

**Analisis kegagalan pada poros *hot well pump* menggunakan
metode *root cause failure analysis* (RCFA)
di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi**

*Failure analysis of hot well pump shaft
using root cause failure analysis (RCFA) method
at a Geothermal Power Plant*

SKRIPSI

Oleh:

Nama: Reka Ridhatama Akbar

NPM: 233030095



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN FAKULTAS
TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN BANDUNG
2026**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Reka Ridhatama Akbar
Nomor Pokok Mahasiswa : 233030095
Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Dalam Skripsi yang saya kerjakan ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan/ditulis oleh orang lain guna memperoleh gelar dari suatu perguruan tinggi,
2. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu/dikutip/disitasi dalam naskah ini dan disebutkan dalam referensi.
3. Naskah laporan skripsi yang ditulis bukan dilakukan secara *copy paste* dari karya orang lain dan mengganti beberapa kata yang tidak perlu.
4. Naskah laporan skripsi bukanlah hasil plagiarisme.

Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 12 Maret 2026

Penulis,



Reka Ridhatama Akbar

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan, saya:

N a m a: Reka Ridhatama Akbar
NPM: 233030095
Program Studi: Teknik Mesin FT UNPAS
Jenis Karya: Skripsi

Menyatakan bahwa sebagai pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, saya menyetujui memberikan kepada Universitas Pasundan Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Analisis kegagalan pada poros *hot well pump* menggunakan metode *root cause failure analysis* (RCFA) di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi”

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pakalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandung, 12 Maret 2026

Yang menyatakan,



Reka Ridhatama Akbar

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Analisis Kegagalan Pada Poros Hot Well Pump Menggunakan Metode *Root Cause Failure Analysis (RCFA)* Di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi



**Nama: Reka Ridhatama Akbar
NPM: 233030095**

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

Pembimbing Pendamping



Ir. Bukti Tarigan, M.T.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Analisis Kegagalan Pada Poros Hot Well Pump Menggunakan Metode *Root Cause Failure Analysis (RCFA)* Di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi



Nama: Reka Ridhatama Akbar
NPM: 233030095

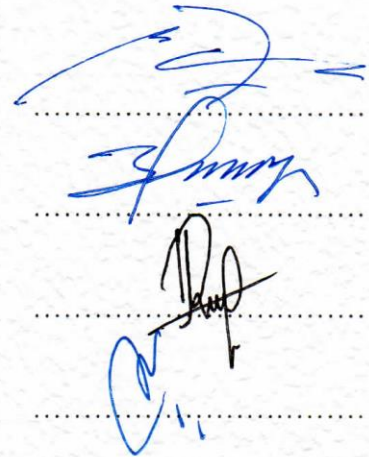
Tanggal sidang skripsi: 12 Maret 2026

Ketua : Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

Sekretaris : Ir. Bukti Tarigan, M.T.

Anggota : M. Reza Hermawan, S.T., M.T.

Anggota : Dr. Ir. Sugiharto, M. T.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan pada yang Maha Kuasa, Allah SWT, sebagai pencipta atas segala kehidupan yang senantiasa memberkan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul “Analisis kegagalan pada poros *hot well pump* menggunakan metode *root cause failure analysis* (RCFA) di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi”. Adapun tujuan dari penulisan skripsi ini yaitu, untuk memenuhi syarat meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan.


Dalam penyusunan laporan skripsi ini penulis menyampaikan terima kasih atas bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak, serta dukungan dari orang tua, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan skripsi ini. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada Allah SWT, yang senantiasa memberikan rahmat, karunia, serta kekuatan dan kesabaran dalam menyusun laporan skripsi. Kedua orang tua yang telah memberikan kesempatan untuk melanjutkan Pendidikan pada jenjang selanjutnya dan selalu mendukung disetiap proses. Bapak Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T. Selaku Pembimbing Utama yang telah memberikan nasehat dan meluangkan waktu untuk membimbing penulis. Bapak Ir. Bukti Tarigan, M.T. Selaku Pembimbing Pendamping yang telah memberikan waktu dan bimbingan serta ilmu yang sangat membantu penulis dalam pembuatan laporan skripsi ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan selama penelitian dan penulisan skripsi. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat diharapkan untuk laporan ini agar dapat dijadikan evaluasi dan pembelajaran dikemudian hari.

Akhir kata dan tidak lupa saya mengucapkan alhamdulillah, saya berharap semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis, pada khususnya dan umumnya bagi semua pihak yang membaca. Terima kasih.

Bandung, 12 Maret 2026

Penulis,



Reka Ridhatama Akbar

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN.....	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR GAMBAR.....	IX
DAFTAR TABEL.....	XI
ABSTRAK.....	XII
ABSTRACT	XIII
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar Belakang.....	1
2. Rumusan Masalah.....	2
3. Tujuan Penelitian	2
4. Manfaat Penelitian	2
5. Batasan Masalah	2
6. Sistematika Penulisan.....	3
BAB II STUDI LITERATUR.....	4
1. Penelitian Terdahulu.....	4
2. <i>Main Cooling Water System (MCWS)</i>	5
3. <i>Hot Well Pump (HWP)</i>	5
4. Poros.....	6
5. Baja Tahan Karat (<i>Stainless Steel</i>)	7
6. Baja Tahan Karat Austenitik (<i>Austenitic Stainless Steel</i>)	8

7. Kegagalan	9
8. Kegagalan Akibat Fatigue.....	9
9. <i>Root Cause Failure Analysis</i> (RCFA)	13
BAB III METODOLOGI	14
1. Metodologi Penelitian	14
2. Tahapan Penelitian	15
3. Jadwal Kegiatan Penelitian.....	16
4. Material	17
5. Peralatan dan Bahan yang digunakan.....	17
A. Alat.....	17
B. Bahan.....	18
6. Tahapan Penelitian	18
A. Pengambilan Data Dan Komponen	18
B. <i>Visual Examination</i> (Makroskopik dan Steromikroskop).....	18
C. Preparasi Spesimen.....	19
D. Pengujian Kekerasan	19
E. Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	19
F. Pengujian <i>Optical Emission Spectroscopy</i> (OES).....	19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	20
1. Data Hasil Pengujian Poros	20
A. Data Operasional.....	20
B. Hasil Pengamatan Makro.....	21
C. Hasil Pengamatan Stereomikroskop.....	22
D. Hasil Pengujian Komposisi Material Poros	23
E. Hasil Pengamatan <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	24
F. Hasil Pengamatan Metalografi.....	29
G. Hasil Pengujian Kekerasan	30

2. Simulasi Shaft	32
A. Tegangan Geser	32
B. Deformasi	33
C. Regangan	34
3. Pembahasan Penelitian	34
A. Penerapan Metode <i>Root Cause Failure Analysis</i> (RCFA)	34
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	42
1. Kesimpulan	42
2. Saran	42
DAFTAR PUSTAKA	43
LAMPIRAN	45
1. Mekanisme Kegagalan	45
2. Mechanical Drawing Shaft HWP	46
3. Perhitungan Teoritis Shaft	47
4. Perhitungan Standard Deviasi, Uncertainty, Relative Standard Deviation (RSD)	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Komponen Utama MCWS [3]	5
Gambar 2. Hot Well Pump [4]	6
Gambar 3. Mechanical Drawing HWP [4]	7
Gambar 4. Kelompok Klasifikasi Stainless Steel [6]	8
Gambar 5. Beachmark dan striasi [10]	10
Gambar 6. Tahapan kegagalan patah lelah[13]	11
Gambar 7. Skema Pola Patahan [10]	12
Gambar 8. S-N Diagram Stainless Steel 316 [14]	13
Gambar 9. Diagram Alir Penelitian	14
Gambar 10. Penampang Patahan Poros HWP	17
Gambar 11. Patahan Poros HWP	17
Gambar 12. Pengamatan Makro pada permukaan patahan poros HWP	21
Gambar 13. Skematik Fatigue Fracture [10]	22
Gambar 14. Stereomikroskopik pada daerah initial crack	23
Gambar 15. Fraktografi SEM Bagian Initial Crack	24
Gambar 16. SEM Bagian Initial Crack terdapat Multiple Crack 1 Pada Titik A	26
Gambar 17. SEM Bagian Initial Crack terdapat Multiple Crack 2 Pada Titik A	26
Gambar 18. SEM Bagian Initial Crack terdapat Crack dan Micro Crack	27
Gambar 19. SEM Bagian Initial Crack terdapat Multiple Crack Pada Titik B	27
Gambar 20. SEM Bagian Initial Crack terdapat Crack dan Striation Pada Titik B	28
Gambar 21. SEM Bagian Initial Crack terdapat Dimples Pada Titik B	28
Gambar 22 Hasil Metalografi	29
Gambar 23. Hasil Metalografi pada initial crack	29
Gambar 24. Titik Uji kekerasan	30
Gambar 25. Simulasi Tegangan Geser	32
Gambar 26. Simulasi Deformation	33
Gambar 27. Simulasi Regangan	34
Gambar 28. Trend Pressure Discharge, Ampere, dan Flow to CT dari Pompa HWP	35
Gambar 29. Trend Vibrasi Pompa HWP	36
Gambar 30. Mind Map hal-hal yang berpengaruh pada permasalahan	36
Gambar 31. Performance Curve Pompa HWP [4]	38

Gambar 32. Fishbone Diagram Kegagalan Patah Pada *Shaft* Pompa40



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Chemical Composition of SUS316L [7]	9
Tabel 2. Rancangan Jadwal Penelitian	16
Tabel 3. Spesifikasi HWP [4].....	20
Tabel 4. Perbandingan Uji komposisi shaft dengan AISI 316L	23
Tabel 5. Distribusi Kekerasan Poros	30
Tabel 6 Tabel Deviasi Homogenitas Material.....	31
Tabel 7. Verifikasi Sub cause dengan aktual di lapangan.....	37
Tabel 8 5-whys Analysis HWP Trip.....	39



ABSTRAK

Mesin Hot Well Pump (HWP) adalah mesin yang digunakan untuk memompakan kondensat hasil proses kondensasi di *main condenser* menuju *cooling tower*. *Shaft* merupakan bagian dari mesin HWP yang digunakan untuk menyalurkan gaya dari mesin motor ke *impeller* pompa. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis faktor penyebab, mekanisme kegagalan, serta solusi yang tepat pada kegagalan *shaft* HWP. Beberapa pengujian dilakukan sebagai pendukung analisis ini. Pengujian tersebut antara lain yakni pengujian kekerasan, pengujian makro, pengujian komposisi, pengujian metalografi, dan SEM serta dilakukan simulasi menggunakan *software solidworks*. Hasil uji makro diperoleh lokasi *initial crack*, *propagation crack*, serta *final crack*. Hasil pengujian komposisi menunjukkan material *shaft* yaitu *stainless steel 316L*. Pengujian SEM dilakukan untuk memahami dan analisis lebih dalam di daerah *initial crack*. Simulasi *shaft* menggunakan *software solidworks* untuk mengetahui tahanan geser, deformasi, dan regangan yang kemudian dibandingkan dengan perhitungan teoritis *shaft*. Setelah dilakukan pengujian diperoleh faktor pemicu kegagalan tersebut yakni kegagalan akibat *fatigue* karena pompa yang dioperasikan melebihi batas POR dan mendekati batas AOR sehingga *shaft* mengalami beban siklik yang mengakibatkan *shaft* tidak mampu menahan tegangan yang terjadi. Maka pompa tidak dapat dioperasikan dalam waktu yang lebih lama.

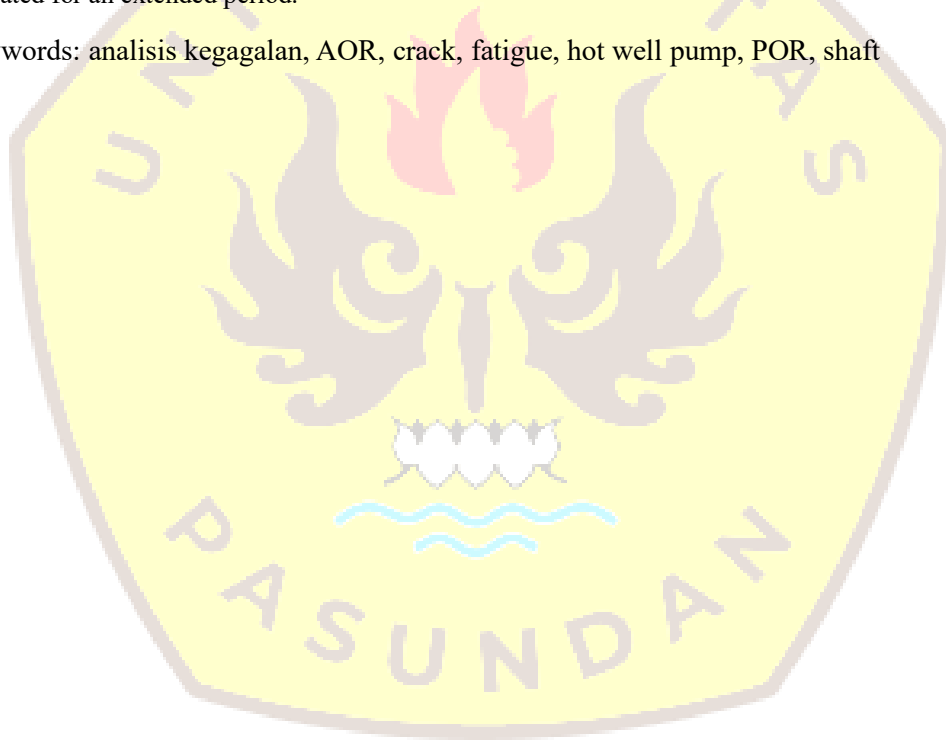
Kata kunci: analisis kegagalan, AOR, crack, fatigue, hot well pump, POR, shaft



ABSTRACT

The Hot Well Pump (HWP) is a machine used to pump condensate produced from the condensation process in the main condenser to the cooling tower. The shaft is a critical component of the HWP, functioning to transmit power from the motor to the pump impeller. This study aims to analyze the root causes, failure mechanisms, and appropriate solutions related to the failure of the HWP shaft. Several tests were conducted to support this analysis, including hardness testing, macro examination, chemical composition analysis, metallographic testing, and scanning electron microscopy (SEM). In addition, simulations were performed using SolidWorks software. The macro examination identified the locations of the initial crack, crack propagation, and final fracture. The chemical composition test confirmed that the shaft material is stainless steel 316L. SEM analysis was carried out to provide a more detailed understanding of the initial crack region. Shaft simulations using SolidWorks were conducted to determine shear stress, deformation, and strain, which were then compared with theoretical shaft calculations. The results indicate that the failure was primarily caused by fatigue due to pump operation beyond the Preferred Operating Range (POR) and approaching the Allowable Operating Range (AOR). This condition subjected the shaft to cyclic loading, leading to its inability to withstand the induced stresses. Consequently, the pump cannot be operated for an extended period.

