tegangan dan regangan dari patahan ulet dan getas.



**Gambar 2. 9** Skematik Ciri Patah Getas dan Patah Ulet dari Diagram Tegangan-Regangan. (Callister, 2014)

Karena deformasi pada material tergantung dari banyak kondisi seperti keadaan tegangan, beban yang diterima, temperatur, dan struktur kristal. Perubahan dari ulet ke getas pada tipe patahan dapat dipengaruhi oleh pengurangan suhu, pertambahan beban, dan tegangan yang terpusat (contohnya, adanya *notch*). Pada kebanyakan logam mempunyai sifat ulet, keramik getas, dan polimer dapat mempunyai kedua sifat tersebut bergantung dari tipe polimer tersebut. Material dengan struktur kristal BCC atau HCP dapat mempunyai sifat patahan getas pada kondisi normal, sedangkan untuk material yang mempunyai struktur kristal FCC mempunyai patahan ulet. (Kailas). Tabel 2.5 merupakan perbandingan antara patah ulet dan patah getas

**Tabel 2. 5** Patah Ulet Vs Getas

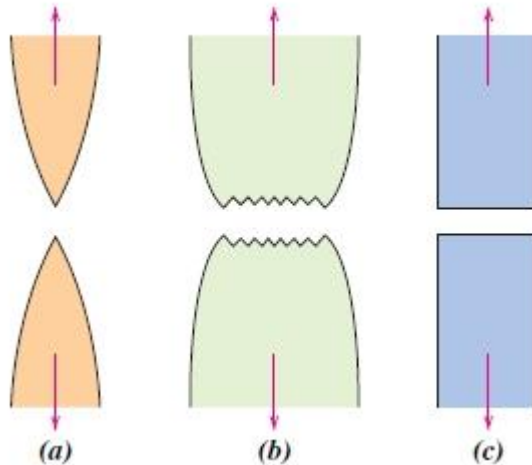
Parameter	Patah Ulet	Patah Getas
Strain energy yang dibutuhkan	Lebih besar	Lebih kecil



Tegangan, pada saat retak	Bertambah	Konstan
Perambatan retak	Lambat	Cepat
<i>Warning sign</i>	Deformasi plastis	Tidak ada (atau kecil sekali)
Deformasi	Besar	Kecil
<i>Necking</i>	Ada	Tidak ada
Permukaan patahan	Kasar dan kusam	Halus dan cerah
Tipe material	Kebanyakan logam (tidak dalam keadaan terlalu dingin)	Keramik, kaca, es.

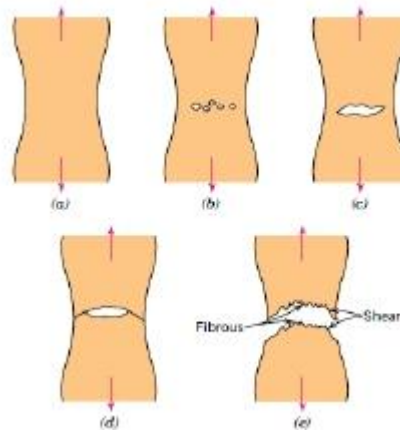
### 2.6.1. Patah Ulet

Permukaan patahan ulet memiliki karakteristik khusus jika diamati secara makroskopis dan mikroskopis. Gambar 2.10 menunjukkan dua karakteristik makro pada patahan ulet. Konfigurasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 (a) ditemukan pada material logam yang sangat halus, seperti emas dan timbal pada temperatur ruangan, polymer, dan kaca anorganik pada suhu tinggi. Material yang sangat ulet ini menunjukkan necking sampai titik patahnya, dan mempunyai pengurangan luas area hingga 100%. (Callister, 2014).



**Gambar 2. 10** (a) Patahan Sangat Ulet. (b) Patahan Ulet Sedang. (c) Patahan Getas Tanpa Deformasi Plastis. (Callister, 2014)

Tipe yang paling umum pada patah *tensile* untuk logam ulet di gambarkan pada Gambar 2.10 (b) dimana patahan terjadi pada saat terjadi sedikit *necking*. Proses patahan secara normal terjadi pada beberapa langkah (Gambar 2.11). Pertama, saat setelah *necking* dimulai, lubang kecil atau *microvoids*, terbentuk di dalam material, seperti pada Gambar 2.11 (b), selanjutnya, deformasi terus berlanjut, *microvoid* terus membesar, dan bersatu membentuk retak berbentuk elips yang tegak lurus dengan arah tegangan seperti pada Gambar 2.11 (c). Terakhir, patahan terjadi dengan adanya perambatan retak yang cepat disekitar *necking* oleh deformasi geser pada sudut disekitar arah tegangan tarik dimana sudut ini merupakan tegangan geser tertinggi.



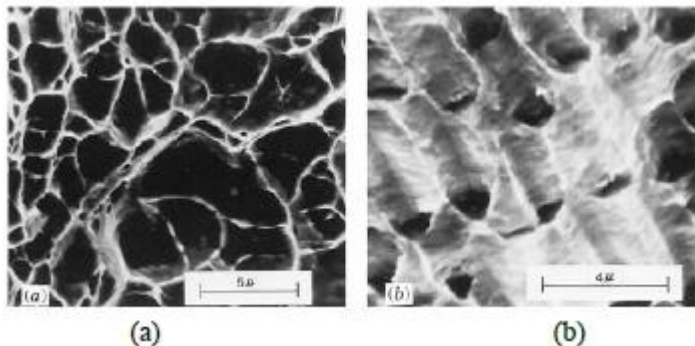
**Gambar 2. 11** Tahapan Patahan Cup dan Cone (a) Awal Necking, (b) Terbentuknya Cavity Kecil, (c) Pengumpulan Cavity Hingga Menjadi Retakan, (d) Perambatan Retak, (e) Patahan Geser Dengan Sudut  $45^\circ$  Terhadap Arah Tegangan. (Callister, 2014)

Terkadang sebuah patahan mempunyai karakteristik kontur seperti *cup* dan *cone*. Spesimen yang mempunyai bentuk patahan ini berbentuk fibrous yang tidak teratur dimana hal ini menandakan adanya deformasi plastis yang dialami material. Untuk lebih jauh lagi mengetahui informasi mengenai penentuan secara pengujian dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Gambar 2.12 menunjukkan patah ulet *cup* dan *cone* dan perbedaa patah getas pada *mild steel*.



**Gambar 2. 12** (A) Patah Ulet (*Cup dan Cone*) pada Aluminium dan (B) Patah Getas pada *Mild Steel*. (Callister, 2014)

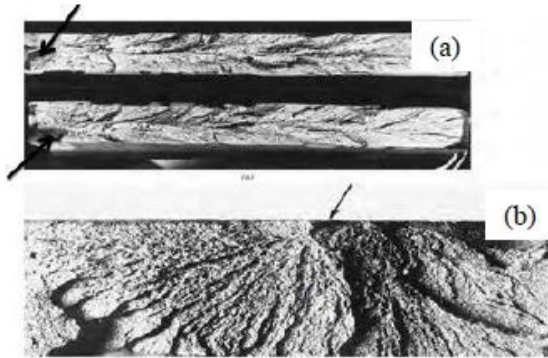
Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjarangan retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada Gambar 2.13.



**Gambar 2. 13** (a) SEM yang Menunjukkan *Spherical Dimple* Karakteristik, Patahan Hasil Beban Tarik Uniaxial, 3300x dan (b) SEM yang Menunjukkan *Spherical Dimple* Karakteristik Hasil Beban Geser, 5000x. (Callister, 2014)

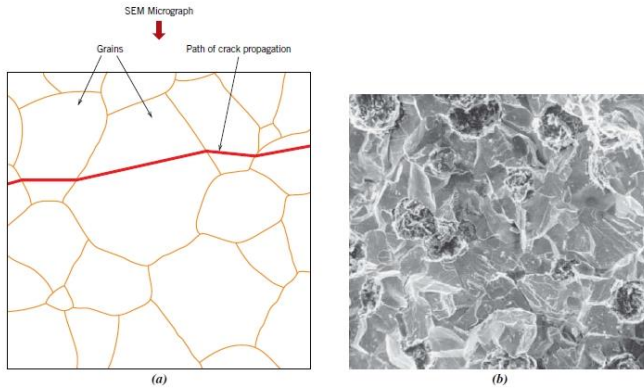
### 2.6.2. Patah Getas

Patah getas sering terjadi tanpa adanya atau sedikit sekali terjadi deformasi plastis pada material. Retak/patahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin yang membelah atom-atom material (*transgranular*). Kemudian pada material yang lunak dengan butir kasar (*coarse grain*) maka dapat dilihat pola-pola yang dinamakan *chevron* seperti Gambar 2.14 (a) atau patah getas permukaan terlihat garis atau daerah asal retakan disebut *fan pattern* seperti pada Gambar 2.14 (b). (Callister, 2014)

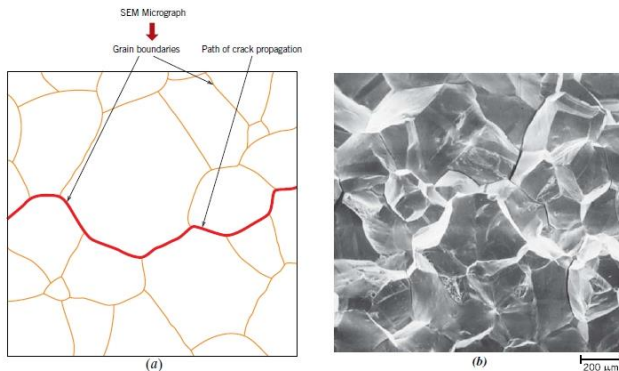


**Gambar 2. 14** (a) Foto yang Menunjukkan Bentuk V "Chevron" Psebagai Karakteristik Patah Getas dan (b) Foto yang Menunjukkan Permukaan Patah Getas Daerah Asal Retakan. (Callister, 2014).

Untuk hasil perambatan dan SEM, dapat terlihat jelas untuk retak yang melewati batas butir (*transgranular*) dan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*). Gambar 2.15 menunjukkan retak *transgranular* dan Gambar 2.16 menunjukkan retak *intergranular*.



**Gambar 2. 15** (a) Skema Perambatan Retak yang Melewati Batas Butir (*Transgranular*) (b) Hasil SEM dari Patah Secara *Transgranular*. (Callister, 2014)



**Gambar 2. 16** (a) Skema Perambatan Retak Yang Terjadi Sepanjang Batas Butir (*Integranular*) (b) Hasil SEM Dari Patah Secara *Integranular*. (Callister, 2014).

## 2.7 Patah Lelah

Kelelahan (*fatigue*) adalah salah satu kegagalan (patah) pada komponen akibat beban dinamis (pembebanan yang

berulang-ulang atau berubah-ubah. Sekitar 50-90% kegagalan mekanis adalah disebabkan oleh kelelahan.

Fenomena kelelahan logam mulai timbul pada pertengahan abad ke-19 yaitu seringnya terjadi patah pada komponen kereta api pada masa itu:

- Di Versailles Paris, 1944, menewaskan 40-80 penumpang, akibat patah poros roda.
- 20 April 1887, 3 orang tewas dan 2 terluka, akibat patah *draw bar*.
- 27 Mei 1887, 6 orang tewas akibat patah roda.
- 23 Juni 1887, 1 orang tewas, akibat patah rel.

Pelopop dalam penelitian mengenai kelelahan logam adalah Wohler (Jerman) dan Fairbairn (Inggris) pada tahun 1860 dan lebih mendetail sejak 1903 oleh Ewing dan Humparey. (Akan, 2007).

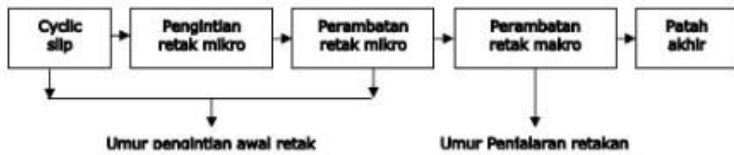
*Fatigue* merupakan perubahan struktural yang bersifat progresif, lokal, dan permanen yang terjadi pada material yang menerima beban fluktuasi dan berulang yang mempunyai nilai maksimum atau kurang dari *yield point*. Kelelahan dapat membentuk akumulasi retak yang berakhir pada patahnya suatu material. Kelelahan diakibatkan oleh kombinasi dari tegangan putar, tegangan tarik, dan regangan plastis. Jika salah satu dari 3 kombinasi tersebut tidak ada, patah lelah tidak akan terjadi.

Patah lelah terjadi pada 5 tahap:

1. *Cyclic slip*
2. *Crack nucleation*
3. *Growth of microcrack*
4. *Growth of macrocrack*
5. *Final failure*

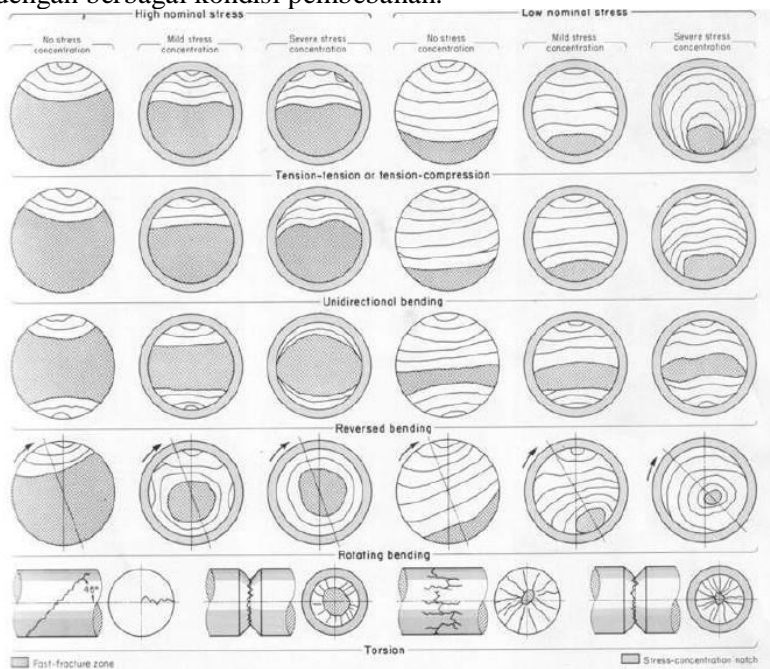
(ASM Handbook Vol. 19 Fatigue and Fracture, 2002)

Gambar 2.17 menunjukkan 5 tahapan pada patah lelah.



**Gambar 2. 17** Tahapan Kegagalan Lelah (Aquan, 2007).

Pada Gambar 2.18 dibawah ini menunjukkan secara skematis penampilan permukaan patahan dari kegagalan lelah dengan berbagai kondisi pembebanan.



**Gambar 2. 18** Skema Pola Patahan (Van, 2013)

Patah lelah dapat dikarakteristik menjadi dua yaitu:

1. Karakteristik makro  
karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan

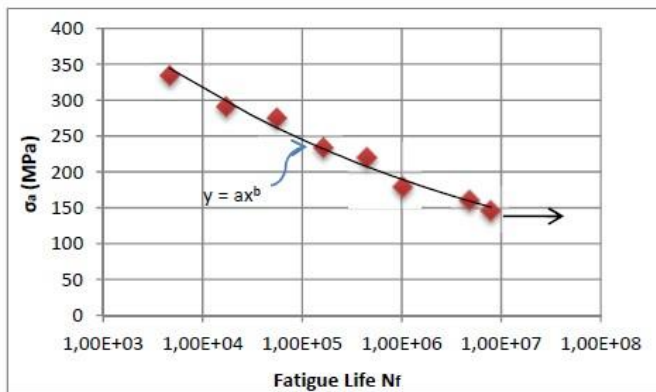


yang dapat diamati secara visual (dengan mata telanjang dan kaca pembesar).

## 2. Karakteristik mikro

karakteristik mikro merupakan ciri-ciri kelelahan yang hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop.

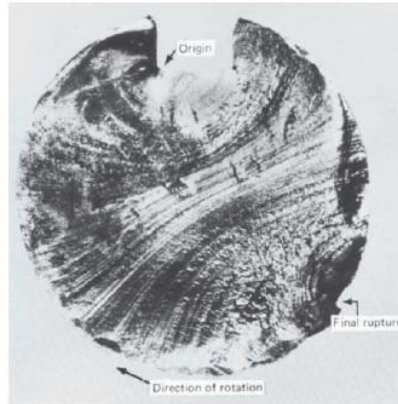
Patah lelah dapat diprediksi dengan menggunakan diagram S-N diagram untuk S-N diagram Stainless Steel 316 adalah sesuai dengan Gambar 2.19



**Gambar 2. 19** S-N Diagram *Stainless Steel 316* (Mohammad, 2013)

### 2.7.1. Tahap Retak Awal (*Crack Intiation*)

Awal retak biasanya dimulai pada permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam dapat menyebabkan konsentrasi tegangan pada material dan dapat menyebabkan retak awal. Gambar 2.20 menunjukkan awal retak pada sudut *keyway*.

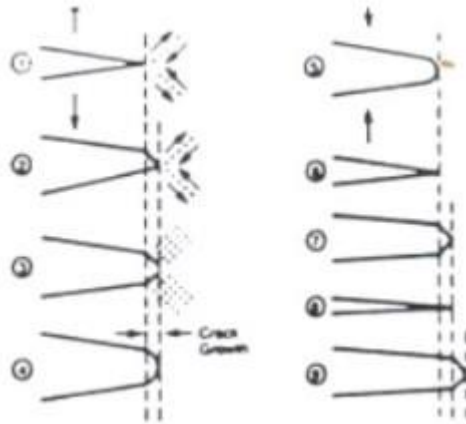


**Gambar 2. 20** Permukaan Patahan pada *Shaft* yang Mengalami Patah Lelah. Awal Retak pada Sudut *Keyway*. (Callister, 2014)

### 2.7.2. Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak pada suatu material terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material. Hal ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retakan. Awal retak mula-mula menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan sangat lambat. Pengamatan makro tidak dapat menampakkan perambatan retak ini. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

Selanjutnya pertumbuhan retak pada tahap II ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum material tersebut. Retakan mulai dapat terlihat oleh mata telanjang pada tahap ini, oleh karena itu dapat disebut retak makro. Pengamatan retak pada penelitian biasanya difokuskan pada tahapan ini. Gambar 2.1 menunjukkan skematis tahapan retak mikro dan makro.



**Gambar 2. 21** Skematis Tahapan Retak Mikro dan Makro pada Kelelahan Logam. (Akan, 2007)

Daerah permukaan patahan yang terbentuk pada saat perambatan retak dapat diketahui dengan dua tanda yaitu garis pantai (*beach mark*) dan striasi (*striation*). Kedua hal tersebut menandakan konsentrasi tegangan yang meluas dari tempat awal retak, biasanya dalam bentuk melingkar. Garis pantai adalah ciri makroskopik yang dapat dilihat dengan mata telanjang. Tanda ini ditemukan pada komponen yang mengalami interupsi pada saat perambatan retak, sebagai contoh, sebuah mesin yang beroperasi normal pada saat pergantian jam kerja (*workshift*). Setiap garis pantai merepresentasikan suatu periode dimana perambatan retak terjadi.

Garis striasi merupakan ciri mikroskopik dan dapat diobservasi dengan mikroskop elektron, Garis striasi merepresentasikan lebih detail jarak antara retakan pada saat satu beban siklik. Luasnya garis striasi bergantung pada penambahan tegangan. (Callister, 2014)

### 2.7.3. Tahap Patah Akhir

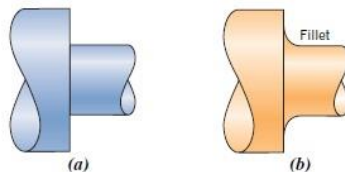
Patahnya material terjadi ketika material telah mengalami siklus tegangan dan regangan yang dapat menghasilkan kerusakan yang permanen. Ketika terjadi penjarangan retak, Penampang pada bagian tersebut berkurang dan tidak dapat menahan beban lagi. Pada tahap ini penjarangan retak yang terjadi sangat cepat sehingga struktur akan terpecah menjadi dua bagian.

### 2.7.4. Faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Patah Lelah

Adapun beberapa faktor yang memepnegaruhi kekuatan patah lelah antara lain sebagai berikut:

#### 1. Desain komponen

Desain dari komponen mempengaruhi secara signifikan dari karakteristik kekuatan lelah. Adanya *notch* berperan sebagai peningkatan tegangan dan tempat awal mula retak lelah. Semakin tajam sudut, semakin besar konsentrasi tegangan yang diterima. Adapun contoh desain yang ada seperti *grooves*, *keyways*, *holes*, dan sebagainya. Faktor ini dapat dicegah dengan meminimalisir desain sudut yang tajam. Gambar 2.21 menunjukkan perbedaan pada faktor desain.



**Gambar 2. 22** Faktor Desain (a) Desain yang Buruk dengan Sudut Tajam. (b) Desain yang Baik dengan Sudut yang Tidak Tajam. (Callister, 2014)

#### 2. *Surface treatment*

Hasil dari proses pengerjaan seperti proses pengecoran, proses pembentukkan, proses pengelasan, proses pemesinan dapat menghasilkan goresan kecil. Goresan kecil yang

didapatkan dari hasil *machining* oleh alat pemotong dapat mengurangi umur lelah. Setelah diteliti, memberikan permukaan yang halus dengan cara *polishing* dapat meningkatkan umur lelah yang cukup signifikan.

### 3. Faktor lingkungan (korosi)

Lingkungan korosi dapat mempengaruhi dan mengurangi dari umur lelah suatu material. Bahkan lingkungan atmosfer dapat mempengaruhi sifat lelah dari suatu material. Lubang kecil dapat menyebabkan reaksi kimia antara lingkungan dengan material. Banyak lingkungan yang dapat menyebabkan pertumbuhan retak seperti air, uap air, udara, hidrogen, garam, dan sebagainya. Pencegahan yang dapat dilakukan untuk mengurangi faktor korosi dapat dilakukan berbagai cara, salah satunya dengan *coating*.

### 4. Faktor Mekanik

Penambahan beban yang diterima, beban fluktuatif, tegangan residual dapat menyebabkan penurunan umur lelah suatu material. Beban-beban tersebut dapat merangsang pertumbuhan retak yang sudah ada semakin cepat.

Tabel 2.6 merupakan variabel-variabel yang mempengaruhi kekuatan lelah.

**Tabel 2. 6** Variabel yang Mempengaruhi Kekuatan Lelah (ASM Handbook Vol. 19 Fatigue and Fracture, 2002)

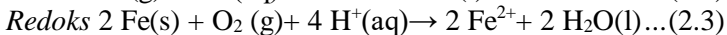
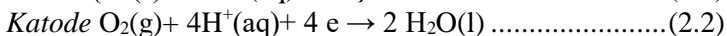
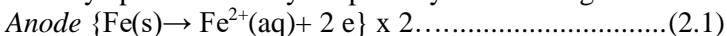
Variabel Metalurgi	Variabel Lingkungan	Variabel Mekanik
Komposisi paduan	Temperatur	Stress ratio
Mikrostruktur dan struktur Kristal	Potensial listrik	Residual stress
Perlakuan panas	PH	Frekuensi beban siklik
Orientasi butir dan batas butir	Viskositas lingkungan	Maximum stress
Distribusi paduan dan impuritas	Konsentrasi	Bentuk dan ukuran retak

## 2.8 Korosi

Korosi bisa didefinisikan sebagai kehancuran dan pengurangan kualitas dari material karena reaksi dengan lingkungan. Beberapa mendefinisikan hanya kepada logam, tetapi sering kali *corrosion engineers* menafsirkan keduanya logam maupun non-logam. Korosi bisa terjadi cepat maupun lambat. Stainless steel terjadi secara cepat pada asam politonik. Korosi pada logam biasa disebut sebagai kebalikan dari ekstraktif metalurgi. (Fontana, 1967).

Korosi atau pengkaratan merupakan fenomena kimia pada bahan – bahan logam yang pada dasarnya merupakan reaksi logam menjadi ion pada permukaan logam yang kontak langsung dengan lingkungan berair dan oksigen. Contoh yang paling umum, yaitu kerusakan logam besi dengan terbentuknya karat oksida. Dengan demikian, korosi menimbulkan banyak kerugian. Korosi logam melibatkan proses anodik, yaitu oksidasi logam menjadi ion dengan melepaskan elektron ke dalam (permukaan) logam dan proses katodik yang mengkonsumsi electron tersebut dengan laju yang sama : proses katodik biasanya merupakan reduksi ion hidrogen atau oksigen dari lingkungan sekitarnya.

Untuk contoh korosi logam besi dalam udara lembab, misalnya proses reaksinya dapat dinyatakan sebagai berikut :



Jika proses korosi terjadi dalam lingkungan basa, maka reaksi katodik yang terjadi, yaitu :

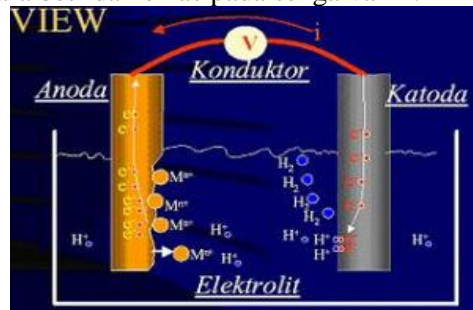


Faktor yang mempengaruhi korosi adalah sebagai berikut:

- Jenis dan konsentrasi elektrolit
- Adanya oksigen terlarut pada elektrolit

- Temperatur
- Kecepatan gerakan elektrolit
- Jenis logam/ paduan
- Adanya sel galvanik
- Adanya tegangan

Pada gambar di bawah ini diilustrasikan mekanisme korosi antara besi dan emas pada sel galvanik.