Keywords: analisis kegagalan, AOR, crack, fatigue, hot well pump, POR, shaft



BAB I PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) merupakan pembangkit listrik yang dihasilkan dari energi panas bumi yang dikenal juga dengan nama “*geothermal*”. Pemanfaatan sumber panas bumi yaitu dengan cara menggali sumur hingga kedalaman mencapai titik panas bumi sehingga terciptanya uap air (*steam*) yang secara langsung disalurkan lewat pipa-pipa untuk memutarakan turbin yang sudah terhubung dengan generator. Dalam proses produksi di PLTP, salah satu proses utama dalam pengoperasian *geothermal power plant* (GPP) yaitu *Main Cooling Water System* (MCWS) yang terdiri dari *main condenser*, *hotwell pump*, dan *cooling tower*. MCWS merupakan suatu sistem proses produksi PLTP dengan tujuan selaku pendingin utama melalui proses mensirkulasikan kondensat dari *steam* ke kondensor langsung ke arah *cooling tower* menggunakan *hot well pump* untuk proses pendinginan dan dikembalikan ke *main condenser* untuk melanjutkan proses pengkondensasian

Hot Well Pump (HWP) fungsinya sebagai pemompa air kondensat yang bersumber dari *main condenser* kemudian mengalirkan ke *cooling tower* untuk mengubah kondensat menjadi air pendingin yang digunakan kembali di *main condenser* sebagai air pendingin pada proses kondensasi di dalam *main condenser*. Penggunaan hot well pump sangat penting karena hot well pump dipasang dengan spesifikasi 2 sets 50% sehingga jika ada kegagalan dari salah satu HWP maka akan terjadi penurunan kapasitas listrik yang dihasilkan karena proses pendinginan yang tidak bisa mendukung proses produksi *full load* atau terjadi gangguan mati total (*shutdown*).

Pada tanggal 10 Oktober 2023 terjadi kegalalan salah satu *hot well pump* pada bagian poros (*shaft*) yang teridentifikasi dari vibrasi yang melonjak tinggi kemudian hot well pump trip. Maka dari itu, tujuan penelitian ini dibuat adalah guna mengidentifikasi dan menganalisis dalam mencari akar masalah (*root cause*) dan menentukan mitigasi untuk mencegah terjadinya kegagalan berulang melalui penggunaan metode *Root Cause Failure Analysis* (RCFA).

2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, berikut rumusan permasalahan dari penelitiannya ini yaitu sebagai berikut:

1. Apa faktor-faktor yang menjadi penyebab terjadinya kegagalan material *shaft* pada pompa *hot well pump* pada PLTP?
2. Bagaimana mekanisme dan *root cause* pada kegagalan material *shaft* pada pompa *hot well pump* di PLTP?
3. Bagaimana solusi pencegahan terjadinya kegagalan serupa di masa depan?

3. Tujuan

Terdapat tujuan dari penelitian ini yaitu berikut ini:

1. Menganalisis faktor penyebab terjadinya kegagalan material *shaft* pada pompa *hot well pump* untuk PLTP.
2. Menganalisis dan mencari *root cause* kegagalan material *shaft* pada pompa *hot well pump* di PLTP.
3. Menentukan mitigasi untuk mencegah terjadinya kegagalan berulang.

4. Manfaat

Manfaat yang didapat dari hasil penelitiannya ini yakni berikut ini:

1. Menyediakan data teknis dan analisis ilmiah sebagai referensi dalam analisis kegagalan *shaft* pada pompa.
2. Memberikan solusi praktis dalam mencegah kegagalan pada poros *hot well pump*.
3. Meningkatkan efektivitas kerja di lingkungan perembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP).

5. Batasan Masalah

Berikut batasan permasalahan dari penelitiannya ini yaitu berikut ini:

1. Desain *shaft* pada mesin *hot well pump* memenuhi standard operasional PLTP.

6. Sistematika Penulisan

Laporan penelitian ini mencakup empat bab, isi dari tiap bab yakni:

BAB I PENDAHULUAN

Bab I berisi perihal latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II STUDI LITERATUR

Bab II berisi mengenai kumpulan penelitian dari berbagai penelitian yang termuat di jurnal yang terverifikasikan dan berisikan mengenai informasi-informasi yang berkaitan dengan analisis kegagalan pada *shaft* pompa di Pembangkit Listrik.

BAB III METODOLOGI

Bab III berisi mengenai tahapan penelitian secara sistematis, metode pengujian, metode simulasi, serta metode pengolahan data dan analisis.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab IV berisi tentang data hasil perhitungan, simulasi, dan pengujian laboratorium yang telah dilakukan. Pada bab ini dilakukan analisis dengan metode *root cause failure analysis* (RCFA) dengan menggunakan pendekatan *5-whys analysis*, dan *fishbone diagram* guna mendukung dalam menentukan *root cause*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab V berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada bab sebelumnya, yang menjawab tujuan serta rumusan masalah penelitian. Selain itu, disampaikan juga saran-saran yang dapat dijadikan acuan dalam pengembangan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi sumber-sumber referensi yang digunakan dalam penelitian ini, baik berupa buku, teks, standar, jurnal ilmiah, maupun dokumen teknis lainnya yang mendukung teori dan analisis yang dilakukan.

LAMPIRAN

Lampiran berisi data atau informasi pendukung yang digunakan dalam penelitian namun tidak dimasukkan ke dalam bab utama karena bersifat terlalu rinci atau sebagai pelengkap.

BAB II STUDI LITERATUR

1. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu dapat membantu dan mempermudah peneliti dalam melakukan penelitian, berguna untuk menjadi bahan rujukan dan pedoman dalam melakukan penelitiannya ini. Berikut penelitian yang dianggap penulis relevan dengan judul penelitian ini.

1. Brian Harian Triantoro (2019), dalam penelitiannya yang berjudul "*Analisa Kegagalan Pada Shaft Mesin Circulating Water Pump (CWP) di Pembangkit Listrik PT. X*", melakukan kajian guna mengidentifikasi faktor penyebab dan mekanisme kegagalan pada poros (*shaft*) mesin CWP. Penelitian ini melibatkan sejumlah pengujian, diantaranya pengujian makroskopik, analisis komposisi kimia, SEM, X-Ray Diffraction (XRD), pengujian kekerasan, dan metalografi. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, diketahui bahwa kegagalan poros disebabkan oleh beban yang tinggi, yaitu sebesar 162,19 MPa, yang memicu terjadinya kegagalan akibat kelelahan material (*fatigue*). Selain itu, keberadaan produk korosi berupa FeCl_2 dan Fe_3O_4 turut mempercepat proses degradasi material poros.[1]
2. Angga Setiawan (2016), dalam penelitiannya yang berjudul "*Analisa Kegagalan Poros Pompa Centrifugal Multistage (GA101A) Sub-Unit Sintesa – Urea PT. Petrokimia Gresik*", melakukan kajian terhadap kegagalan yang terjadi pada poros pompa GA101A, yang ditandai dengan terjadinya patahan (*shaft fracture*). Analisis dilakukan melalui observasi makroskopis terhadap pola patahan, pemodelan geometri menggunakan perangkat lunak CAD, serta analisis ekspansi termal melalui penggunaan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Berdasarkan hasil evaluasi, diketahui bahwa patahnya poros disebabkan oleh getaran berlebihan pada pompa yang memicu kenaikan suhu pada komponen ring hingga melebihi batas temperatur operasional. Ketika suhu mencapai sekitar 200°C, terjadi peningkatan gaya gesek antar komponen, bahkan berdasarkan analisis spektrum warna pada permukaan poros, suhunya diperkirakan hingga pada capaian kisaran 1227°C sebelum kegagalan terjadi. Peningkatan suhu akibat gesekan tersebut menyebabkan ekspansi termal pada poros dan ring, sehingga ring menjadi terkunci pada poros dan akhirnya menyebabkan patahan. Sebagai tindakan preventif,

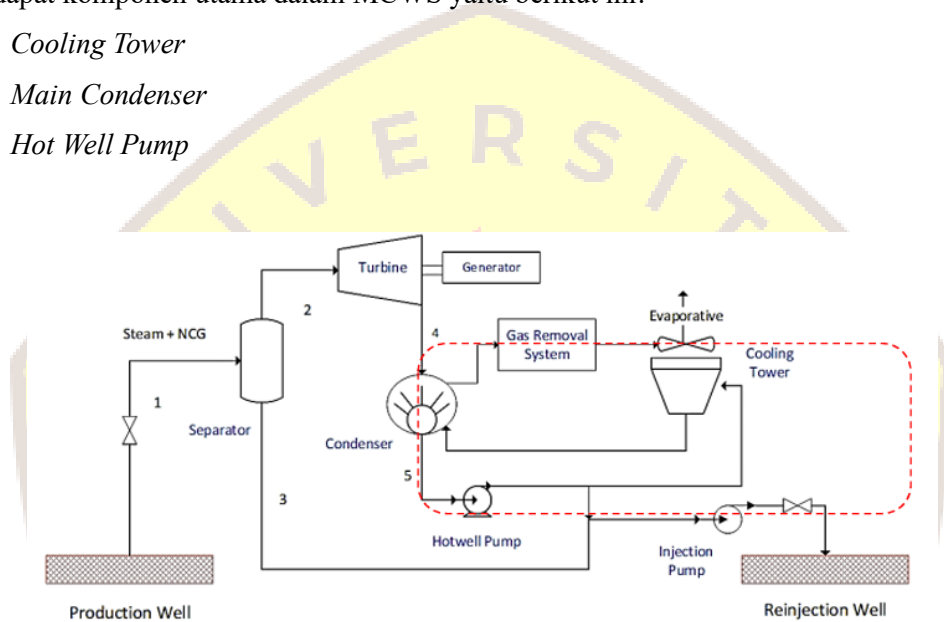
disarankan untuk memperbesar jarak bebas (clearance) antara poros dan ring sebesar 0,40 mm apabila tetap menggunakan material *stainless steel* 304.[2]

2. Main Cooling Water System (MCWS)

MCWS merupakan sistem pada PLTP yang tujuannya selaku pendingin utama melalui proses mensirkulasi air pendingin dari *main condenser* ke arah *cooling tower* untuk mendinginkan dan dikembalikan ke *main condenser* untuk melanjutkan proses pengkondensasian. Komponen utama MCWS dapat dilihat pada Gambar 1.

Terdapat komponen utama dalam MCWS yaitu berikut ini:

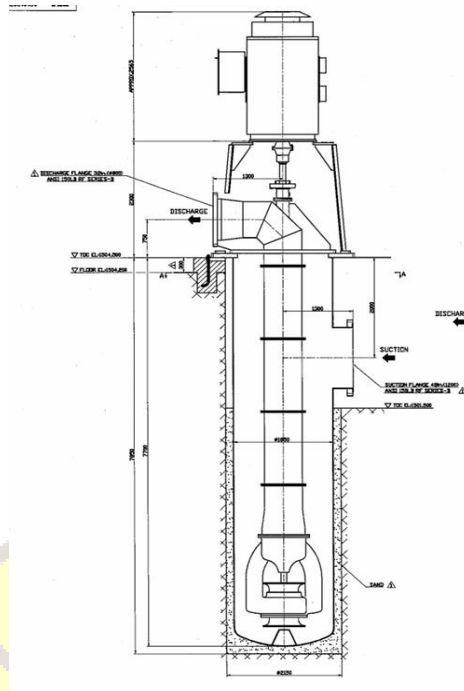
1. *Cooling Tower*
2. *Main Condenser*
3. *Hot Well Pump*



Gambar 1. Komponen Utama MCWS [3]

3. Hot Well Pump (HWP)

HWP yaitu sebuah pompa yang difungsikan untuk mempompa air kondensat yang berasal dari *main condenser* untuk mengalirkannya ke *cooling tower*. Gambar teknik HWP dapat dilihat pada Gambar 2.