**Gambar 2. 23** Mekanisme Korosi Fe dan Au (Keenan, 1980)

Gambar 2.23 menunjukkan mekanisme reaksi yang terjadi pada korosi galvanik yang terbentuk oleh adanya hubungan antara dua logam yang memiliki potensial berbeda. Kedua logam membentuk sel galvanik, dan logam yang memiliki potensial lebih rendah akan menjadi anoda dan terkorosi, sedangkan logam yang memiliki potensial lebih tinggi akan berlaku sebagai katoda dan tidak terkorosi. (Keenan, 1980)

### 2.8.1 Jenis-Jenis Korosi

Adapun jenis-jenis korosi pada umumnya adalah sebagai berikut:

#### 1. Korosi Seragam

Adalah korosi yang terjadi pada permukaan logam akibat reaksi kimia, pH air yang rendah, dan udara yang lembab, sehingga makin lama logam makin menipis.

Biasanya ini terjadi pada pelat baja tau profil logam homogeny Korosi ini dapat dicegah dengan cara:

- Diberi lapisan pelindung yang mengandung inhibitor seperti gemuk
- Untuk lambung kapal diberi proteksi katodik
- Pemeliharaan material yang tepat
- Untuk jangka pemakaian yang lebih panjang diberi logam berpaduan tembaga 0.4%

2. Korosi Sumur (*Pitting Corrosion*)

Adalah korosi yang disebabkan karena komposisi logam yang tidak homogen yang dimana pada daerah batas butir timbul korosi yang berbentuk sumur. Korosi jenis ini dapat dicegah dengan cara:

- Pemilihan bahan yang homogen
- Diberikan inhibitor
- Diberikan lapisan pelindung dari zat yang agresif

3. Korosi Erosi (*Errosion Corrosion*)

Korosi yang terjadi karena keausan dan menimbulkan bagian-bagian yang tajam dan kasar. Korosi ini juga dapat diakibatkan aliran fluida yang sangat deras dan dapat mengikis lapisan pelindung pada logam. Korosi ini biasanya terjadi pada pipa dan propeller. Korosi jenis ini dapat dicegah dengan cara:

- Pilih bahan yang homogeny
- Diberikan lapisan pelindung
- Diberikan inhibitor
- Hindari aliran fluida yang terlalu deras

4. Korosi Galvanik

Korosi yang terjadi karena adanya 2 logam yang berbeda dalam satu elektrolit sehingga logam yang lebih rendah potensialnya akan terkorosi. Korosi ini dapat dicegah dengan cara:

- Beri isolator yang cukup tebal sehingga tidak ada aliran elektrolit



- Memasang proteksi katodik
  - Penambahan cairan anti korosi
5. Korosi Tegangan (*Stress corrosion*)  
Terjadi karena butiran logam yang berubah bentuk yang diakibatkan karena logam mengalami perlakuan khusus (seperti diregang, ditekuk, dll.) Sehingga butiran menjadi tegangan dan butiran ini sangat mudah bereaksi dengan lingkungan. Korosi jenis ini dapat dicegah dengan cara:
- Diberi inhibitor
  - Diberikan perlakuan panas jika ada logam yang mengalami stress
6. Korosi Lelah (*Fatigue Corrosion*)  
Korosi ini terjadi karena logam mendapatkan beban siklus yang terus berulang sehingga semakin lama logam akan mengalami patah karena terjadi kelelahan logam. Korosi ini biasanya terjadi pada turbin uap, pengeboran minyak dan propeler kapal. Korosi jenis ini dapat dicegah dengan cara:
- Menggunakan inhibitor
  - Memilih bahan yang tepat atau memilih bahan yang kuat korosi.

(Fontana, 1967)

### **2.8.2 Korosi Pada Baja Tahan Karat**

Sifat tahan karat dari baja didapatkan dari hasil lapisan pasif oksida yang ada pada permukaan. Dalam keadaan normal, lapisan ini akan terbentuk langsung jika terkena oksigen. Baja tahan karat dan paduan yang kaya dengan kromium dikenal dengan lapisan pasivasi tersebut. Baja tahan karat merupakan paduan dari baja yang mempunyai minimum 11% krom yang memberikan lapisan pasif terhadap korosi pada saat material terekspos dengan lingkungannya. Lapisan ini mampu menyembuhkan diri dalam lingkungan dimana baja tahan karat mampu bertahan.

Korosi pada baja tahan karat dapat terjadi jika lapisan pelindung rusak dan korosi dapat menyerang dengan cepat dalam bentuk korosi sumuran. Korosi sumuran ini dapat semakin cepat jika terkena kontak dengan garam halida. Pada lingkungan klorin juga dapat mempercepat perambatan korosi dan berlanjut pada korosi *crevice*. *Stress corrosion cracking* (SCC) pada baja tahan karat dapat dikombinasikan dari efek tegangan tarik, korosi, temperatur dan keberadaan klorin. Paduan yang mempunyai kandungan nikel diatas 30% akan mempunyai resitansi terhadap SCC. Tipe yang banyak dipake dipasaran seperti baja 304,303L, 316, 316L, 321, 347, 303, 302, dan 301 hanya mempunyai kandungan nikel sekitar 7-10% yang dimana rentan terhadap SCC. (Schweitzer, 2007)

Untuk menghitung nilai korosi *pitting* digunakan nilai PREN (*pitting resistance equivalent number*) dimana nilai PREN ini dipengaruhi oleh Cr Mo dan N dan semakin tinggi nilai PREN semakin baik ketahanan terhadap *pitting* korosi. (Schweitzer, 2007). Tabel 2.7 menunjukkan beberapa alloy dengan nilai PREN dari masing-masing alloy tersebut.

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3(\%Mo) + 30 (\%N) \dots\dots\dots (5)$$

**Tabel 2. 7 Pitting Resistance Equivalent Numbers**  
(Schweitzer, 2007)

Alloy	PREN
654	63,09
31	54,45
25-6Mo	47,45
Al-6XN	46,96
20Mo-6	42,81
317LN	39,6
904L	36,51
317	33,2
316LN	31,08
316	27,90
20Cb3	27,26

---

348	25,60
347	19,0
331	19,0
304N	18,3
304	18

### 2.8.3 Korosi Pada Shaft CWP

Dikarenakan CWP biasanya digunakan pada lingkungan yang banyak mengandung garam, ion klorin, dan partikel sedimen. *Stress corrosion cracking* (SCC) dan korosi sumuran dari *stainless steel* banyak menyebabkan kegagalan lelah. Ion klorin yang merusak dan efeknya yang menyebabkan SCC pada *stainless steel* banyak dipertimbangkan pada industri dan peneliti. Efek merugikan dari spesies korosif, seperti Cl dan S juga diperhatikan/ Pengaruh lingkungan korosi dengan kombinasi faktor lain dari seperti konsentrasi tegangan lokal yang merupakan faktor penting dalam meningkatkan resiko inisiasi retak.

### 2.9 Penelitian Sebelumnya

*Shaft* dijalankan dengan putaran yang stabil ditambahkan dengan patah pembebanan putar dan patah *fatigue* adalah kegagalan yang sering terjadi. Desain yang jelek, pemasangan yang salah, poros yang mengalami *misalignment*, kesalahan ukuran dan perlakuan panas yang tidak semestinya adalah kegagalan kegalalan yang sering terjadi terutama pada *shaft*. Kerugian akibat kerusakan *shaft* tidak hanya meliputi *shaft* itu sendiri namun mempengaruhi bagian mesin lainnya. Oleh karena itu, analisis kegagalan memainkan peran penting dalam menghindari terulangnya kegagalan serupa dan peningkatan desain, teknik maufaktur dan sebagainya. (Xiao-lei, 2013)

Sistem *circulating water* adalah fasilitas penting pada unit pembangkit daya termal, yang digunakan untuk memompa air laut dan kemudian memberikannya ke kondesator untuk

---

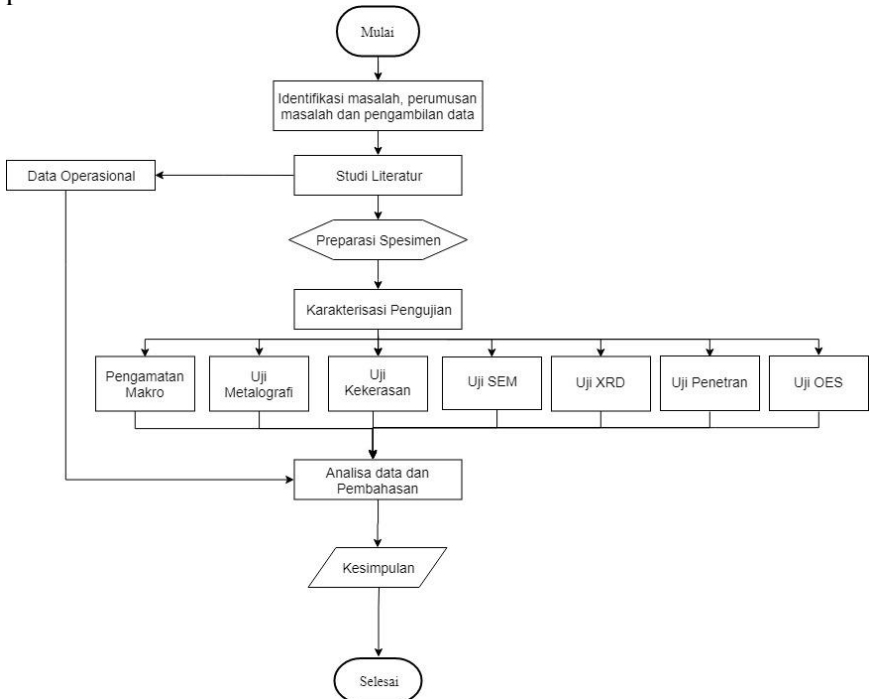
mendinginkan uap buangan dari penukar panas. Salah satu komponen pembangun *circulating water pump* adalah poros. Kebanyakan poros mengalami beban berfluktuasi dari gabungan bending dan torsi pada konsentrasi tegangan yang bervariasi. Material yang digunakan pada poros biasanya adalah baja karbon, paduan baja, dan baja tahan karat. Beberapa masalah seperti *stress corrosion cracking*, korosi sumur, korosi intergranular, korosi celah dan kelelahan dalam poros ini sering terjadi. Pada poros yang patah memiliki nilai kekerasan yang sangat tinggi dan mudah mengalami patah. Poros patah akibat adanya porositas, maka dari itu retakan awal berada dibagian dalam poros bukan di sekelilingnya. (Haryadi, 2017).

*Stainless steel* merupakan logam yang tahan karat. Penggunaan CWP dilakukan dalam lingkungan air laut yang dimana di dalam lingkungan air tersebut mengandung banyak ion garam dan dapat menyebabkan efek *stress corrosion cracking* dan korosi sumuran yang mempercepat laju patah lelah. Pada penelitian ini pengujian yang paling dominan adalah *scanning electron microscopy* (SEM) dan *X-ray spectroscopy* yang digunakan untuk analisis proses korosi dan indentifikasi komposisi korosi dari produk. Dari hasil penelitian didapatkan yang dominan menyebabkan kegagalan adalah korosi sumuran dan disebabkan oleh lingkungan yang agresif, dikarakterisasi dengan adanya klorin dan sulfat yang mempercepat lajut korosi pada temperatur antara 50-55°C. (Vazdirvanidis, 2016).

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir penelitian

Penelitian ini dilakukan berdasarkan alur yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Metode Penelitian

Metode dalam penelitian kali ini antara lain studi di lapangan, studi literatur

dan pengujian. Adapun hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi Lapangan

Pada metode kali ini mengacu pada mencari informasi mengenai komponen yang diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponen tersebut. Studi lapangan meliputi peninjauan ke lapangan yang bertujuan untuk mendapatkan informasi langsung di tempat kegagalan material di PT X. Pencarian informasi ditempat dilakukan dengan cara mengambil gambar dan mengamati material yang mengalami kegagalan.

## 2. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mencari informasi dalam bentuk literatur yang digunakan untuk acuan dalam penelitian ini. Literatur yang digunakan dalam bentuk jurnal-jurnal penelitian sebelumnya ataupun buku-buku yang mempelajari tentang permasalahan analisa kegagalan pada *circulating water pump shaft*.

## 3. Pengujian

Pengujian bertujuan untuk mendapatkan informasi yang belum ada untuk keperluan analisa data dalam penelitian ini. Adapun pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu: pengamatan bentuk dan pola retak dengan cara makroskopik menggunakan *stereomicroscope* dan penetran, pengamatan mikroskopik dengan mikroskop optik metalografi dan SEM EDX, uji kekerasan dengan *Universal Hardness Tester* dan pengujian komposisi menggunakan XRD dan OES (*Optical Emission Spectroscopy*).

### 3.3 Material

Pada tanggal 24 Oktober 2018 ditemukan *shaft* dari *circulating water pump* untuk mesin pendingin pembangkit listrik yang mengalami kegagalan.



**Gambar 3. 2** *Circulating Water Pump Shaft* yang Mengalami Patah (Dokumen Pribadi)

Gambar 3.2 merupakan pemampang samping dan Gambar 3.3 merupakan pemampang atas dari *shaft* yang mengalami patahan.



**Gambar 3. 3** Penampang Patahan *Circulating Water Pump Shaft*  
(Dokumen Pribadi)

### 3.4 Alat dan Bahan

Adapun peralatan dan bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

#### 3.4.1 Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penggaris Besi  
Digunakan untuk mengukur dimensi spesimen.
2. Gerinda Potong  
Digunakan untuk memotong spesimen
3. Kamera Digital  
Digunakan untuk mengamati dan mengambil gambar secara makro, selain itu digunakan juga untuk dokumentasi selama penelitian.
4. *Stereo Microscope*  
Digunakan untuk mengamati lebih detail secara makro.



5. Mesin Amplas dan *Polish*  
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi.
6. Mikroskop Optik  
Digunakan untuk mengamati struktur mikro dengan metode metalografi
7. Mesin SEM EDX  
Digunakan untuk mengamati spesimen secara mikroskopik.
8. Mesin Uji Kekerasan  
Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen
9. Mesin XRD  
Digunakan untuk mengetahui fasa, komposisi, dan tegangan sisa material *shaft*
10. Mesin OES (*Optical Emission Spectrometry*)  
Digunakan untuk mengetahui komposisi kimia unsur dari specimen.

### 3.4.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kertas Amplas *Grade* 80 sampai 2000  
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi.
2. Larutan Etsa Carpenter dengan komposisi  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ , dan Aquades  
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi
3. Material patahan *shaft circulating water pump Shaft* yang akan dianalisis

## 3.5 Tahapan Penelitian

### 3.5.1 Pengambilan Data dan Komponen

Tahapan ini dilakukan dengan cara menuju langsung ke PT. X untuk melihat dan mengamati komponen yang mengalami kegagalan. Tujuan dari tahapan ini adalah untuk mendapatkan komponen yang mengalami kegagalan dan data-data perusahaan yang berkaitan dengan mesin yang mengalami kegagalan.

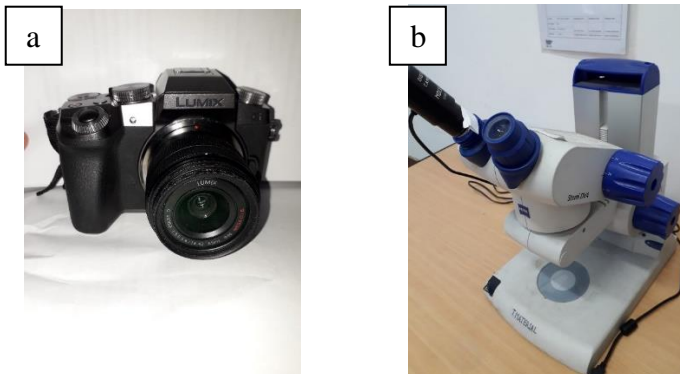
---

### 3.5.2 Pengamatan Makroskopik

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui, bentuk, tampilan, pola patahan secara makroskopik. Pengamatan ini dilakukan dengan menggunakan kamera Olympus Lumix dan mikroskop stereo Stemi DV4 seperti pada Gambar 3.4

Adapun perlakuan yang dilakukan terhadap sampel material adalah sebagai berikut:

1. Mengambil gambar fotografi dengan kamera secara menyeluruh dan lebih detail pada bagian tertentu.
2. Mengambil gambar dengan mikroskop stereo untuk bagian bagian yang perlu lebih detail. Terutama pada bagian *initial crack*, *crack propagation* dan *final crack*.

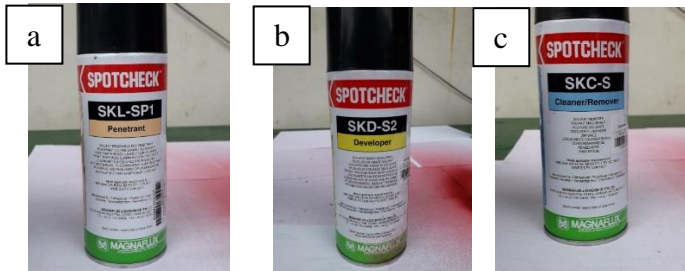


**Gambar 3. 4** (a) Kamera Digital Olympus Lumix dan  
(b) *Stereomicroscope* Carl Zeiss Stemi DV4 (Dokumen Pribadi)

### 3.5.3 Pengujian Penetran

Pengujian penetran bertujuan untuk mencari *crack* secara makro dengan cara menyemprotkan penetran lalu disempotkan developer agar menarik penetran keluar dari *crack* sehingga *crack* terlihat jelas. Setelah selesai pengamatan disempotkan *cleaner/remover* untuk membersihkan penetran dan developer

yang tersisa. Gambar 3.5 merupakan penetran, *developer* dan *cleaner* yang digunakan pada pengujian penetran.



**Gambar 3.5** Satu Set Peralatan Pengujian Penetran. (a) Penetrant (b) Developer (c) Cleaner/Remover (Dokumen Pribadi)

### 3.5.4 Preparasi Spesimen

Tahap persiapan spesimen diperlukan sebelum melakukan pengujian lebih lanjut untuk menentukan penyebab terjadinya kegagalan material pada *shaft*. Persiapan meliputi proses *cutting* dan *sectioning* menggunakan gerinda potong.

Proses pemotongan dilakukan dari permukaan hingga 3 cm dari permukaan patahan. Selain itu diambil juga bagian *initial crack*, *crack propagation* dan *final crack*.

### 3.5.5 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi bertujuan untuk menganalisa fasa, bentuk, dan ukuran struktur mikro dari spesimen. Pengujian dilakukan dengan menggunakan mikroskop optic Olympus BX51M-RF. Adapun langkah-langkah pengujian metalografi terdiri dari

1. *Grinding*

*Grinding* atau mengamplas adalah metode menggosok spesimen dengan kertas gosok grade 80-2000 diberikan air mengalir. Spesimen diputar 90° setelah naik *grade*.

2. *Polishing*

*Polishing* adalah metode memoles spesimen dengan pasta alumina di atas piringan yang berputar cepat. Proses ini menghasilkan permukaan spesimen yang mengkilat seperti cermin.

3. *Etching*

*Etching* adalah metode untuk mengkorosi sebagian permukaan logam agar terlihat dalam mikroskop metalografi. Dalam penelitian ini menggunakan etsa Carpenter dengan komposisi sesuai ASTM E407-07 nomor 88 yaitu 10 mL HNO<sub>3</sub>, 20 mL HCl, dan 30 mL air.

4. Observasi

Proses pengamatan struktur mikro secara langsung menggunakan mikroskop optik metalurgi. Dalam spesimen ini menggunakan mikroskop Optik Olympus BX 51M-RF seperti pada Gambar 3.6.



**Gambar 3. 6** Mikroskop Optik Olympus BX51M-RF  
(Dokumen Pribadi)

### 3.5.6 Pengujian Kekerasan

Kekerasan suatu material dapat didefinisikan sebagai ketahanan material terhadap gaya penekanan material lain yang lebih keras. Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel. Kekerasan suatu material ditentukan oleh dalamnya area ataupun luas area indentasi yang dihasilkan (tergantung jenis indenter dan jenis pengujian). Mesin yang digunakan merupakan mesin *Universal Hardness Tester* HBRV-187.5 A. Pengujian Vickers Pada metode ini digunakan indenter intan berbentuk piramida dengan sudut  $136^\circ$  dengan beban 30-100kg. Pengujian ini menggunakan standar ASTM E92-17. Gambar 3.7 merupakan alat yang digunakan untuk pengujian kekerasan.



**Gambar 3. 7** *Universal Hardness Tester* (Dokumen Pribadi)

### 3.5.7 Pengujian SEM

Pengujian SEM dilakukan untuk mendapatkan informasi yang terdapat pada permukaan material. Mekanisme kerja dari mesin uji SEM ini yaitu ada *electron* yang ditembakkan kepada

material. Kemudian dari penembakan elektron tersebut ada yang dibiaskan dan hasil dari pembiasan ini yang kemudian tampil pada komputer untuk dilihat hasil karakterisasi dari permukaan material tersebut. Pengujian SEM menggunakan standar ASTM E-986. Gambar 3.8 merupakan alat yang digunakan untuk pengujian SEM



**Gambar 3. 8** Mesin Pengujian SEM (Dokumen Pribadi)

### **3.5.8 Pengujian XRD**

Pengujian XRD dilakukan bertujuan untuk mengetahui tegangan sisa dan hasil korosi. Mekanisme uji XRD yaitu dengan cara menembakkan elektron dan elektron akan dibiaskan. Hasil dari pembiasan akan muncul di komputer. Pengujian ini menggunakan alat yang ada di Laboratorium Karakterisasi Departemen Teknik Material dengan merek XRD PAN Analytical Xpert Pro. Pengujian ini menggunakan standar ASTM E1426-14. Gambar 3.9 merupakan mesin yang digunakan untuk melakukan pengujian XRD.



**Gambar 3. 9** Mesin XRD PAN Analytical Xpert Pro (Dokumen Pribadi)

### **3.5.9 Pengujian Komposisi**

Uji komposisi kimia merupakan suatu pengujian untuk mengetahui kandungan unsur kimia yang terdapat pada suatu logam benda uji. Komposisi kimia dari logam sangat penting untuk diketahui karena komposisi kimia pada logam bisa menentukan sifat dari logam tersebut. Spectrometer adalah alat yang mampu menganalisis unsur-unsur logam induk atau campurannya dengan akurat, cepat dan mudah dioperasikan. Pengujian ini menggunakan standar ASTM E1086-08.

### **3.6 Rancangan Penelitian**

Adapun rancangan untuk penelitian ini terdiri dari rancangan pengujian dan rancangan jadwal penelitian

### 3.6.1 Rancangan Pengujian

**Tabel 3. 1** Rancangan Penelitian

Pengujian	Bahan	
	Daerah yang Dekat Permukaan	Daerah yang Jauh dari Permukaan
Pengamatan Makro	√	
Penetran	√	
Komposisi (OES)	√	
Kekerasan	√	√
Struktur mikro (metalografi)	√	√
SEM	√	√
XRD	√	√



## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil

#### 4.1.1. Data Operasional

Mesin *circulating water pump* (CWP) yang digunakan untuk mendinginkan pembangkit listrik menggunakan motor untuk menggerakkan mesin tersebut. Pada penelitian ini mesin CWP yang digunakan adalah mesin dengan merek SULZER tipe BSn 1320 single stage. *Shaft* menyalurkan daya dari motor ke impeler sehingga mesin dapat berfungsi dengan baik yaitu memompakan air laut ke kondeser. Tabel 4.1 menjelaskan data operasional mesin CWP.

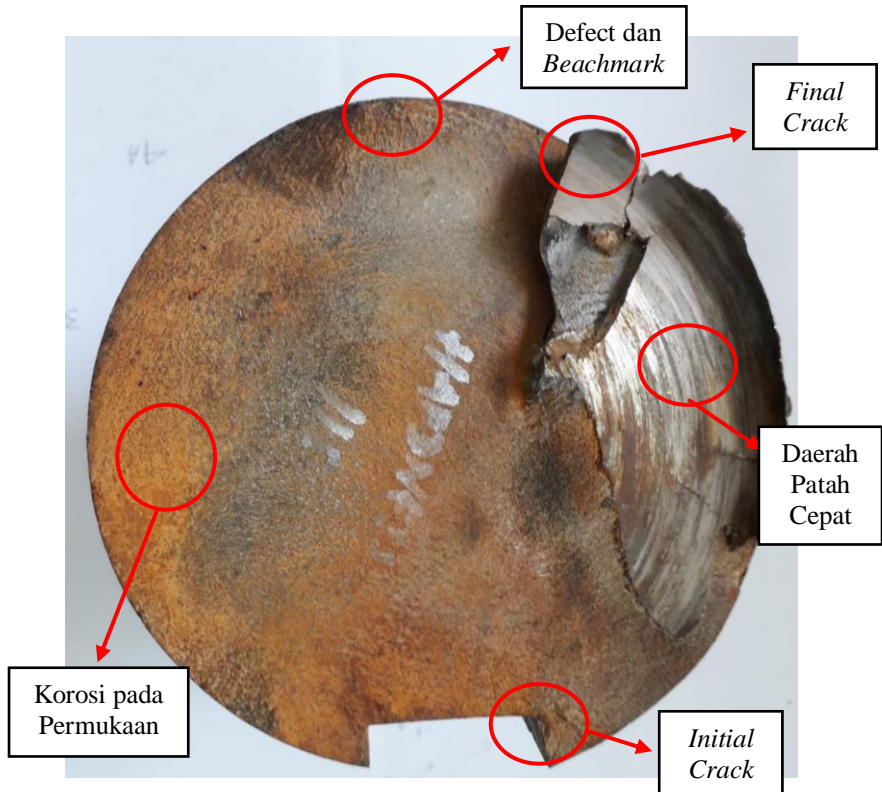
**Tabel 4. 1** Data Operasional dan Spesifikasi Mesin CWP

Larutan yang mengalir	Air Laut
Debit air	27.000 m <sup>3</sup> /jam
Kecepatan putar pompa	295 rpm
Daya pompa	736 kW
Daya shaft	354 kW
Tegangan listrik	6 kV
Efisiensi pompa	90%
Berat CWP	13130 kg
Berat propeler dan shaft	2447,442 kg
Tinggi pompa	4,6 m
Temperatur (min-max)	-20 – 40 °C
Temperatur kerja	33°C ( <i>ambient</i> temperatur air laut di sekitar pabrik)
Material Shaft	SUS 316L (JIS)

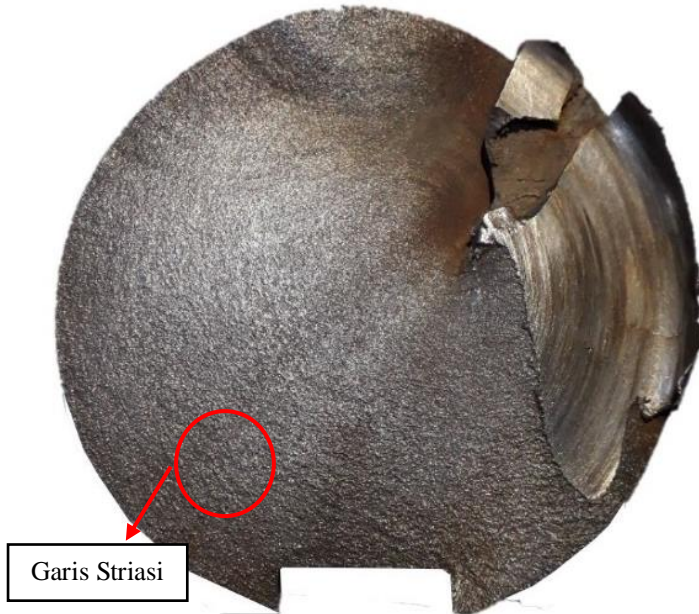
#### 4.1.2. Hasil Pengamatan Makro

Pengamatan visual secara makro menggunakan kamera DSLR pada komponen *shaft* yang mengalami kegagalan.