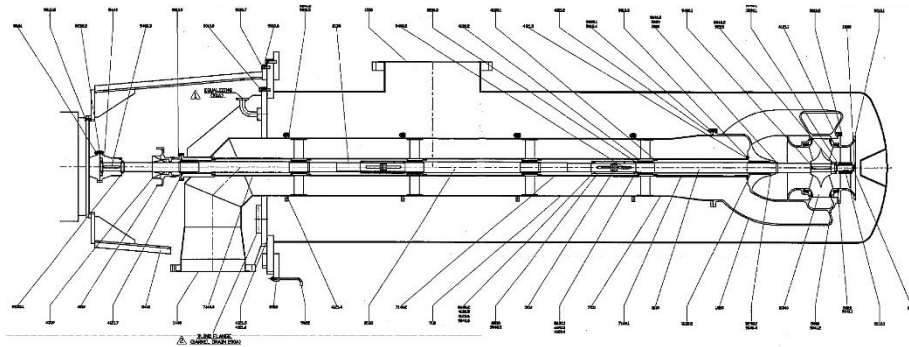
Gambar 2. Hot Well Pump [4]

4. Poros

Poros pada pompa merupakan komponen yang berfungsi untuk mentransmisikan daya berupa torsi dan putaran dari komponen satu ke komponen lain pada sebuah sistem.

Pada mesin *hot well pump* (HWP), poros termasuk komponen utama yang beroperasi secara langsung bersama media fluida berupa kondensat. Media pendingin dan pelindung (*mechanic seal*) berupa kondensat yang telah didinginkan melalui *cooling tower* yang kemudian dipompakan oleh pompa *auxiliary cooling water system*. Selama pompa beroperasi, poros mengalami penurunan kinerja akibat mekanisme degradasi, baik secara mekanis maupun kimiawi. Salah satu bentuk degradasi kimia adalah korosi, yang apabila terjadi bersamaan dengan pembebanan berulang, dapat menyebabkan kegagalan melalui mekanisme *corrosion fatigue*. Fenomena ini secara signifikan menyebabkan propagasi retak dengan cepat sehingga mempercepat terjadinya kegagalan lelah (*fatigue fracture*) pada poros.

Dalam kondisi operasi normal, poros akan mengalami pembebanan berulang yang dapat menyebabkan kegagalan pada waktu tertentu akibat kelelahan material (*fatigue failure*). Proses kegagalan pada poros diawali dengan inisiasi retak mikro (*crack initiation*), yang selanjutnya mengalami propagasi menjadi retak perambatan (*crack propagation*) hingga mencapai ukuran kritis dan menyebabkan fraktur atau patahan secara tiba-tiba. Mechanical Drawing HWP dapat dilihat pada Gambar 3.

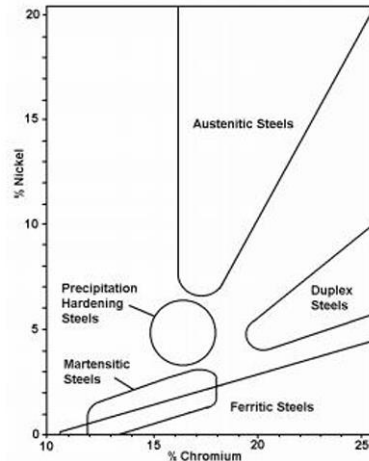


Gambar 3. Mechanical Drawing HWP [4]

5. Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Baja Besi-Kromium, dengan kemungkinan penambahan nikel dan molibdenum, serta yang dikombinasikan dengan berkadar karbon rendah, diklasifikasikan sebagai “baja tahan karat (*stainless steel*)” apabila memiliki kandungan minimal 12% kromium (Cr). Kandungan kromium tersebut berfungsi untuk membentuk lapisan pasif oksida kromium pada permukaan logam. Lapisan pasif inilah yang memberikan ketahanan korosi tinggi pada baja tahan karat. Ketahanan ini semakin ditingkatkan dengan adanya unsur paduan tambahan seperti nikel (Ni) dan molybdenum (Mo) yang memperkuat struktur mikro.[5]

Secara umum, baja tahan karat dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok utama berdasarkan fasa dominan dalam struktur mikronya, yaitu *austenitic*, *ferritic*, dan *martensitic*. *Austenitic stainless steel* biasanya mengandung 17% - 18% Cr dan 8-11% Ni. *Ferritic stainless steel* umumnya memiliki kandungan 10,5% - 18% Cr serta berkadar nikel rendah bahkan tidak mengandung nikel sama sekali dan *Martensitic stainless steel* mengandung 11,5 – 18 % Cr. Pengelompokkan *stainless steel* berdasarkan fasanya diperlihatkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Kelompok Klasifikasi Stainless Steel [6]

6. Baja Tahan Karat Austenitik (*Austenitic Stainless Steel*)

Baja tahan karat austenitik termasuk kelompok terbesar dalam keluarga baja tahan karat, baik dari segi jumlah paduan maupun penggunaannya. Seperti halnya baja feritik, jenis baja ini bersifat lunak atau tidak keras meski diberi perlakuan panas. Namun, kesamaan tersebut hanya terbatas pada aspek tersebut.

Baja tahan karat austenitik umumnya memiliki sifat nonmagnetik berkeadaan anil (annealed) serta hanya dapat mengalami pengerasan melalui proses pengerjaan dingin (cold working). Jenis baja ini umumnya bersifat kriogenik yang sangat baik, serta daya kuat dan daya tahan dari oksidasi yang unggul pada suhu tinggi.

Kandungan kromium (Cr) pada baja tahan karat austenitik umumnya berkisar antara 16 hingga 26%, kandungan nikel (Ni) tidak lebih dari 35%, dan kandungan mangan (Mn) tidak lebih dari 15%.

Baja seri 200 umumnya mengandung nitrogen, mangan antara 4 hingga 15%, serta nikel dengan kadar lebih rendah, yaitu hingga sekitar 7%. Sementara itu, baja seri 300 memiliki kandungan nikel yang lebih tinggi dan mangan hingga sekitar 2%.

Selain itu, unsur-unsur paduan lainnya antara lain Niobium (Nb), Titanium (Ti), Aluminium (Al), Silikon (Si), Tembaga (Cu), dan Molibdenum (Mo) dapat ditambah untuk memberikan sifat-sifat tertentu, seperti ketahanan terhadap korosi akibat halida atau ketahanan terhadap oksidasi. [5]

Material poros yang digunakan pada *hot well pump* merupakan *stainless steel* seri 300 yaitu SUS316L. SUS316L merupakan *austenitic stainless steel*. Komposisi kimia pada SUS316L dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Chemical Composition of SUS316L [7]

Element	SUS316L
Carbon	≤0.03%
Mangan	≤2.00%
Silicon	≤0.75%
Phosphorus	≤0.045%
Sulfur	≤0.03%
Nickel	10.00-14.00%
Chromium	16.00-18.00%
Molybdenum	2.00-3.00%

7. Kegagalan

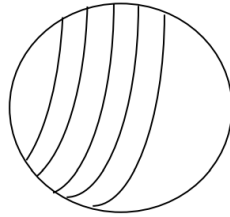
Kegagalan merupakan sebuah ketidakmampuan material atau komponen untuk menjalankan fungsinya sesuai dengan tujuannya. Dinyatakan gagal sebuah komponen jika terjadinya penurunan unjuk kerja pada komponen tersebut. Contohnya efisiensi pompa yang menurun, dimana debit mengalami penurunan meski masih beroperasinya pompa tersebut.[8]

Kegagalan komponen tersebut sebab terdapat bagian yang rusak seperti bocor, retak, patah, dan lainnya maka operasinya akan distop. Dan kegagalan material tidak dapat dihindarkan tetapi hanya dikontrol supaya umur pakai masih digunakan sebelum waktu desain atau perancangan alat tersebut selesai atau diistilahkan dengan *life service* yang baik.[9][10]

8. Kegagalan Akibat Fatigue

Kegagalan akibat fatigue atau Lelah termasuk jenis modus kegagalan yang kerap kali terjadi di dunia permesinan. Dari literatur yang ada, berkisar 70% pada aplikasi teknik mesin mengalami gagal sebab dipengaruhi oleh fatigue. Terjadinya fatigue ini karena adanya beban bolak balik atau beban berulang. Contohnya torsi bolak balik, tarik tekan, lentur bolak balik, dan lainnya. Gagal akibat *fatigue* ini bilamana terjadi retak atau patah yang dicirikan melalui tiga tahapan yakni awal mula retak, perambatan retak, lalu patahan akhir. Awal retak bermula dari diskontinuitas material atau cacat logam maka dapat menjadi penyebab konsentrasi tegangan terjadi. Diskontinuitas material contohnya blowholes, undercut, pori, lubang, dan lainnya. Tingginya tegangan di daerah sekitar cacat yang

menyebabkan awal mula retaknya muncul. Lalu merambatnya retakan tersebut yang dicirikan yaitu terdapatnya striasi, beachmark, atau garis Pantai ataupun juga diistilahkan sebagai patah Lelah. Sedikit yang membedakan dari beachmark yaitu bisa melihat dengan kasat mata retaknya, sementara striasi hanya dapat dipandang melalui *scanning electron microscope* (SEM). Gambaran beachmark dan striasi sebagaimana yang diperlihatkan dalam Gambar 5.[11][12]



Gambar 5. Beachmark dan striasi [13]

Terjadinya striasi atau beachmark disebabkan oleh adanya ratio tegangan (R) dan tegangan nominal yang terjadi tipe pembebanan. Beachmark dapat dipandang oleh kasat mata dan terlihat lebih teratur bilamana ratio tegangan maksimum sebanding dengan tegangan minimum, atau dinyatakan untuk ratio tegangan $R = -1$. Relatif kecilnya tegangan nominal akan memperlihatkan luasan beachmark yang lebih beda dengan kegagalannya akibat beban yang berlebih. Bila terjadi kondisi elastis kegagalannya itu akibat dari fatigue atau beban Lelah. Tetapi beban yang relative kecil diimbangi dengan siklus beban bolak balik, maka dapat membahayakan bila di kondisi ini. Gagal akibat Lelah tidak berindikasi lebih awal seperti beban lebih, mesti diawali dari adanya pengecilan necking atau penampang. Maka tanpa terketahui sudah terjadi patahan. Contohnya poros roda patah, patahan pegas spiral pada pengatur katub ruang bakar, dan lainnya.

Patahan akibat fatigue dipicu karena beban elastis tidak berindikasi perubahan bentuk nyata yang bisa terlihat oleh kasat mata, ini disebabkan gagal akibat fatigue nyaris tidak memperlihatkan regangan yang berubah seperti perubahan Panjang atau lainnya. Maka karenanya kegagalan ini tidak berindikasi adanya peringatan sebelumnya, misal ada yang berubah bentuk atau necking, dan lainnya. Maka hal tersebut bisa membuat bahaya.

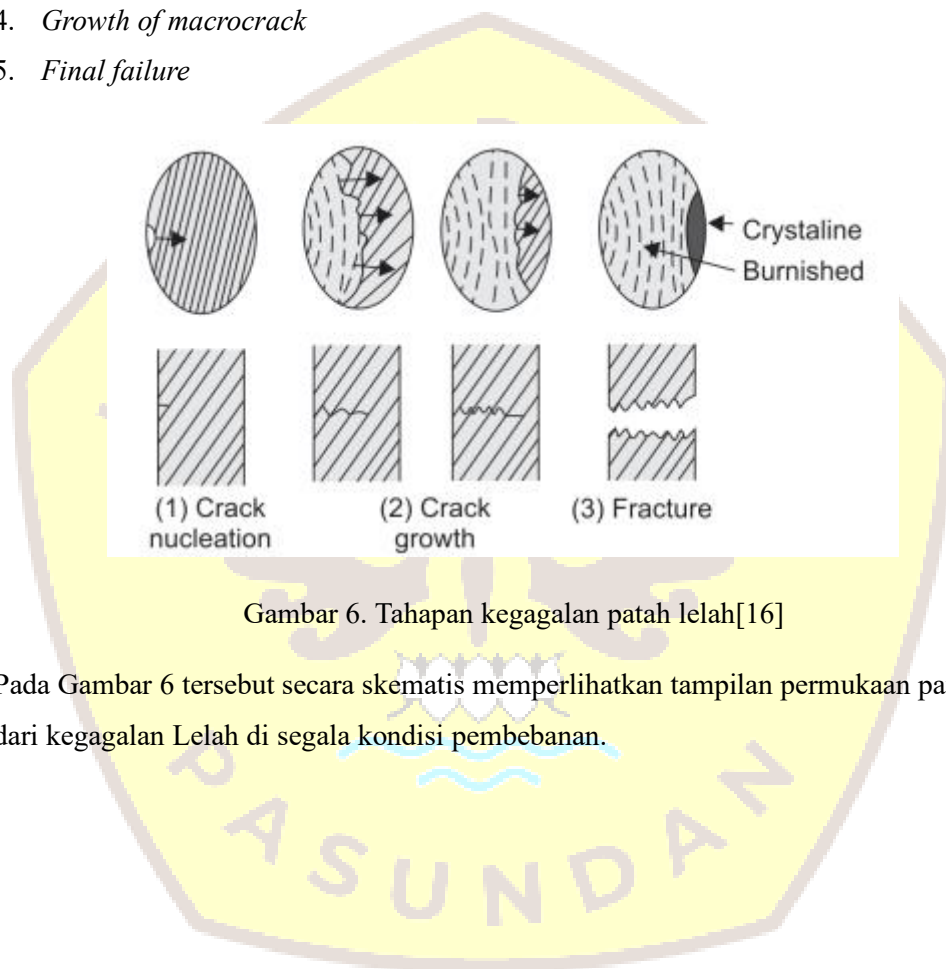
Permukaan patah pada gagalnya fatigue terbagi atas dua zone yakni zone pertama permukaan patah statik dengan terdapatnya deformasi plastis atau permukaan yang tidak rata, atau zone kedua yaitu permukaan patah hampir mirip seperti patah getas tapi lebih mengkilap. [14], [15]

Fatigue adalah structural yang mengalami perubahan dengan sifat permanen, progresif, dan local yang muncul pada material yang terima beban berulang dan fluktuasi yang memiliki nilai kurang dari yield point atau nilai maksimum. Beban Lelah dapat terjadi

pembentukan akumulasi retak yang berujung pada sebuah material menjadi patah. Kelelahan sebagai akibatnya dari adanya perpaduan dari regangan plastis, tegangan putar, dan tegangan tarik. Bilamana dari Ketiga kombinasi ada salah satunya yang tidak ada, maka tidak akan terjadinya patahan. Tahapan kegagalan patah lelah dapat dilihat pada Gambar 6.

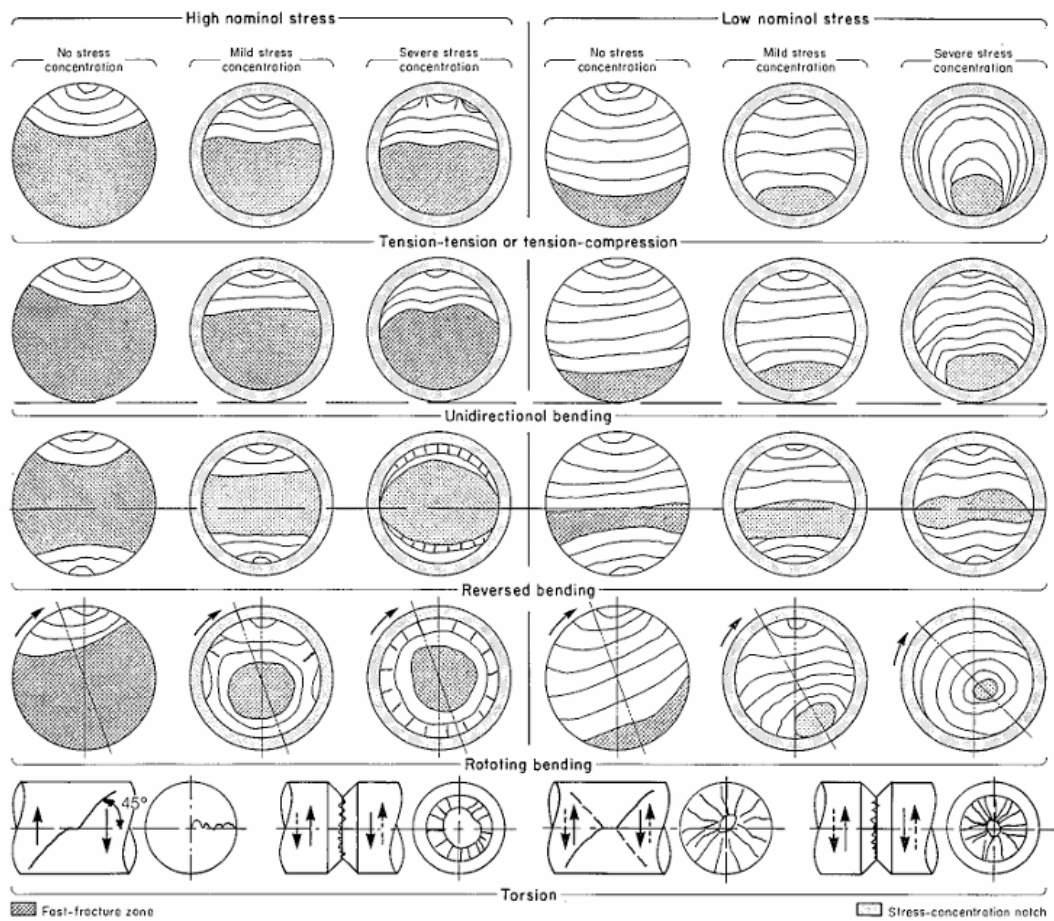
Terjadinya patah lelah melalui 5 tahapan:

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



Gambar 6. Tahapan kegagalan patah lelah[16]

Pada Gambar 6 tersebut secara skematis memperlihatkan tampilan permukaan patahan dari kegagalan Lelah di segala kondisi pembebanan.

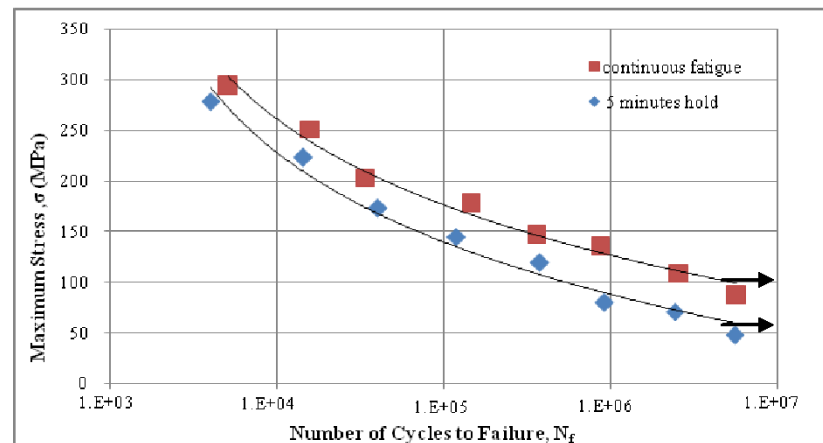


Gambar 7. Skema Pola Patahan [13]

Patah lelah dicirikan ke dalam dua macam, yakni:

1. Karakteristik mikro. Ini termasuk ciri-ciri kelelahan yang hanya bisa dilihat melalui penggunaan mikroskop.
2. Karakteristik makro. Ini termasuk ciri-ciri Lelah yang bisa dipandang secara visual (kaca pembesar atau mata telanjang).

Patah lelah bisa diprediksikan melalui penggunaan diagram S-N diagram untuk S-N diagram Stainless Steel 316 yaitu sebagaimana seperti gambar Gambar 8.



Gambar 8. S-N Diagram Stainless Steel 316 [17]

9. Root Cause Failure Analysis (RCFA)

RCFA adalah suatu kajian guna menganalisis pemicu atau sebab kegagalan suatu sistem dan menggunakan informasi tersebut untuk menentukan langkah preventif atau *corrective*. Metode RCFA merupakan salah satu konsep atau metode yang dirancang untuk memberikan langkah kerja yang efektif untuk menyelesaikan masalah atau kegagalan pada komponen, sistem, maupun proses. Dengan metode ini, kegagalan dapat diidentifikasi dengan cara mencari penyebab utama terjadinya kegagalan.[15]

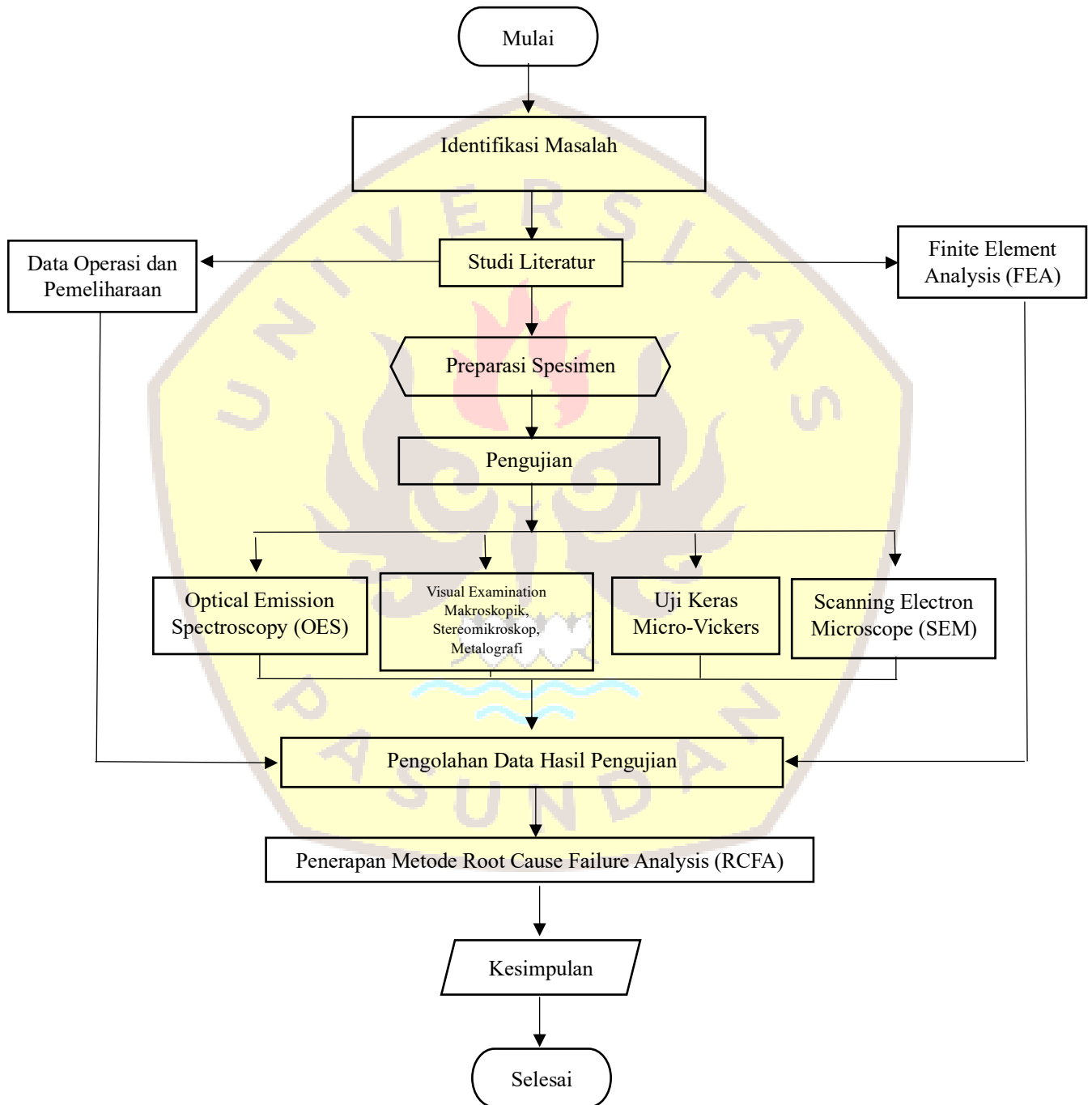
Metodologi yang digunakan untuk melakukan *root cause failure analysis* (RCFA) sebagai berikut:

1. Menentukan permasalahan yang ada
Menentukan pernyataan masalah yang jelas dan terukur, termasuk waktu kejadian, kondisi mesin saat itu, dan gejala yang muncul
2. Mengumpulkan data terkait
Melibatkan pencatatan wawancara teknisi/operator, dan hasil pengujian teknis
3. Mengidentifikasi hal-hal yang berpengaruh pada permasalahan
Mengidentifikasi semua kemungkinan penyebab kegagalan, baik dari sisi manusia, peralatan, prosedur, maupun lingkungan kerja.
4. Menemukan akar penyebab masalah
Menggunakan metode analisis seperti 5-Why untuk menemukan penyebab utama.
5. Membuat/mengembangkan rekomendasi solusi
Mengembangkan tindakan korektif yang menargetkan akar penyebab, bukan hanya memperbaiki akibat. Termasuk perbaikan teknis, procedural, atau pelatihan[18]

BAB III METODOLOGI

1. Metodologi Penelitian

Penelitiannya ini dijalankan berdasar pada alur yang diperlihatkan dalam Gambar 9 berikut ini:



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian

2. Tahapan Penelitian

Berikut merupakan penjelasan untuk diagram alir metodologi penelitian yaitu berikut ini:

1. Identifikasi Masalah

Tahap identifikasi permasalahan dijalankan melalui pengumpulan informasi mengenai kegagalan yang muncul pada komponennya tersebut melalui kegiatan observasi langsung di lapangan. Studi ini dilaksanakan di area PLTP dengan tujuan memperoleh data primer secara langsung di Lokasi kejadian guna menunjang keakuratan analisis.

2. Studi Literatur

Studi literatur bermaksud guna mendapatkan landasan teoritis beserta referensi ilmiah yang relevan sebagai dasar untuk melakukan analisis kegagalan. Literatur yang dijadikan acuan meliputi jurnal ilmiah, laporan penelitian terdahulu, serta buku-buku teknis yang membahas tentang analisis kegagalan, khususnya pada komponen *hot well pump* di PLTP.

3. Preparasi Spesimen

Berdasarkan data awal, ditetapkan dugaan awal mengenai penyebab kegagalan poros dikarenakan pengoperasian alat yang dioperasikan melebihi *normal operating*. Selanjutnya dilakukan pemotongan bagian poros untuk dijadikan spesimen uji. Spesimen disiapkan sesuai standar uji yang akan dilakukan.