Kerusakan pada *shaft* dari mesin circulating water pump ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2



**Gambar 4. 1** Permukaan Patahan *Shaft* mesin CWP



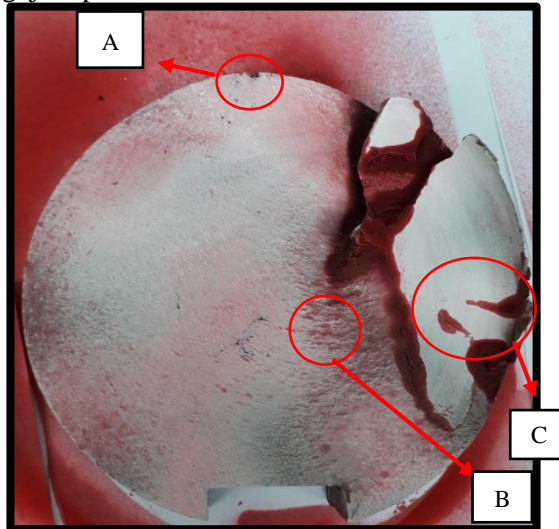
**Gambar 4. 2** Pola Garis Striasi yang Terlihat Setelah *Shaft* Dibersihkan

Dari hasil pengamatan makro terlihat *initial crack* pada bagian *keyway* dari permukaan luar *shaft*. Hasil juga menampilkan garis striasi pada bagian tengah yang menandakan *shaft* mengalami beban kerja yang berulang. Daerah yang halus merupakan bagian dari daerah patah cepat hingga *final crack*. *Shaft* juga mempunyai sisa korosi yang banyak pada permukaan patahan.

#### 4.1.3. Hasil Pengujian Penetran

Pengujian penetran dilakukan bertujuan untuk mencari retak-retak makro yang terdapat pada permukaan patahan. Pengujian dilakukan dengan cara menyemprotkan cairan penetran pada permukaan hingga rata lalu setelah itu

menyemprotkan cairan developer sehingga cairan penetrant terangkat dan *crack* pada permukaan terlihat. Setelah selesai melakukan pengamatan dan pengambilan gambar, disemprotkan *cleaner/remover* untuk menghilangkan sisa dari cairan penetrant dan developer. Gambar 4.3 merupakan hasil dari pengujian penetrant.



**Gambar 4. 3** Hasil Pengujian Penetrant

Dari hasil pengujian penetrant yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, terlihat *defect* rongga (porous) pada bagian (A), garis-garis striasi pada bagian (B) yang merupakan daerah dekat pusat rotasi *crack* dan adanya retak pada daerah cepat pada bagian (C) karena adanya pertambahan panjang pada daerah pinggir.

#### **4.1.4. Hasil Pengamatan Stereomikroskop**

Pengamatan stereomikroskop dilakukan untuk mengambil gambar lebih detail pada bagian tertentu menggunakan stereomikroskop. Gambar yang diambil

pada titik *initial crack* (Gambar 4.4), *defect* (Gambar 4.5), *crack propagation* (Gambar 4.6), dan *final crack* (Gambar 4.7).

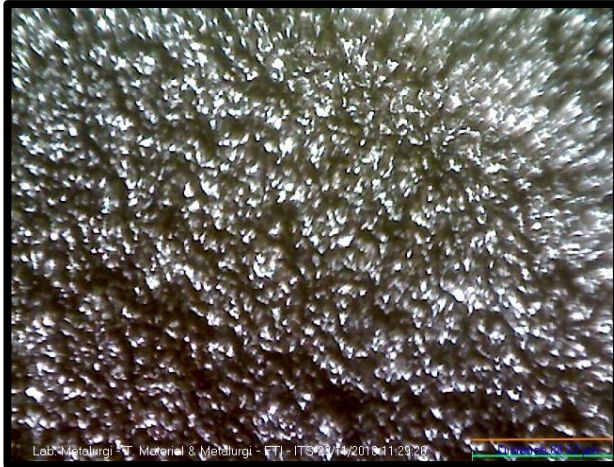


**Gambar 4. 4** Titik *Initial Crack*



**Gambar 4. 5** Titik *Defect* dan Rambatan Retak





**Gambar 4. 6** Daerah Garis Striasi



**Gambar 4. 7** Crack pada Daerah Patah Cepat

#### 4.1.5. Hasil Pengujian Komposisi Material *Shaft*

Pengujian komposisi menggunakan OES (*Optical Emission Spectroscopy*). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia pada *shaft* dari mesin CWP ini. Menurut *manual and maintenance book* untuk *shaft* dari CWP menggunakan material SUS 316L (JIS) atau *stainless steel* 316L. Pada Tabel 4.2 menampilkan perbandingan antara hasil pengujian komposisi *shaft* dengan komposisi standar *stainless steel* 316L dan 316.

**Tabel 4. 2** Perbandingan Uji Komposisi *Shaft* dengan Standar *Stainless Steel* 316L dan 316 (*Schweitzer, 2007*)

Unsur	Kadar %		
	<i>Shaft</i>	<i>Stainless Steel</i> 316L	<i>Stainless Steel</i> 316
C	0,0384	≤ 0,03	≤ 0,08
Mn	1,59	≤ 2,0	≤ 2,0
Si	0,307	≤ 0,75	≤ 0,75
P	0,0219	0 – 0,045	0 – 0,045
S	0,0129	≤ 0,03	≤ 0,03
Cr	16,7	16,0 – 18,0	16,0 – 18,0
Mo	2,33	2,0 – 3,0	2,0 – 3,0
Ni	11,9	10,0 – 14,0	10,0 – 14,0
N	0,0718	≤ 0,10	≤ 0,10
Fe	65,7	Balance	Balance

Pada buku manual perusahaan tertulis untuk material *shaft* dari CWP adalah *stainless steel* 316L. *Shaft* terdapat sedikit karbon yang berlebih (0,0384 %C) yang seharusnya kadar karbon maksimal yang diperbolehkan untuk *stainless steel* 316L adalah ≤0,03. Untuk unsur lain dari *shaft* sudah memenuhi standar yang ada. Jika dibandingkan dengan standar *stainless steel* 316 dan 316L maka *shaft* ini seharusnya lebih cocok dikategorikan ke *stainless steel* 316.

#### 4.1.6. Hasil Pengamatan Struktur Mikro *Shaft*

Pengamatan struktur mikro menggunakan alat mikroskop optik dengan menggunakan metode metalografi. Pengamatan ini berguna untuk melengkapi karakterisasi dari material *shaft* yang mengalami kegagalan. Pengamatan dilakukan di 2 daerah yaitu daerah yang jauh dan dekat dari patahan. Ini dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro pada 2 daerah tersebut. Hasil dari pengamatan struktur mikro ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9.



**Gambar 4.8** metallog Struktur Mikro Daerah Jauh dari Permukaan Patahan dengan Pembesaran 1000x

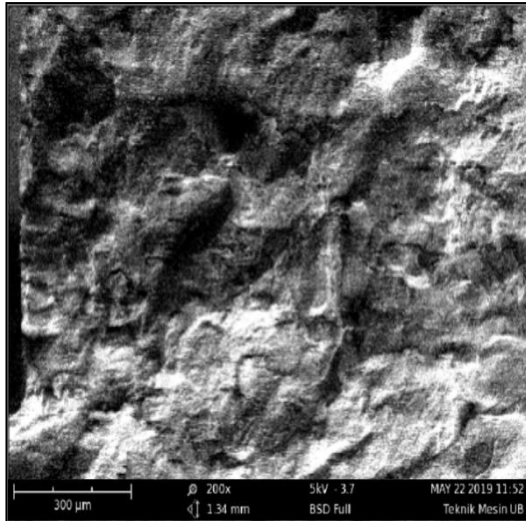




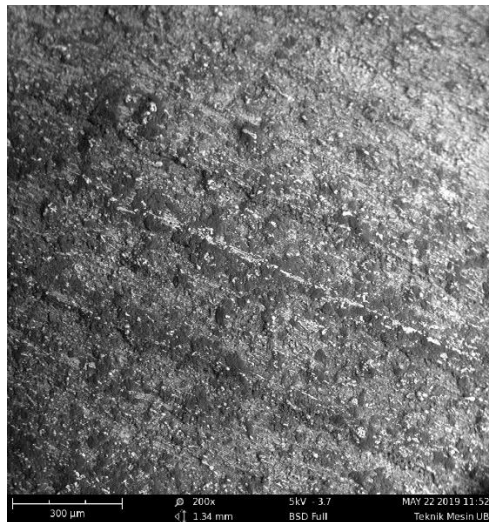
**Gambar 4. 9** Struktur Mikro Daerah Dekat dari Permukaan Patahan dengan Pembesaran 1000x

#### **4.1.7. Hasil Pengamatan SEM (*Scanning Electron Microscope*)**

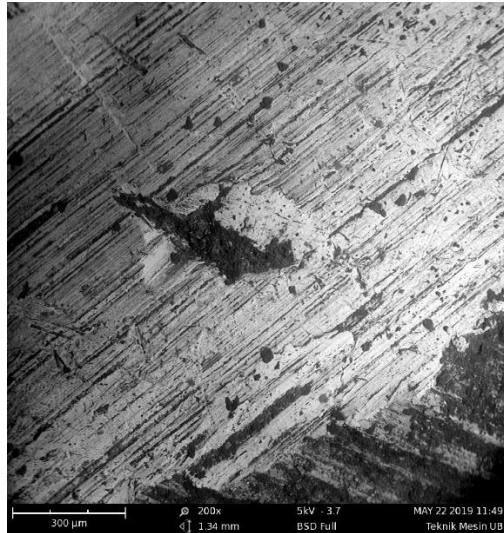
Pengamatan struktur mikro dengan metode SEM ini dilakukan untuk melengkapi karakterisasi pada bagian permukaan material yang mengalami kegagalan. Permukaan material yang diuji merupakan bagian *initial crack*, garis striasi, dan daerah patah cepat. Pengujian SEM dilakukan pada bagian *initial crack* (Gambar 4.10), daerah striasi (Gambar 4.11) dan bagian patah cepat (Gambar 4.12).



**Gambar 4. 10** Fraktografi Bagian Initial Crack



**Gambar 4. 11** Fraktografi Bagian Daerah Striasi



**Gambar 4. 12** Fraktografi Bagian Daerah Patah Cepat

#### 4.1.8. Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan pada material *shaft* dilakukan untuk mengetahui persebaran nilai kekerasan pada material tersebut. Pengujian dilakukan pada 3 titik yaitu pada *initial crack*, *crack propagation*, dan *final crack*. Setiap titik dilakukan dari bagian yang dekat ke permukaan hingga yang jauh dari permukaan patahan dengan metode *Vickers* sebanyak 5 kali indentasi. Tabel 4.3 merupakan hasil dari pengujian kekerasan dan Gambar 4.13 merupakan representasi grafik dari hasil pengujian kekerasan.

**Tabel 4. 3** Distribusi Kekerasan *Shaft*

Lokasi (dari permukaan patahan)	<i>Crack Propagation</i>	<i>Initial Crack</i>	<i>Final Crack</i>
	HV	HV	HV
2mm	201	211	222
10mm	190	194	210

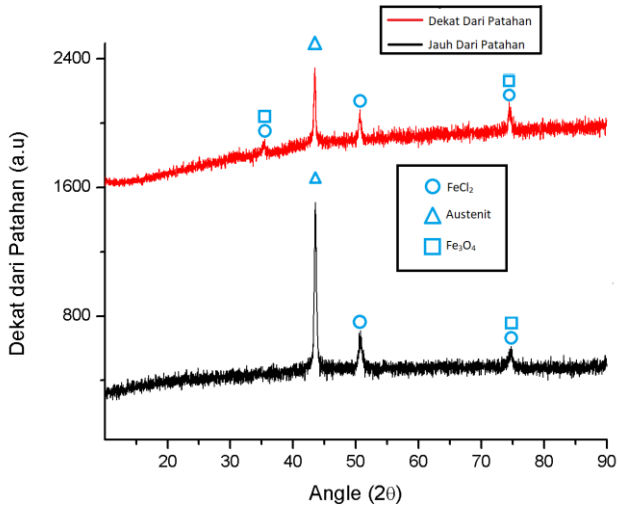
15mm	185	189	194
20mm	179	184	182
25mm	165	172	172



**Gambar 4. 13** Perbandingan Kekerasan pada Daerah *Initial Crack*, *Propagation*, dan *Final Crack*

#### 4.1.9. Hasil Pengujian XRD

Hasil output XRD dengan menggunakan program *Origin Lab* dapat dilihat pada Gambar 4.14, hasil perhitungan regangan kristal dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan produk korosi pada Tabel 4.5.



**Gambar 4. 14** Hasil Uji XRD pada Daerah yang Dekat dan Jauh dari Patahan

**Tabel 4. 4** Hasil Perhitungan Regangan Kristal

Zona Patahan	Regangan Kristal	Tegangan Sisa
Jauh Dari Patahan	$1,06 \times 10^{-3}$	204,58 MPa
Dekat dari Patahan	$2.56 \times 10^{-3}$	494.08 MPa

**Tabel 4. 5** Senyawa Korosi Hasil Analisa XRD

Senyawa Korosi
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
FeCl <sub>2</sub>

## 4.2 Pembahasan

*Shaft circulating water pump* digunakan untuk memompa air laut yang berfungsi sebagai pendingin pada

mesin pembangkit listrik. *Shaft* ini berputar dengan kecepatan 295 rpm (*round per minute*) dan daya sebesar 354 kW. Dari data tersebut didapatkan beban torsi sebesar 160,004 MPa. Dikarenakan *shaft* berdiri secara vertikal maka *shaft* juga menerima beban aksial yang diakibatkan dari beban dirinya. Dari perhitungan kedua beban tersebut maka didapatkan tegangan principal yang diterima *shaft* sebesar 162,1935 MPa. Tegangan ini relatif tinggi dibandingkan dengan *yield strength* dari *stainless steel* 316 yaitu 290 MPa (Peckner & Bernstein, 1977). Berdasarkan Gambar 2.18 S-N diagram dari *stainless steel* 316, *shaft* ini berada pada daerah  $10^6$ . Kegagalan *shaft* juga bisa dikarenakan pembebanan yang berlebihan atau overload. Sesuai dengan Tabel 2.4, 11% dari kegagalan material adalah kelebihan beban yang dialami.

Dari pola patahan pada permukaan *shaft*, *shaft* menerima pembebanan secara terus menerus. *Shaft* mengalami beban torsi yang diakibatkan perputaran *shaft* tersebut dan beban aksial yang diakibatkan dari berat benda tersebut. Dari data historis, *shaft* ini sering mengalami *start and stop* yang dimana pada saat *start and stop shaft* akan mengalami percepatan dan perlambatan kecepatan putar yang dapat meningkatkan beban torsi.

Dari hasil pengamatan makro dan pengujian stereomikroskop. Terlihat titik *initial crack* pada daerah *keyway* mengalami sedikit perubahan bentuk berupa pengikisan pada sudut. Area yang umum menjadi *initial crack* adalah pada bagian yang menerima konsentrasi tegangan dan mempunyai radius terkecil dibandingkan daerah lain yaitu pada bagian *keyway* khususnya pada sudut-sudut yang tajam pada penampang poros. (Setiawan, 2016). Garis striasi terlihat jelas dan kasar yang menandakan adanya pembebanan berulang dan perambatan retak. Pada patah lelah, daerah permukaan patahan yang terbentuk pada saat perambatan retak dapat diketahui dengan striasi (*striation*). Hal tersebut menandakan konsentrasi tegangan yang meluas dari tempat awal retak,

biasanya dalam bentuk melingkar. (Callister, 2014). Pada daerah patah cepat terdapat *crack* yang cukup terlihat yang diakibatkan adanya pertambahan panjang (elongasi) pada bagian permukaan luar *shaft*. Dari hasil pengujian penetran terlihat ada titik *defect*, titik *defect* ini juga dapat menyebabkan *initial crack*. Menurut Zerbs U dkk dari jurnalnya, *initial crack* dibagi menjadi 2 faktor, faktor mikrostruktural dan mekanik. Lokasi *defect* seperti porositas, inklusi, *pitting* korosi dapat menyebabkan bagian tersebut sebagai konsentrasi tegangan yang dapat menyebabkan *initial crack* pada daerah tersebut. (Zerbst U, 2019).

Buku manual tertulis material *shaft* adalah *stainless steel* 316L, tetapi setelah dilakukan pengujian menggunakan *optical emission spectrometry* (OES) kadar karbon yang didapatkan melebihi batas standar untuk *stainless steel* 316L. Sehingga material pada *shaft* ini merupakan *shaft* dari *stainless steel* 316.

*Stainless steel* 316 mempunyai kekuatan tensil dan *yield strength* lebih tinggi dari 316L, tetapi *stainless steel* 316 mempunyai ketahanan korosi yang lebih lemah daripada tipe 316L, terutama pada korosi *intergranular* pada saat pengelasan. Selain itu *stainless steel* 316 jika dilihat dari diagram fasa pada Gambar 2.7 *stainless steel* 316 yang mempunyai kadar karbon lebih dari 0,03 akan mempunyai beberapa fasa pada struktur mikronya. Perbedaan fasa ini akan memperlemah ketahanan korosi karena adanya perbedaan potensial antar fasa.

Dari hasil pengujian struktur mikro didapatkan hasil austenit sepenuhnya. Berbeda dengan diagram fasa pada Gambar 2.7 yang dimana seharusnya mempunyai beberapa fasa. Maka material ini telah mengalami perlakuan panas untuk mendapatkan hasil mikrostruktur berupa austenit sepenuhnya. Perlakuan panas ini menggunakan pendinginan cepat untuk mendapatkan austenit sepenuhnya (Shreir, 1963). Laju pendinginan yang cepat menyebabkan tegangan tarik pada permukaan luar dan tegangan tekan pada permukaan dalam

yang diakibatkan adanya perbedaan laju pendinginan pada permukaan dalam dan luar sehingga laju penyusutan akan berbeda pula sehingga dapat menyebabkan *defect* berupa *crack*.

Hasil pengujian SEM menunjukkan pada bagian *initial crack* terdapat adanya retakan yang menunjukkan awal terjadinya kegagalan. Pembebanan yang terus menerus yang dialami akan menyebabkan retak menjalar dan membentuk garis striasi. Pada daerah striasi retakan cenderung kasar dan searah. Gambar 4.12 menunjukkan daerah akhir patahan yang dimana lebih halus daripada pada daerah awal retakan ataupun daerah striasi. Pada daerah ini juga ditemukan *crack* yang cukup dalam.

Dari hasil pengujian kekerasan pada 3 daerah yaitu *initial*, *crack propagation*, dan *final* yang dilakukan dari daerah dekat permukaan patahan hingga yang jauh dari patahan. Dapat dilihat dari Gambar 4.13, nilai kekerasan menurun dari daerah yang dekat dari permukaan patahan hingga daerah yang jauh dari patahan. Hal ini terjadi dikarenakan adanya *residual stress* pada daerah permukaan patahan yang menyebabkan *strain hardening* dan meningkatkan nilai kekerasan. (Hamid, 2018) Untuk daerah dengan nilai kekerasan tertinggi adalah pada daerah *final crack*. *Final crack* merupakan daerah patah cepat yang bersifat *brittle* dan mempunyai nilai deformasi yang sangat besar karena sudah adanya pengurangan luas permukaan *shaft*. Besarnya pembebanan yang dikenakan mempengaruhi nilai kekerasan, semakin besar beban yang dikenakan pada benda uji nilai kekerasan yang terjadi cenderung besar. (Rusianto, 2008).

Pengujian XRD dilakukan untuk mencari regangan mikrostruktur dan produk korosi dari *shaft*. Berdasarkan hasil Tabel 4.4 bahwa daerah dekat patahan memiliki nilai regangan kristal yang lebih tinggi ( $2,56 \times 10^{-3}$ ) dibandingkan dengan yang jauh dari patahan ( $1,06 \times 10^{-3}$ ). Tegangan sisa hasil perhitungan juga mengikuti dengan regangan kristal dimana,



tegangan sisa pada yang dekat dari patahan lebih tinggi (494,08MPa) dibandingkan yang jauh dari patahan (204,58MPa). Beban yang dikenakan pada bahan maka bahan akan mengalami reaksi terhadap beban tersebut dengan mengalami regangan. Energi dalam bahan akan meningkat seiring dengan penambahan beban. Jika tegangan lebih tinggi dari kemampuan dari kekuatan bahan itu maka material akan mengalami kerusakan/patahan. (Rusianto, 2008)

Hasil XRD menunjukkan hasil korosi berupa  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan  $\text{FeCl}_2$ . Produk korosi ini didapatkan dari lingkungan yang berupa air laut. Komposisi air laut tidaklah hanya NaCl, komposisi air laut berbeda dari satu tempat ke tempat lainnya. (Defrancq, 2013).  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang didapatkan merupakan hasil reaksi dengan air yang ada di dalam lingkungan.

Korosi pada *shaft* ini dapat berupa *pitting* dan *stress corrosion cracking*. Jika dilihat dari nilai PREN (*pitting resistance equivalent numbers*) yang didapatkan dari *shaft* adalah 26,643. Nilai tersebut mendekati dengan nilai yang ada di literatur pada Tabel 2.7 yaitu 27,90. Nilai PREN dari SS 316 masih terbilang rentan terhadap korosi pitting. Pitting dapat terjadi pada permukaan yang terekspos langsung pada lingkungan berklorida tinggi, seperti pada air yang digunakan untuk pendingin menggunakan air muara. (Schweitzer, 2007). Korosi pada *stainless steel* biasanya terjadi secara *local* karena terkikisnya lapisan pasif. Laju korosi yang tinggi terjadi pada saat terkikisnya lapisan pasif dikarenakan adanya perbedaan potensial. Selain itu, adanya stabilitas lapisan pasif berkurang karena adanya ion klorin pada air karena ion tersebut dapat menembus lapisan pasif. Pada saat *pitting* sudah terbentuk maka selanjutnya akan ada ion klorin yang terkonsentrasi pada *pitting*, kondisi ini akan membuat *pit* semakin menjalar. (Francis, 1999)

Korosi tegangan yaitu korosi yang timbul sebagai akibat bekerjanya tegangan pada suatu benda yang berada pada media yang korosif. Korosi ini menyebabkan terjadinya keretakan.

Tegangan dapat berupa tegangan tarik, tegangan sisa, ataupun tegangan pada saat mesin bekerja (Suherman, 1999). Menurut (Battacharyya, 2007) ada 3 kondisi yang diperlukan untuk terjadinya SCC yaitu; material yang rentan terhadap korosi, lingkungan yang korosif, dan tegangan yang cukup. Kelas dari baja tahan karat yang paling rentan terhadap SSC adalah kelas yang mempunyai nikel pada rentang 7-12% (304,304L, 316, 316L, 321,303, 302, dan 301). Ion yang paling umum menyerang adalah ion klorida, dan ion sulfida ( $H_2S$  dan  $SO_2$  dalam larutan). SCC dengan adanya NaCl biasanya terjadi pada suhu  $50^{\circ}C$  sampai  $200^{\circ}C$ , tetapi jika terdapat ion lainnya seperti campuran hydrogen sulfida dengan NaCl maka SCC dapat terjadi pada temperatur ruangan. (Schweitzer, 2007).

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini yaitu:

1. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan beberapa faktor yang menyebabkan material *shaft* mengalami patah:
  - a. Beban kerja yang berulang yang cukup tinggi. Dengan beban torsi 160,004 MPa dan tegangan principal 162,1935 MPa dan material mempunyai *yield strength* 290 MPa sehingga membuat material mengalami patah lelah dalam jangka waktu tertentu.
  - b. Korosi pada material yang ditandai adanya produk korosi  $\text{FeCl}_2$  dan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Mekanisme korosi berupa korosi pitting yang menyebabkan *defect* dan korosi *stress corrosion cracking* yang diakibatkan lingkungan air laut yang korosif dan besarnya tegangan yang diterima material.
2. Mekanisme kegagalan material disebabkan adanya beban yang berulang secara terus menerus sehingga pada suatu titik maksimum komponen menerima beban dan menyebabkan patah. Awal retakan terdapat pada daerah *keyway* dimana pada daerah ini terjadi pemusatan tegangan akibat adanya gesekan antara *shaft* dengan gear dan sudut tajam pada bagian tersebut.
3. Hal-hal yang dapat dilakukan untuk mencegah agar tidak terjadi kegagalan yaitu dengan mengurangi beban mesin dengan cara mengurangi daya yang digunakan pada *shaft* dan meningkatkan upaya untuk perlindungan dari korosi seperti menggunakan proteksi katodik.