4. Visual Examination

Visual Examination dilakukan sebagai langkah awal dalam menganalisis kegagalan pada poros *hot well pump*. Metode ini bertujuan untuk mengidentifikasi kerusakan permukaan retak, deformasi, keausan, atau tanda-tanda kelelahan material dengan cara visual pada patahan secara langsung, pengamatan makro, dan pengamatan stereomikroskop.

5. Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian SEM ini bertujuan mengamati permukaan material, memeriksa kerusakan materialnya, dan menganalisis struktur mikro dari suatu material. Elektron yang dihasilkan difokuskan menggunakan lensa magnetic dan diarahkan pada sampel. Sinyal yang dihasilkan dari interaksi electron dengan sampel dikumpulkan oleh detector khusus untuk menghasilkan gambar.

6. Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Pengujian *OES* yaitu teknik yang memanfaatkan sinar yang dipancarkan oleh atom atau ion dalam sampel yang bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengukur unsur-unsur dan material dan menentukan kadar masing-masing unsur.

7. Uji Keras (*Micro-Vickers*)

Uji keras (*micro-vickers*) bertujuan untuk mengukur kekerasan pada area yang sangat kecil atau skala micro, mengevaluasi homogenitas material, menganalisis perubahan mikrostruktur dan membantu dalam mengidentifikasi penyebab kegagalan.

8. Pengolahan Data Hasil Pengujian

Dalam tahapan ini dilakukannya analisis dan olah data dari hasil pengujian yang telah dijalankan.

9. Penerapan Metode Root Cause Failure Analysis (RCFA)

Pada tahap ini akan dilakukan proses analisis akar penyebab kegagalan menggunakan metode RCFA berdasarkan data-data yang telah diperoleh termasuk data pengujian.

10. Kesimpulan

Pada tahap ini akan diambil kesimpulan dan rekomendasi pada aspek *operation* dan *maintenance* dari *root cause failure analysis* (RCFA) penelitian ini.

3. Jadwal Kegiatan Penelitian

Adapun jadwal yang telah dibuat dari mulai pra penyusunan proposal hingga sidang skripsi yaitu berikut ini:

Tabel 2. Rancangan Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Waktu Penelitian															
		April				May				June				Juli			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Pengajuan Judul	■															
2	Identifikasi Masalah	■	■														
3	Studi Literatur		■	■													
4	Pengumpulan Data				■	■											
5	Inspeksi Lapangan					■	■										
6	Preparasi Sample							■	■	■							
7	Seminar Usulan Penelitian									■							
8	Pengujian Laboratorium									■	■	■					
9	Analisis RCFA												■				
11	Penyusunan Laporan Hasil													■			
12	Seminar Skripsi														■		
13	Seminar Skripsi															■	
14	Sidang Akhir Skripsi																■

4. Material

Tertanggal 10 Oktober 2023 ditemukannya shaft pada hot well pump pada mesin pompa kondensat di pembangkit listrik tenaga panas bumi yang mengalami kegagalan. Patahan Poros HWP dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Penampang Patahan Poros HWP



Gambar 11. Patahan Poros HWP

5. Peralatan dan Bahan yang digunakan

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

A. Alat

Adapun alat yang dipergunakan pada penelitiannya ini:

1. Mesin Grinding

Berguna sebagai pemotong spesimen.

2. Ampelas
Berguna sebagai preparasi pengujian metalografi.
3. Optical Emission Spectroscopy (OES)
Berguna agar dapat memahami komposisi kimia unsur dari spesimen.
4. *Scanning Electron Microscope* (SEM)
Berguna sebagai pengamatan spesimen secara mikroskopik.
5. Alat Uji Keras *Vickers*
Berguna agar dapat memahami nilai kekerasan spesimen.
6. Kamera Digital
Berguna untuk melihat dan mengambil gambar secara makro, dan juga berguna untuk proses pendokumentasian selama penelitian.
7. Penggaris Besi
Berguna sebagai pengukuran dimensi spesimen

B. Bahan

Bahan-bahan yang peneliti gunakan yaitu diantaranya:

1. Kertas Amplas
Berguna dalam preparasi uji metalografi
2. Material patahan *shaft hot well pump* yang akan dilakukan analisis

6. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini disusun guna memahami pemicu sebab kegagalan patah pada *shaft* yang terdiri dari pengambilan data dan komponen, visual examination (makroskopik), preparasi spesimen, pengujian kekerasan, pengujian SEM, dan pengujian OES.

A. Pengambilan Data Dan Komponen

Dilakukannya tahapan ini melalui langsung ke area Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi guna melihat komponen yang gagal. Tahap ini bertujuan guna memperoleh komponen yang terjadi kegagalan dan data-data perusahaan yang sehubungan dengan mesin yang alami gagal.

B. Visual Examination (Makroskopik dan Steromikroskop)

Pengamatan makro secara visual dijalankan guna memahami pola patahan secara visual, bentuk, dan tampilan. Dilakukannya pengamatan ini melalui penggunaan kamera digital yang tujuannya guna pengambilan gambar fotografi dengan kamera

secara keseluruhan dan lebih mendetail di bagian tertentu guna memperoleh informasi dari gambarnya tersebut.[19]

C. Preparasi Spesimen

Tahap persiapan spesimen dibutuhkan sebelum dilakukan pengujian kelanjutan guna menetapkan sebab munculnya kegagalan material di *shaft*. Persiapannya mencakup proses *cutting* dan *sectioning* memakai gerinda potong.

D. Pengujian Kekerasan

Kekerasan sebuah material bisa diartikan sebagai ketahanan material dari gaya penekan material lainnya yang lebih keras. Tujuan pengujian kekerasan ini yaitu guna memahami distribusi kekerasan melalui pelaksanaan indentasi di sejumlah titik di sampel. Daya keras sebuah material ditetapkan dari seberapa dalam area maupun luas area indentasinya.[20]

E. Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Dilakukannya uji SEM yaitu guna memperoleh informasi yang ada dalam permukaan material. Dari uji SEM ini mekanisme kerja dari mesin yaitu terdapat *electron* yang masuk ke dalam material. Lalu dari tembakan *electron* tersebut terdapat yang dibiaskan dan hasil dari pembiasannya tersebut lalu ditampilkan di computer guna dapat melihat hasil dari karakterisasi permukaan materialnya tersebut.[21]

F. Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Pengujian OES ialah pengujian guna memahami kandungan unsur kimia di logam benda uji. Komposisi kimia dari logam sangatlah krusial untuk dipahami sebab komposisi kimia di logam dapat menetapkan sifat dari logamnya. Spectrometer yaitu alat yang mampu menganalisa unsur-unsur logam induk beserta campurannya secara cepat, akurat, serta mudah dioperasikannya.[22]

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Hasil Pengujian Poros

A. Data Operasional

Mesin *hot well pump* (HWP) berguna dalam memompakan kondensat dari *main condenser* ke *cooling tower* di pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan motor sebagai penggerak mesinnya. Dalam kajian ini mesin HWP yang dipakai yaitu mesin yang bermerek Hyundai type HLA7 632-18Y. *Shaft* mendistribusikan daya dari motor ke impeller maka mesinnya dapat difungsikan secara baik yakni pompompaan kondensat ke *cooling tower*.

Putaran *Shaft* ini memiliki kecepatan 590 rpm serta dayanya senilai 400 kW. Berdasarkan datanya tersebut dihasilkan beban torsi senilai 6474.58 Nm. Sebab *shaft* dipasang secara vertikal sehingga diterimanya juga beban aksial pada *shaft* sebagai akibat dari beban dirinya. Berdasar hitungan kedua beban tersebut sehingga dihasilkan tegangan principal oleh *shaft* senilai 28,40 MPa. Spesifikasi HWP diperlihatkan dalam tabel 3.

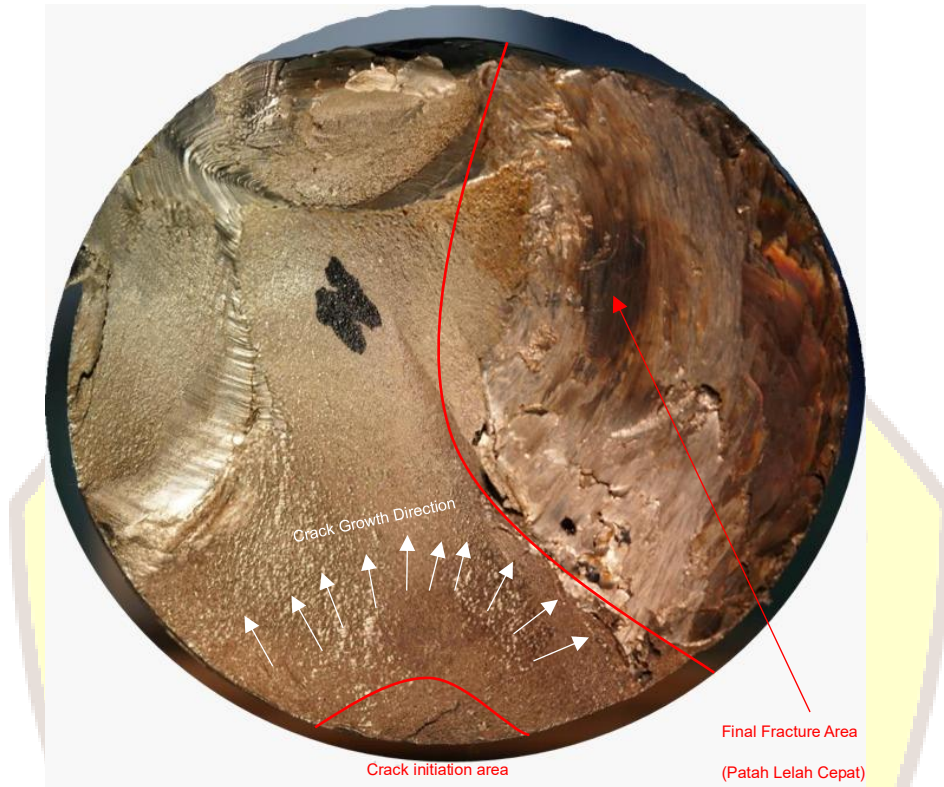
Tabel 3. Spesifikasi HWP [4]

Spesifikasi HWP	
Type & Size	CDKTV 800
Pumped Medium	Geothermal Condensate
Capacity	2 sets x 50%
Design Temperature	Rated 51,7 °C
Rated Head	23 Meter
Rated Speed	590 rpm
Rated Flow	4250 m ³ /h
Motor Manufacture	Hyundai
Motor Type	HLA7 632-18Y
Rated Capacity	400 kW
Rated Voltage	6000 Volt
Phase	3 Phase
Rated Cycles	50 Hz
Insulation Grade	F

B. Hasil Pengamatan Makro

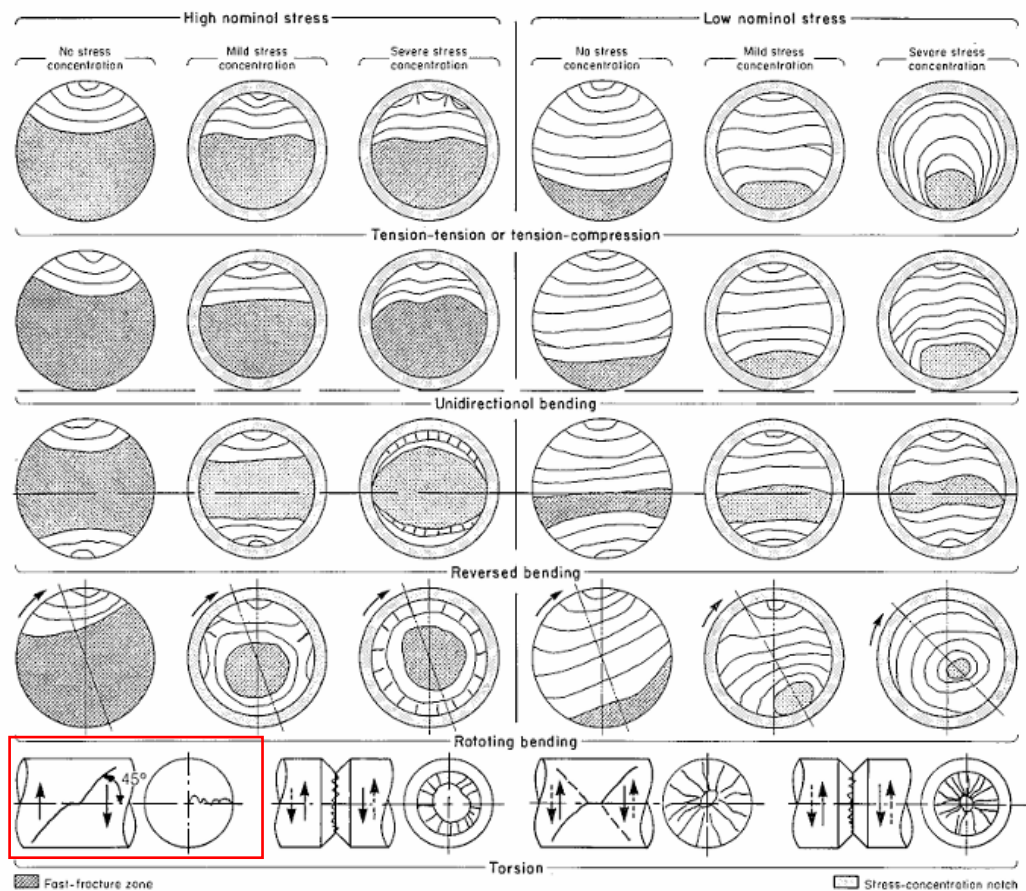
Secara makro pengamatan visual dijalankan melalui penggunaan kamera kamera digital pada permukaan *shaft* yang terjadi gagal.