---

## 5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan penulis untuk perusahaan adalah:

1. Mengatur operasional mesin sehingga mesin tidak menerima beban yang terlalu besar sehingga tidak melebihi dari batas fatik menurut S-N diagram
2. Mengurangi adanya sudut tajam pada desain *shaft* untuk mengurangi kemungkinan terjadinya retakan pada daerah tersebut.
3. Memberikan upaya pencegahan korosi pada *shaft* salah satunya dengan cara proteksi katodik.

## DAFTAR PUSTAKA

- \_\_\_\_\_, 2002. **ASM Handbook Vol 11: Failure Analysis and Prevention.** USA: ASM International.
- \_\_\_\_\_, 2002. **ASM Handbook Vol. 19 Fatigue and Fracture.** USA: ASM International.
- Akuan, A. 2007. **Kelelahan Logam.** Bandung: Universitas Jenderal Achmad Yani.
- ASM International. 2008. **Stainless Steel for Design Engineers.**
- Atlas Specialty Metals. 2008. **The Atlas Specialty Metals Technical Handbook of Stainless Steel.** Australia: Atlas Specialty Metals Technical Services Department.
- Basselo, D. 2014. **Optimasi Diameter Poros Terhadap Variasi Diameter Sproket pada Roda Belakang Sepeda Motor.** Manado: Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi.
- Battacharyya, S. 2007. "Failure Analysis of an Input Shaft of Skip Drive Gearbox" **Engineering Failure Analysis**, 418.
- Bhadeshia, H. K. 2006. **Steels Microstructure and Properties.** Elsevier Ltd.
- Bintoro, A. G. 2000. **Dasar-Dasar Pengerjaan Las.** Yogyakarta: Kanisius.
- Bloch, H., dan Geitner, F. 1994. **Machinery Failure Analysis and Troubleshooting.** Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Brooks, C. A. 2002. **Failure Analysis of Engineering Materials.** New York: McGraw-Hill.
- Callister, W. D. 2014. **Materials Science and Engineering.** USA: Wiley.
- Courtney, T. H. 2000. **Mechanical Behaviour of Materials.** USA: Waveland.

- 
- Defrancq. 2013. **Corrosion of 316L Stainless Steel in Seawater.**
- Dewan Energi Nasional. 2016. **Outlook Energi Indonesia 2016.** Jakarta: Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional.
- Francis, R. 1999. **The Corrosion of Some Stainless Steels in a Marine Mud.** UK: University of Surrey.
- Fontana, M. G. 1967. **Corrosion Engineering.** Ohio: McGraw-Hill.
- Gunn, R. N. 1997. **Duplex Stainless Steel (Microstructure, Properties, and Applications).** Woodhead Publishing.
- Hamid, A. 2018. "Failure Analysis of Shaft Circulating Water Pump (CWP) Used in Power Plant." **Proceeding MATEC Web of Conference**, 159.
- Hartono. 2017. "Pengembangan Kontrol Peningkatan Daya Listrik Rumah Tangga Menggunakan On/OFF Grid Tie Inverter". **Jurnal Teknologi Elektro**, Universitas Mercu Buana, 192-199.
- Haryadi, G. D. 2017. "Failure Analysis on Shaft of Circulating Water Pump at Power Plant." **Proceeding SNTTM XVI**, 32-37.
- Kailas, S. V. **Material Science.** India: Indian Institute of Science.
- Keenan, C. W. 1980. **Ilmu Kimia Untuk Universitas** Edisi ke 6 Jilid ke 2. Jakarta: Erlangga.
- Kementerian ESDM. 2017. **Kajian Penyediaan dan Pemanfaatan Migas, Batubara, EBT, dan Listrik.** Jakarta: Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian ESDM.
- Kementerian ESDM. 2017. **Statistik Ketenagalistrikan 2017.** Jakarta.
- Khatak, H. R. 2002. **Corrosion of Austenitic Stainless Steels (Mechanism, Mitigation, and Monitoring).** Cambridge England: Woodhead Publishing Limited.
-

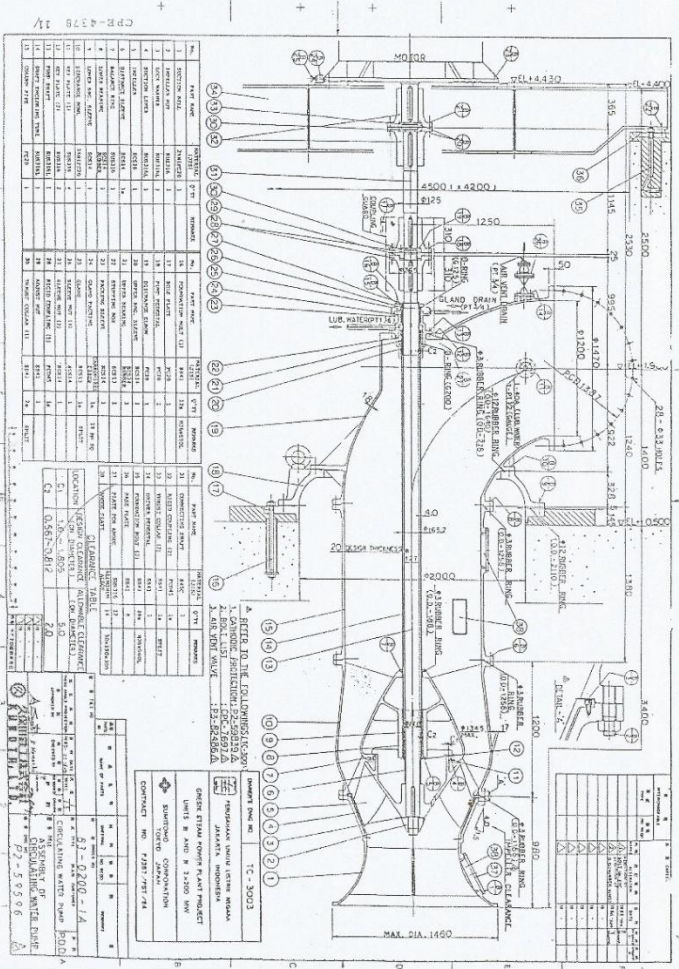
- 
- Kushwaha, T. N. 2015. "CW Pump Fluid Induced Vibration Troubleshooting Methodology." **Procedia Engineering**, 274-282.
- Lee, J. 1999. Upgrade of Steel Database. Stockholm.
- Mohammad, K. A.. Fatigue Life for Type 316L Stainless Steel under Cyclic Loading. **Advanced Materials Research**, 77-81.
- Muhammad, W. 2010. Failure Analysis of Water Pump Shaft. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, 161-166.
- Negara, P. U. **Operation & Maintenance Manual** Volume 4.
- Nishida, S.-i. 1992. **Failure Analysis in Engineering Application**. United Kingdom: Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Peckner, D., dan Bernstein. 1977. **Handbook of Stainless Steels**. New York: McGraw-Hill.
- Rusianto, T. 2008. "Pengaruh Tegangan Dalam (Internal Stress) Terhadap Laju Korosi Pada Baut." **Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sians dan Teknologi**.
- Schweitzer, P. A. 2007. **Fundamentals of Metallic Corrosion**. Francis: CRC Press.
- Setiawan, A. d. 2016. **Analisa Kegagalan Poros Pompa Centrifugal Multistage (GA101A) Sub Unit Sintesa Urea PT. Petrokimia Gresik**. Surabaya: Teknik Mesin FTI ITS.
- Shreir, L. 1963. **Corrosion** Volume 1. London.
- Smallman, R. E. 1999. **Modern Physical Metallurgy & Materials Engineering**. Butterworth-Heinemann.
- Speight, J. G. 2015. **Fouling in Refineries**. Elsevier.
- Sugiarto, T. 2013. **Analisa Uji Ketahanan Lelah Baja Karbon Sedang AISI 1045 dengan Heat Treatment (Quenching) dengan Menggunakan ALat Rotary Bending**. Lampung: Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
-

- 
- Suherman, W. 1999. **Ilmu Logam II**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Susanto, D. P. **Analisis Kegagalan Cooler Motor Pompa Circulating Water di PLTU (Studi Kasus di PLTU)**. Bandung.
- Tao, Z. W.-Q. 2017. Behaviour of Three Types of Stainless Steel After Elevated Temperature. **Journal of Constructional Steel Research**.
- Van, G. Z. 2013. **Failure Analysis of Conveyor Pulley Shaft**. Saudi Arabia: SABIC T&I Jubail.
- Vazdirvanidis, A. 2016. "Corrosion Investigation of Stainless Steel Water Pump Component." **Engineering Failure Analysis**, 1-8.
- Xiao-lei. 2013. **Failure Analysis of a Truck Diesel Engine Cracnkshaft**. China: Dalian Maritime University.
- Yue-Ma. 2014. "Failure Analysis on Ciculating Water Pump of Duplex Stainless Steel in 1000 MW Ultra-Supercritical Thermal Power Unit". **Engineering Failure Analysis**, 162-176.
- Zerbst U, D. 2019. "Defects as a Root Cause of Fatigue Failure of Metallic Components". **Engineering Failure Analysis**, 777-792.



# LAMPIRAN

## 1. Gambar Desain Pompa Circulating Water Pump



## 2. Hasil Pengujian OES



POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA  
LABORATORIUM UJI BAHAN

### OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY RESULT

No. SPK : 08-III/PL19/BJP/2019	Penandaan : -1
Pelanggan : BRIAN HARIMAN T / T. MATERIAL - ITS	Material : STAINLESS STEEL
Lab-no. : LAB. UJI BAHAN	Dimensi : 25x25x10 mm
Kepala Lab. : M. THORIQ W., ST., MM.	Heat No. : -
Program : FE_300	Keterangan : -

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	65.6	0.0450	0.338	1.62	0.0207	0.0119	16.6	2.37
2	65.8	0.0380	0.297	1.57	0.0204	0.0117	16.6	2.32
3	65.8	0.0321	0.287	1.58	0.0245	0.0152	16.8	2.31
Ave	65.7	0.0384	0.307	1.59	0.0219	0.0129	16.7	2.33

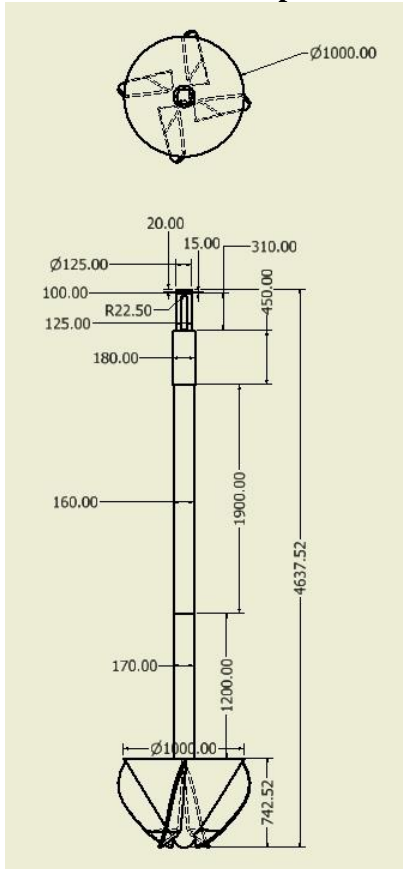
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	11.8	0.0865	0.212	0.808	0.0488	0.0020	0.0712	0.0389
2	12.0	0.0365	0.218	0.542	0.0464	< 0.0010	0.0758	0.0401
3	11.8	0.0216	0.221	0.574	0.0371	< 0.0010	0.0768	0.0445
Ave	11.9	0.0482	0.217	0.641	0.0441	< 0.0010	0.0746	0.0412

	Pb	Sn	B	Ca	N	Se	Sb	Ta
1	< 0.0010	0.0143	0.0050	0.0009	0.0602	< 0.0020	0.0746	< 0.0046
2	0.0033	0.0151	0.0057	0.0014	0.100	< 0.0020	0.0587	< 0.0046
3	0.0030	0.0171	0.0063	0.0017	0.0546	< 0.0020	0.0457	< 0.0046
Ave	0.0024	0.0155	0.0057	0.0014	0.0718	< 0.0020	0.0596	< 0.0046

Surabaya, 12 Maret 2019  
 Diuji oleh,  
  
 (MUHAMMAD THORIQ W.)  
  
 Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya (Indonesia)  
 Tel. : +62 31 5999444 Fax: +62 31 5999444

### 3. Desain Model Pompa



#### 4. Perhitungan Berat *Pompa dan Shaft*

Dengan menggunakan hasil desain *modelling* dan massa jenis stainless steel 316 yang diketahui sebesar  $8000 \text{ kg/m}^3$ .

#### General Properties

Mass 2447,452 kg (Relat)



Area 5476705,924 mm<sup>^2</sup>

Volume 305931549,010 mm<sup>^3</sup>



## 5. Hasil Uji Kekerasan

### a. Daerah *Initial Crack*

Jarak Dari Permukaan Patahan	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3	Pengujian 4	Rata-Rata
2 mm	203	198	203	200	201
10 mm	188	187	192	193	190
15 mm	186	184	183	187	185
20 mm	175	180	183	178	179
25 mm	162	168	167	163	165

### b. Daerah *Crack Propagation*

Jarak Dari Permukaan Patahan	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3	Pengujian 4	Rata-Rata
2 mm	210	212	208	214	211
10 mm	197	195	193	191	194
15 mm	188	190	190	188	189
20 mm	186	182	180	188	184
25 mm	176	174	170	168	172

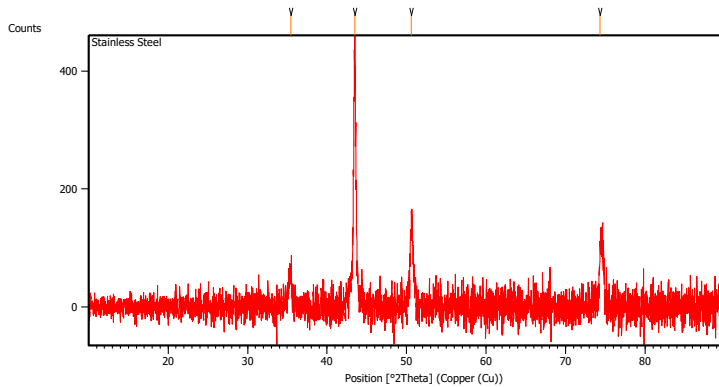
### c. Daerah *Final Crack*

Jarak Dari Permukaan Patahan	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3	Pengujian 4	Rata-Rata
2 mm	224	218	220	226	222
10 mm	212	214	208	206	210

15 mm	190	198	196	192	194
20 mm	186	178	180	184	182
25 mm	170	174	173	171	172

## 6. Hasil Pengujian XRD

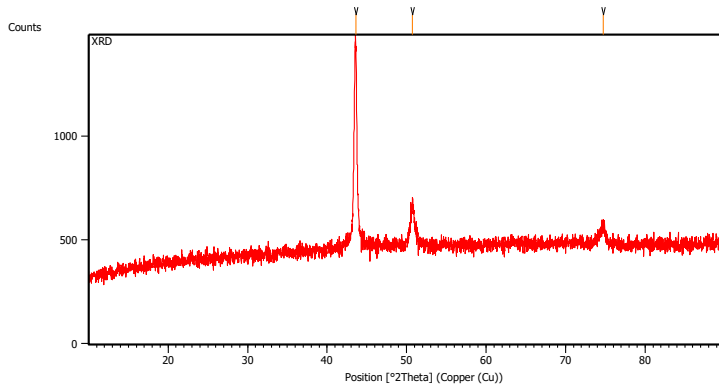
### a. Daerah Dekat dari Patahan



### Peak List

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
35.4144	60.43	0.3346	2.53470	14.94
43.6432	926.13	0.1004	2.07399	100.00
50.7314	195.37	0.2676	1.79960	21.09
74.7575	80.89	0.6691	1.26991	8.73

## b. Daerah Jauh dari Patahan



### *Peak List*

Pos. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
43.4905	404.54	0.2342	2.08091	100.00
50.6119	137.57	0.3346	1.80357	34.01
74.3628	101.32	0.5353	1.27567	25.05

### 7. Analisa Komposisi Senyawa

Analisa komposisi senyawa dari hasil XRD dengan menggunakan aplikasi HighScore.

Senyawa	Peak $2\theta$	Reference Code
Fe-C (Austenit)	43,473	00-023-0298
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	35,452	00-003-0863
FeCl <sub>2</sub>	35,308	00-001-1106

### 8. Perhitungan Regangan Mikrostruktur

#### a. Daerah Jauh dari Patahan

$$FWHM = 0,1004 \ 2\theta$$

$$\text{Position} = 43,6432 \ 2\theta$$

$$\beta_{(2\theta)} = FWHM \times \frac{\pi}{180}$$

$$\beta_{(2\theta)} = 0,1004 \times \frac{\pi}{180}$$

$$\beta_{(2\theta)} = 1,7523 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\varepsilon = \frac{\beta_{(2\theta)}}{4} \times \frac{\cos\theta}{\sin\theta}$$

$$\varepsilon = \frac{1,7523 \times 10^{-3} \text{ rad}}{4} \times \frac{\cos 21,821}{\sin 21,821}$$

$$\varepsilon = 1,06 \times 10^{-3}$$

#### b. Daerah Dekat dari Patahan

$$FWHM = 0,2342 \ 2\theta$$

$$\text{Position} = 43,4905 \ 2\theta$$

$$\beta_{(2\theta)} = FWHM \times \frac{\pi}{180}$$

$$\beta_{(2\theta)} = 0,2342 \times \frac{\pi}{180}$$



$$\begin{aligned}\beta_{(2\theta)} &= 4,0875 \times 10^{-3} \text{ rad} \\ \varepsilon &= \frac{\beta_{(2\theta)}}{4} \times \frac{\cos\theta}{\sin\theta} \\ \varepsilon &= \frac{4,0875 \times 10^{-3} \text{ rad}}{4} \times \frac{\cos 21,745}{\sin 21,745} \\ \varepsilon &= 2.56 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

## 9. Perhitungan Tegangan Sisa

### a. Daerah Jauh dari Patahan

Modulus Elastisitas *Stainless Steel* 316 = 193 GPa =  
193000 MPa

$$\begin{aligned}\sigma &= E \times \varepsilon \\ &= 193000 \times 1,06 \times 10^{-3} \\ &= 204,58 \text{ MPa}\end{aligned}$$

### b. Daerah Dekat dari Patahan

$$\begin{aligned}\sigma &= E \times \varepsilon \\ &= 193000 \times 2,56 \times 10^{-3} \\ &= 494,08 \text{ MPa}\end{aligned}$$

## 10. Perhitungan Beban Torsi

P = 354 kW

N = 295 rpm = 4,92 rps

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi \times N}$$

$$T = \frac{354000}{2\pi \times 4,92}$$

$$T = 11451,39225 \text{ N.m}$$

## 11. Perhitungan Tegangan Axial

$$\sigma_a = \frac{F}{A}$$

$$F = \text{massa} \times g$$

$$\sigma_a = \frac{2447,52 \times 9,8}{5,4767}$$

$$\sigma_a = 4379,589 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_a = 4,379 \text{ MPa (normal stress)}$$

## 12. Perhitungan Tegangan Principal

i. Pada permukaan luar *shaft*

Perhitungan *torsional stress/torsional shear stress*

$$D = 18 \text{ cm}$$

$$J = \frac{\pi}{32r^4}$$

$$\tau_{xy} = \frac{T \times r}{j}$$

$$\tau_{xy} = \frac{11451,39225 \times 0,09}{\frac{\pi}{32} \times 0,09^4}$$

$$\tau_{xy} = 160004010,4 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_{xy} = 160,004 \text{ MPa}$$

*Combined Maximum Shear Stress*

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{4379,589}{2}\right)^2 + 160004010,4^2}$$

$$R = 160004010,5 \text{ N/m}^2$$

$$R = 160,004 \text{ MPa}$$

$$R = \tau_{max}$$

Combined Stress

$$\sigma = \frac{\sigma_a}{2} \pm \tau$$

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = \frac{\sigma_a}{2} + \tau$$

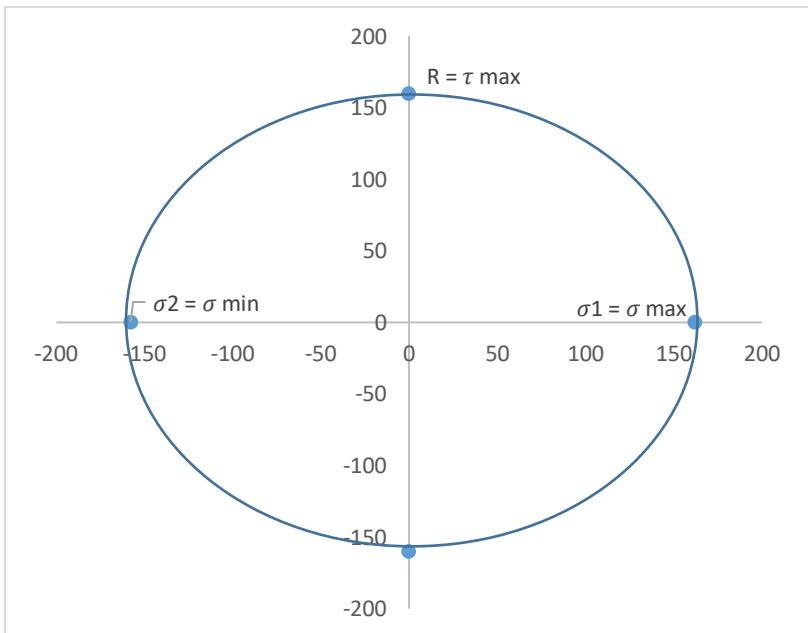
$$\sigma_1 = \sigma_{max} = \frac{4,379}{2} + 160,004$$

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = 162,1935 \text{ MPa (Tensile)}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = \frac{\sigma_a}{2} - \tau$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = \frac{4,379}{2} - 160,004$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = -157,8145 \text{ MPa (Compressive)}$$



---

**14. Perhitungan *Pitting Resistant Equivalent Number*  
(PREN)**

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3(\% \text{Mo}) + 30(\% \text{N})$$

$$\text{PREN} = 16,7 + (3,3 \times 2,33) + (30 \times 0,0718)$$

$$\text{PREN} = 26,643$$

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dengan penuh rasa hikmat ingin menyampaikan rasa terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada: Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya.

1. Orang Tua dan Kakak yang telah mendukung secara moril maupun material serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan, keselamatan dan kelancaran dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
2. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang melancarkan Tugas Akhir penulis baik secara langsung maupun tidak langsung.
3. Bapak Akhidin, selaku pembimbing di perusahaan yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Tim U60 (Taufiq, Fauzi, Hanif) yang memberikan banyak dukungan moril kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir
5. Rizky Indah Permatasari yang memberikan dukungan dan selalu mendengarkan keluh kesah penulis selama menulis Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman *executive board* AIESEC in Surabaya 2018 yang telah memberikan banyak dukungan secara moril kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
7. Teman-teman penghuni lab material inovatif dan manufaktur yang selalu terbuka dan memberikan penulis tempat untuk menulis Tugas Akhir.
8. Teman-teman *suicide squad* (Razkan, Zaid, Ifthar) yang selalu mendukung dan membantu dalam melancarkan Tugas Akhir ini.
9. Bapak Basuki dan Mba Iis yang membantu melancarkan dalam pengujian-pengujian Tugas Akhir ini.
10. Bapak Khairul Anam (dosen teknik mesin Universitas Brawijaya) yang membantu dalam pengujian SEM dalam Tugas Akhir ini

- 
11. Seluruh mahasiswa Teknik Material serta keluarga MT17 yang penulis sayangi, yang telah menemani dan memberikan banyak pengalaman berharga selama jenjang perkuliahan ini.
  12. Seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan.

## BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis adalah **Brian Hariman Triantoro** tetapi teman-teman biasa memanggil dengan nama Obi. Penulis lahir di Bekasi pada tanggal 23 Juni 1997. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDI Al-Azhar 08 Kembangan, SMPN 111 Jakarta, dan SMAN 78 Jakarta. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Material

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama di perkuliahan penulis aktif di organisasi himpunan dan AIESEC in Surabaya. Penulis aktif di himpunan sebagai staff kesejahteraan mahasiswa. Di AIESEC penulis aktif di departemen *Talent Management* mulai dari *Staff Talent Development*, *Manager Talent Development*, dan *Vice President Talent Management*. Selain menjadi pengurus aktif AIESEC, penulis pernah mengikuti kegiatan sosial dari AIESEC yang bertemakan lingkungan dengan nama *Earth Heroes*. Penulis juga pernah menjadi Asisten Laboratorium Kimia Material selama 2 periode pada tahun ajaran 2016/2017 dan 2017/2018.

Penulis memiliki kerja praktek di 2 tempat yaitu PT. Medco E&P Indonesia di Jakarta pada bagian *Chemical and Corrosion Engineer* dan PT. GMF Aero Asia pada bagian NDT inspektor.

Tugas akhir yang diambil penulis dalam bidang Korosi dan Analisa kegagalan berjudul “Analisa Kegagalan Pada Shaft Mesin Circulating Water Pump Pada Pembangkit Listrik Pt. X”  
Email: [obibrian1997@gmail.com](mailto:obibrian1997@gmail.com)

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*