Rusaknya *shaft* dari mesin *hot well pump* sebagaimana yang disajikan dalam Gambar 12.



Gambar 12. Pengamatan Makro pada permukaan patahan poros HWP

Berdasar hasil observasi makro diperlihatkan *initial crack* terdapat dari permukaan luar poros yang menjalar kebagian dalam terdefiniskan pada *crack growth direction* atau arah perambatan retak. Terdapat juga garis striasi di bagian tengah porosnya yang menunjukkan proses terjadi beban kerja secara berulang. Daerah yang halus merupakan bagian dari daerah patah cepat hingga *final crack*. Skematik pola patahan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Skematik Fatigue Fracture [13]

Berdasarkan skematik *fatigue fracture* dan pengamatan visual pada makroskopik bahwa pola patahan ini menunjukkan *high nominal stress* dan *torsion* dimana siklus *crack growth* per-lapisan sangat sedikit, *beach marks* menjadi jarang atau tidak berbentuk jelas, dan *fracture area* kasar dan lebih banyak zona *overload* sudut bidang patah 45° .

C. Hasil Pengamatan Stereomikroskop

Observasi stereomikroskop dijalankan guna pengambilan gambar lebih mendetail di bagian tertentu dengan penggunaan stereomikroskop. Pengambilan gambar pada titik *initial crack* dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Stereomikroskopik pada daerah initial crack

Dari gambar diatas teramati adanya perubahan bentuk pada area *initial crack* dan teramati arah perambatan patahan dari lokasi *initial crack*.

D. Hasil Pengujian Komposisi Material Poros

Uji komposisi menggunakan OES. Pengujiannya ini dijalankan guna memahami komposisi kimia pada *shaft* dari mesin HWP. Berdasarkan *manual operation and maintenance book* pada *shaft* dari HWP memanfaatkan material *stainless steel* 316L atau SUS 316L (JIS). Dalam tabel 4 menunjukkan perimbangan antara hasil uji komposisi *shaft* terhadap komposisi standar *stainless steel* 316L

Tabel 4. Perbandingan Uji komposisi shaft dengan AISI 316L

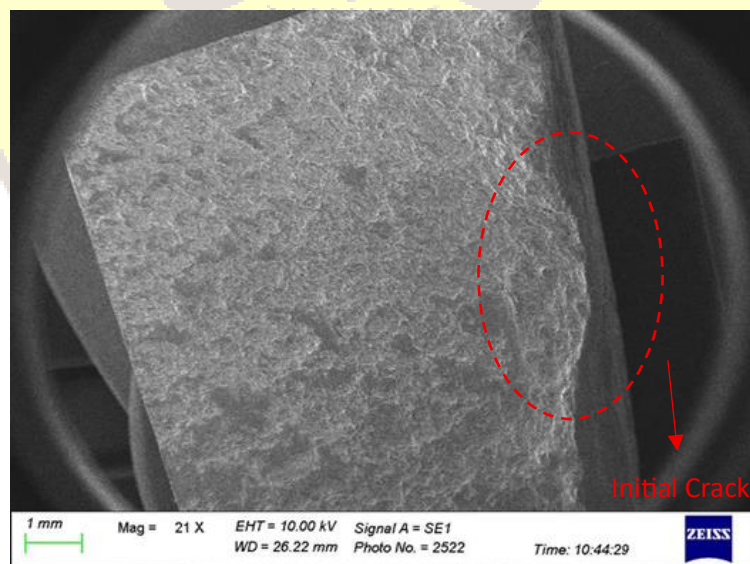
Unsur	Element	Wt. %	
		Shaft	AISI 316L (UNS S31603)
Carbon	C	0,0156	0,030
Silicon	Si	0,356	1,00
Sulfur	S	<0,0010	0,030
Phosphorus	P	0,0357	0,045
Manganese	Mn	1,66	2,00
Nickel	Ni	12,6	10,00 – 14,00
Chromium	Cr	16,8	16,00 - 18,00
Molybdenum	Mo	2,03	2,00 - 3,00

Unsur	Element	Wt. %	
		Shaft	AISI 316L (UNS S31603)
Vanadium	V	0,127	-
Copper	Cu	0,0532	-
Wolfram/Tungsten	W	0,0273	-
Titanium	Ti	0,0019	-
Tin	Sn	<0,0010	-
Alumunium	Al	0,0059	-
Niobium	Nb	0,0557	-
Ferro/Iron	Fe	66,00	-

Berdasarkan hasil analisis kimia menggunakan OES yang bertujuan untuk mengkonfirmasi kesesuaian material *shaft* dengan standard material SS316L bahwa material *shaft* sudah sesuai dengan standar AISI 316L (UNS S31603).

E. Hasil Pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Observasi struktur mikro melalui penggunaan metode SEM ini dijalankan guna sebagai kelengkapan karakterisasi di bagian permukaan material yang terjadi gagal. Permukaan material yang diujikan termasuk komponen *initial crack*.

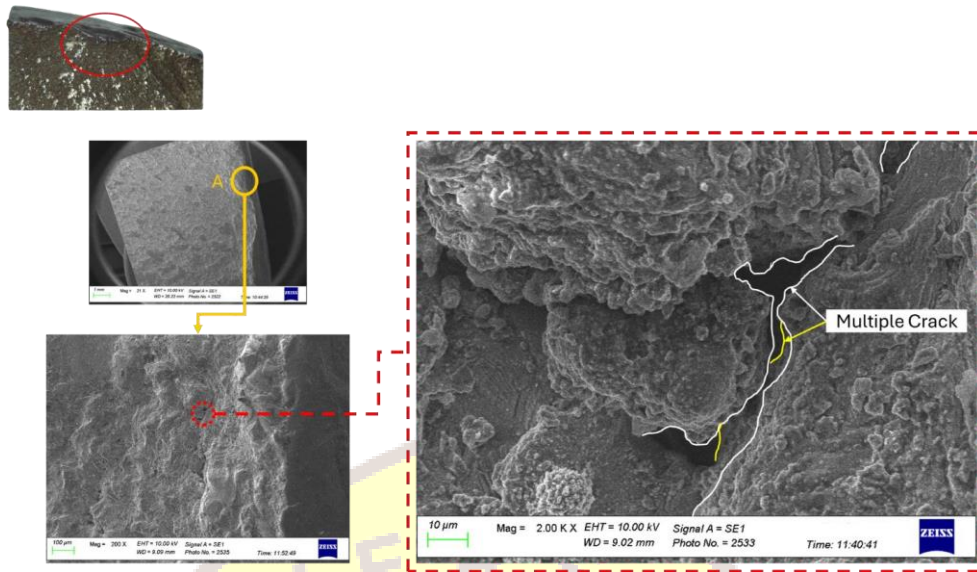


Gambar 15. Fraktografi SEM Bagian Initial Crack

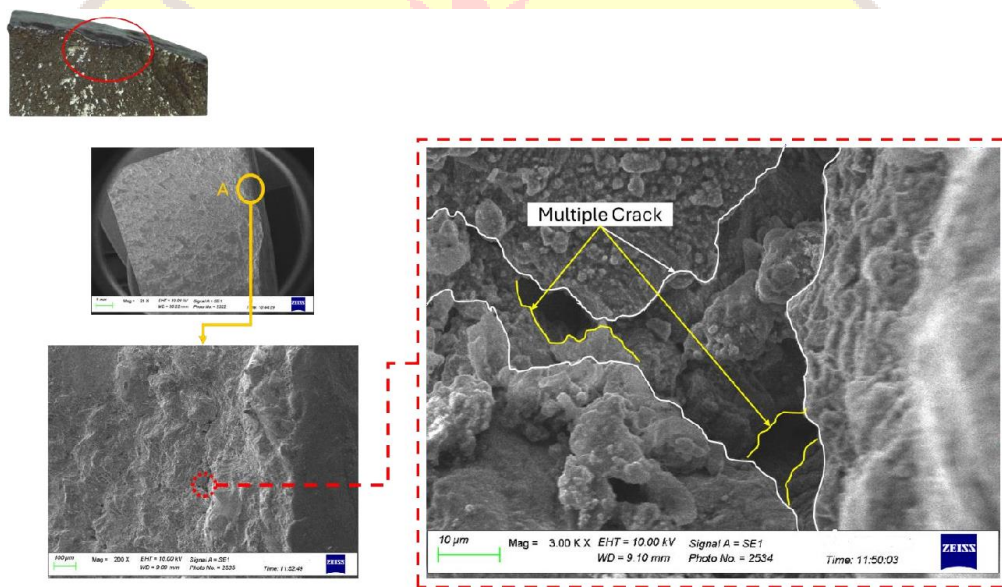
Berdasarkan hasil uji SEM memperlihatkan di bagian *initial crack* adanya retakan yang memperlihatkan awal mula kejadian kegagalan yang terus menjalar serta terbentuk garis perambatan. Di garis perambatan terlihat cenderung searah. Garis perambatan searah menandakan bahwa kegagalan terjadi akibat beban berulang (*fatigue failure*) atau mengalami beban siklik dengan arah tegangan yang relatif tetap. Dikarenakan arah pertumbuhan retak konsisten, dapat disimpulkan bahwa poros bekerja dalam kondisi operasi yang relatif konstan.

Berikut hasil uji SEM lebih mendalam pada titik *intial crack* dan pada bagian deformasi plastis dapat dilihat pada Gambar 16 sampai dengan Gambar 21.

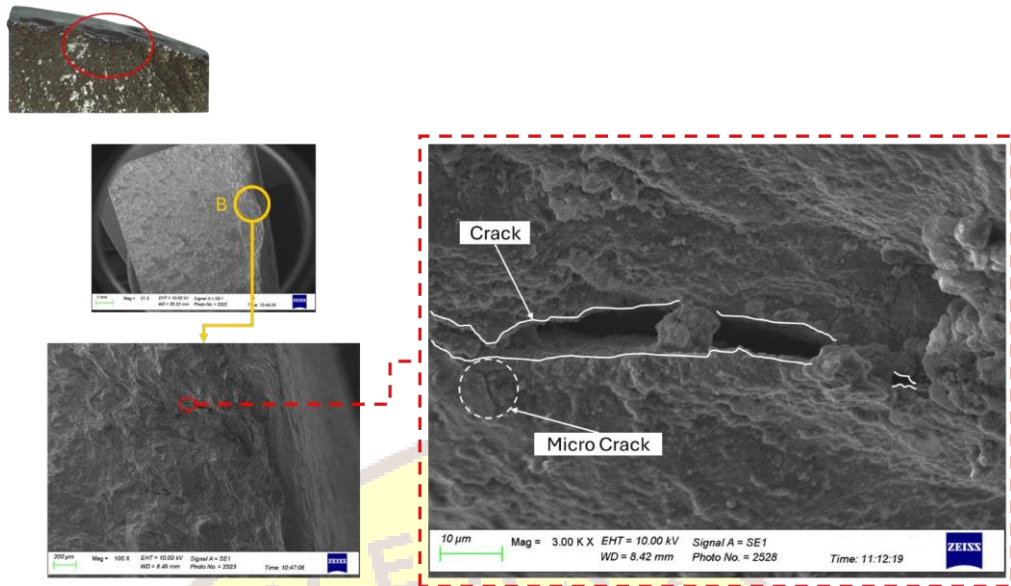




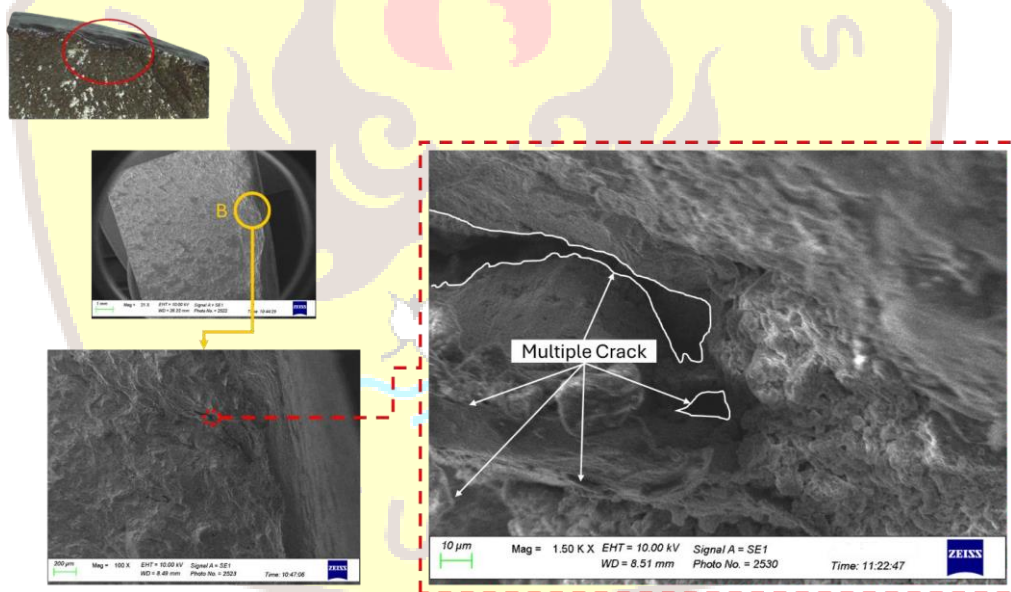
Gambar 16. SEM Bagian Initial Crack terdapat Multiple Crack 1 Pada Titik A



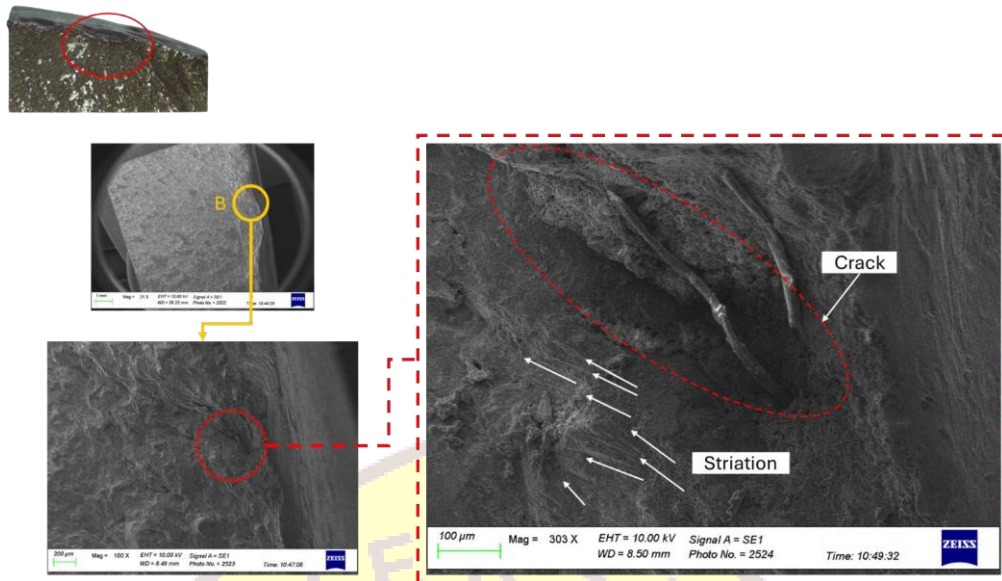
Gambar 17. SEM Bagian Initial Crack terdapat Multiple Crack 2 Pada Titik A



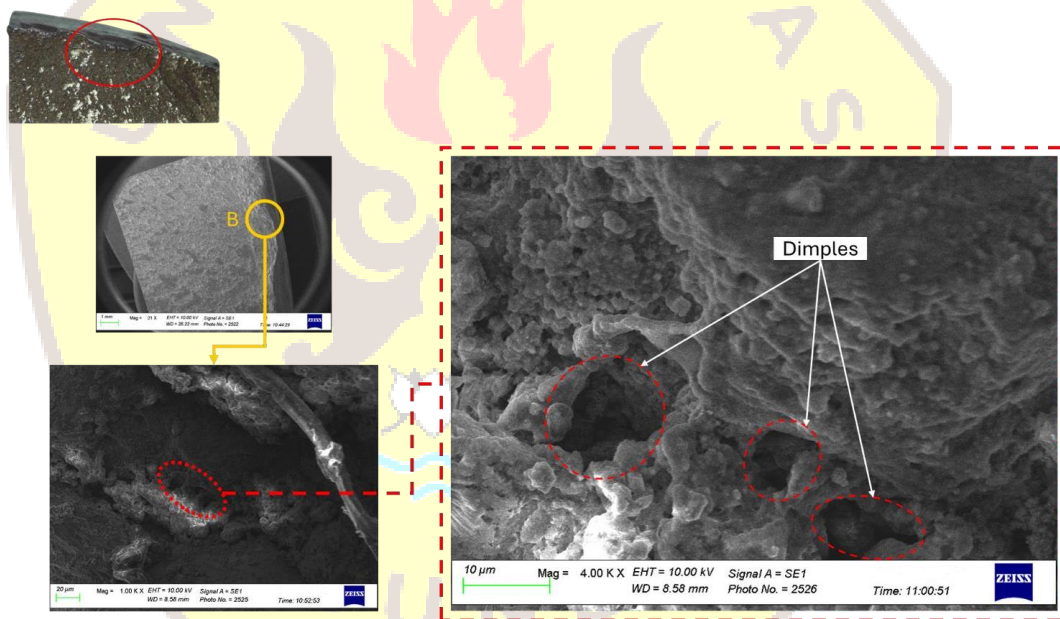
Gambar 18. SEM Bagian Initial Crack terdapat Crack dan Micro Crack



Gambar 19. SEM Bagian Initial Crack terdapat Multiple Crack Pada Titik B



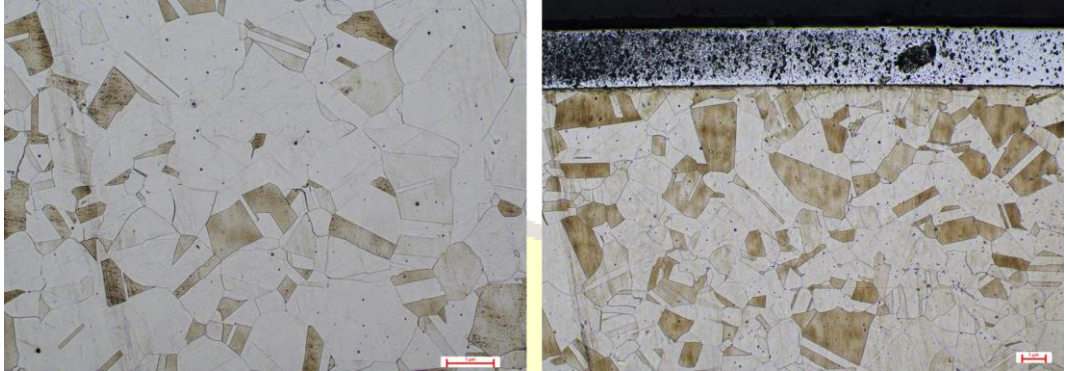
Gambar 20. SEM Bagian Initial Crack terdapat Crack dan Striation Pada Titik B



Gambar 21. SEM Bagian Initial Crack terdapat Dimples Pada Titik B

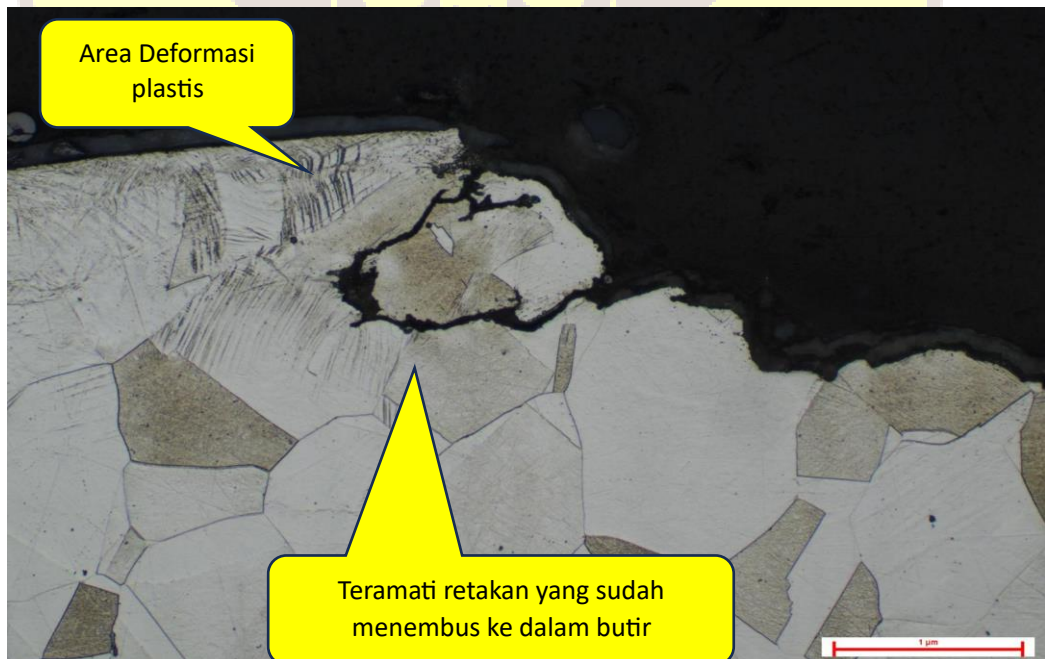
F. Hasil Pengamatan Metalografi

Pengamatan metalografi bertujuan untuk mengidentifikasi struktur mikro dan mendeteksi retak awal. Pengambilan gambar pada bagian area initial crack dan deformasi plastis dapat dilihat pada Gambar 22 dan 23.



Gambar 22 Hasil Metalografi

Hasil metalografi pada material shaft yang jauh dari area patahan mengkonfirmasi kesesuaian komposisi material SS316L yang merupakan austenitic stainless steel, teramati juga adanya lapisan coating pada sisi luar shaft dengan ketebalan +/- 2-3 mikron.

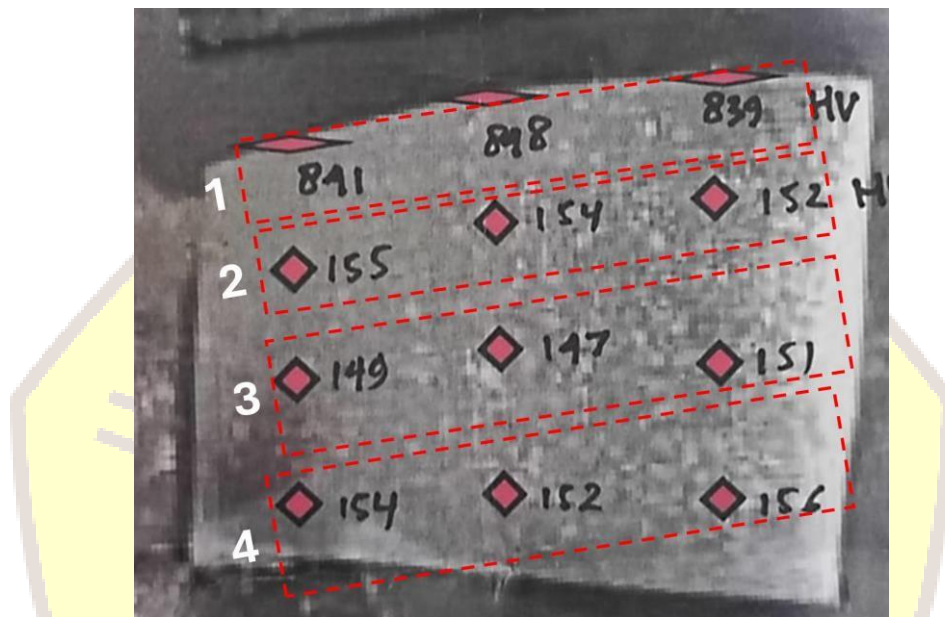


Gambar 23. Hasil Metalografi pada initial crack

Hasil metalografi pada area patahan mengkonfirmasi adanya deformasi plastis pada material yang ditandai dengan teramatinya “slip line”, berupa garis-garis di dalam butir fasa austenite.

G. Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan pada material *shaft* dilakukan untuk mengetahui persebaran nilai kekerasan pada material tersebut.



Gambar 24. Titik Uji kekerasan

Hasil uji kekerasan diperlihatkan dalam tabel 5.

Tabel 5. Distribusi Kekerasan Poros

Location	Area	Actual Measurements Test			Max	Min	Average	
		[HV]						
		1	2	3				
Longitudinal	1	841	848	839	848	839	843	843
	2	155	154	152	155	152	154	
	3	149	147	151	151	147	149	
	4	154	152	156	156	152	154	

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan didapatkan nilai rata-rata kekerasan sampel *shaft* ialah 152 HV, yang mana sesuai dengan nilai kekerasan rata-rata material SS316L. Sedangkan nilai rata-rata kekerasan pada *coating shaft* ialah 843 HV. Dapat disimpulkan bahwa tidak ditemukan adanya anomali sifat mekanik yang menyimpang dari standar.

Tabel 6 Tabel Deviasi Homogenitas Material

Titik	Mean (HV)	SD	RSD (%)	Status
Coating	842.67	4.73	0.56%	Sangat homogen
2	153.67	1.53	1.00%	Sangat homogen
3	149.00	2.00	1.34%	Homogen
4	154.00	2.00	1.30%	Homogen

Berdasarkan hasil uji kekerasan Vickers (HV) pada empat titik pengujian, diperoleh bahwa material menunjukkan tingkat homogenitas yang sangat baik. Dapat dilihat pada Tabel 6. Nilai rata-rata kekerasan pada material dasar (titik 2–4) berada pada rentang 149–154 HV dengan nilai *relative standard deviation* (RSD) berkisar antara 1,00% hingga 1,34%, yang mengindikasikan variasi data yang sangat kecil dan distribusi sifat mekanik yang seragam.

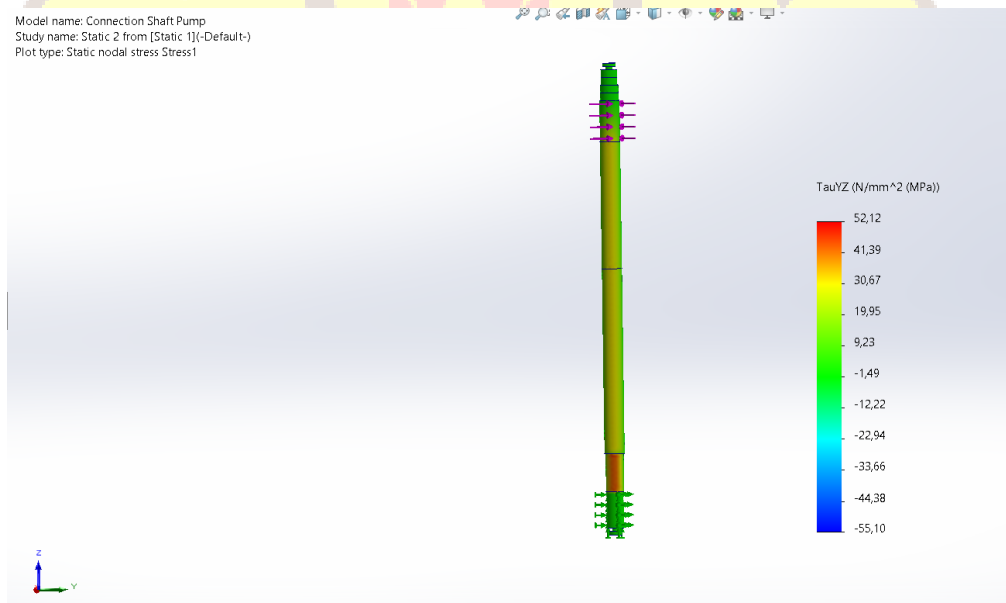
Pada area coating (titik 1), diperoleh rata-rata kekerasan sebesar 842,67 HV dengan RSD sebesar 0,56%, yang menunjukkan konsistensi dan kualitas coating yang sangat tinggi. Perbedaan signifikan antara kekerasan coating dan material dasar menunjukkan bahwa lapisan coating berfungsi efektif dalam meningkatkan ketahanan terhadap keausan. Secara keseluruhan, rendahnya nilai deviasi dan ketidakpastian pengukuran pada seluruh titik uji menegaskan bahwa material memiliki homogenitas yang sangat baik dan memenuhi kriteria kualitas untuk aplikasi operasional berkelanjutan

2. Simulasi Shaft

Simulasi menggunakan aplikasi Solidworks. Simulasi dilakukan pada sebuah dengan beban berupa momen torsi (*breakdown torque*) sebesar 12907.5 N.m pada ujung kiri. Poros ditahan dengan fixed support di ujung kanan dan dilengkapi cylindrical support pada beberapa titik sepanjang poros. FEA menggunakan mesh tetrahedron. Analisis yang dilakukan meliputi tegangan geser, deformasi, dan regangan.

A. Tegangan Geser

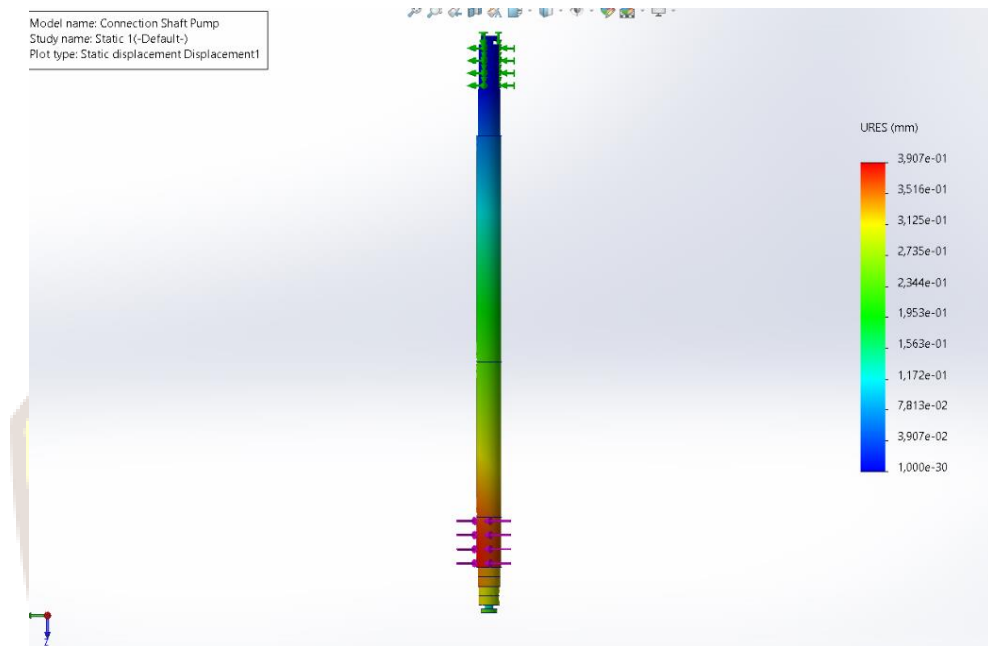
Distribusi tegangan geser (τ_{YZ}) menunjukkan nilai maksimum sekitar 52.12 MPa. Tegangan terdistribusi secara kontinu di sepanjang shaft dengan peningkatan lokal pada area yang mengalami konsentrasi beban dan perubahan penampang. Pola tegangan menunjukkan bahwa shaft menahan beban lateral secara stabil tanpa indikasi konsentrasi tegangan yang ekstrem. Gambar simulasi tegangan geser dapat dilihat pada Gambar 25.



Gambar 25. Simulasi Tegangan Geser

B. Deformasi

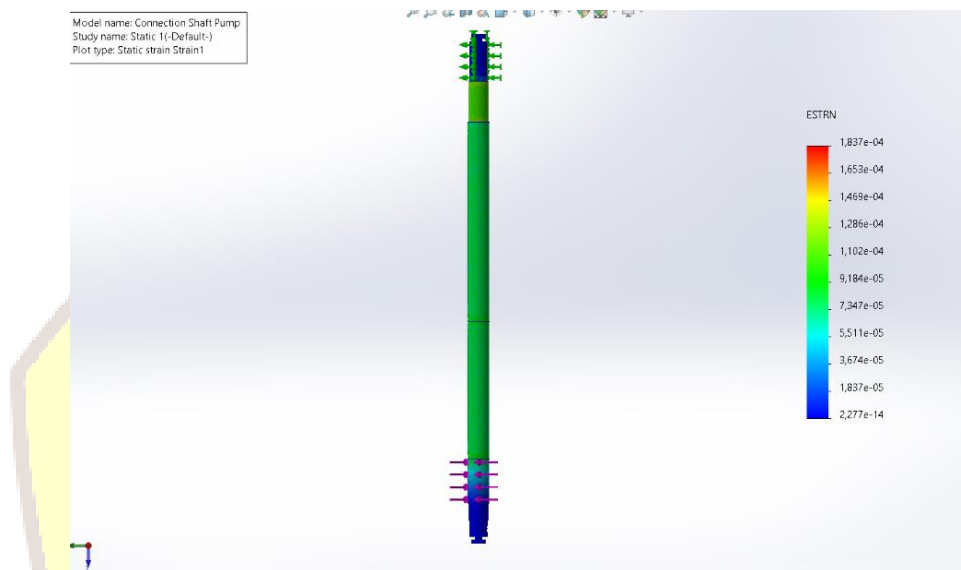
Hasil deformasi total menunjukkan perpindahan maksimum sekitar 0.39 mm, dengan deformasi terbesar terjadi di end connection shaft. Pola deformasi meningkat secara bertahap dari titik pengekangan menuju ujung bebas, mencerminkan perilaku lentur akibat pembebanan lateral. Gambar simulasi deformation dapat dilihat pada Gambar 26.



Gambar 26. Simulasi Deformation

C. Regangan

Hasil analisis menunjukkan nilai regangan maksimum (equivalent strain) sebesar 1.84×10^{-4} , yang terdistribusi secara bertahap sepanjang panjang shaft. Regangan tertinggi terjadi pada area dekat ujung atas shaft yang berdekatan dengan kondisi pengekangan. Nilai regangan ini masih jauh di bawah batas regangan leleh material baja, sehingga dapat disimpulkan bahwa shaft bekerja sepenuhnya dalam kondisi elastis dan tidak mengalami deformasi permanen. Gambar simulasi regangan dapat dilihat pada Gambar 27.



Gambar 27. Simulasi Regangan

3. Pembahasan Penelitian

Pembahasan ini dilakukan dengan metode RCFA dilengkapi dengan *5-whys analysis* dan *Fishbone Diagram* untuk menentukan Root cause dari kegagalan pada penelitian ini.

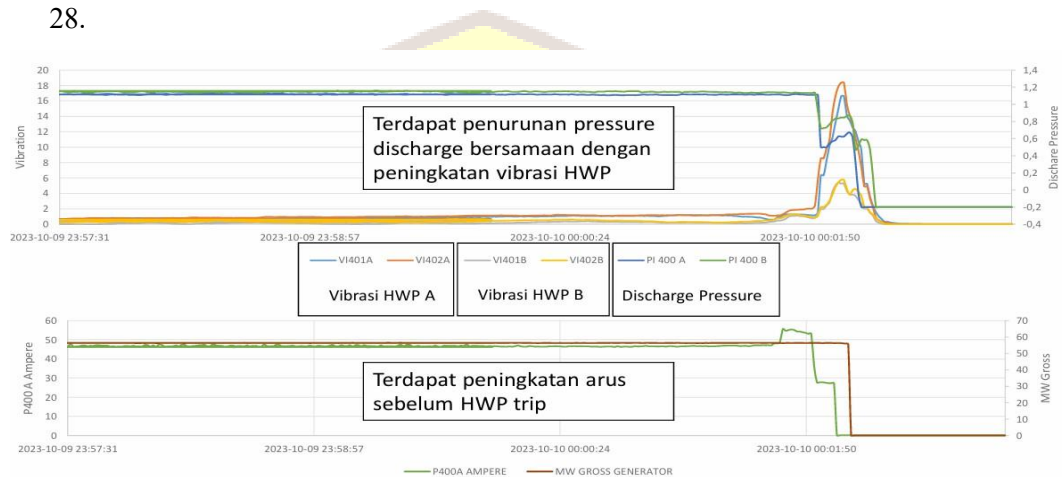
A. Penerapan Metode *Root Cause Failure Analysis* (RCFA)

Penerapan metode RCFA merupakan proses pendekatan guna menemukan akar pemicu kegagalan. Proses analisis ini melibatkan langkah-langkahnya yaitu:

1. Identifikasi Masalah

Berdasarkan parameter operasional data 10/10/2023 pukul 12.02 WIB terdapat penurunan pressure discharge HWP A & B (Low) PV: 0.78 Barg (A) 0.92 Barg (B),

bersamaan dengan peningkatan vibrasi HWP unit 4. Sedangkan berdasarkan ampere terdapat peningkatan arus sebelum HWP trip. HWP A mengalami kegagalan yang menurut informasi telah di inspeksi dan terpasang pada tahun 2017. Kegagalan pada HWP A unit 4 yang terjadi dilakukan investigasi pada pukul 18.00 WIB dengan kondisi koneksi motor serta pompa HWP A masih berhimpit. Sedangkan kondisi HWP A dari CDM / vibration analysis berkesimpulan motor dalam keadaan sehat dan pompa dalam keadaan sehat. Pompa trip terlihat pada trend *pressure discharge*, *ampere*, dan *flow to cooling tower (CT)* pada Gambar 28.

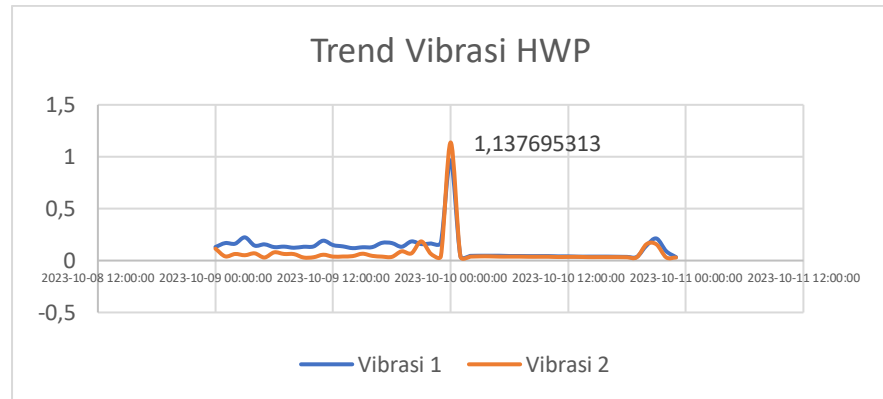


Gambar 28. Trend Pressure Discharge, Ampere, dan Flow to CT dari Pompa HWP

2. Mengumpulkan data terkait

1. Wawancara teknisi/operator

Berdasarkan hasil wawancara operator kegagalan ini terjadi ketika teridentifikasi alarm vibrasi motor HWP *high* yang menyebabkan pompa trip. Setelah operator melakukan pengamanan unit setelah terjadinya HWP trip, kemudian operator melakukan proses *start-up* kembali. Pada saat proses *start-up*, ketika HWP dinyalakan kemudian terjadi *shaft* macet dimana motor sudah tidak bisa memutar *shaft* pompa kembali. Trend vibrasi motor HWP dapat dilihat pada Gambar 29.

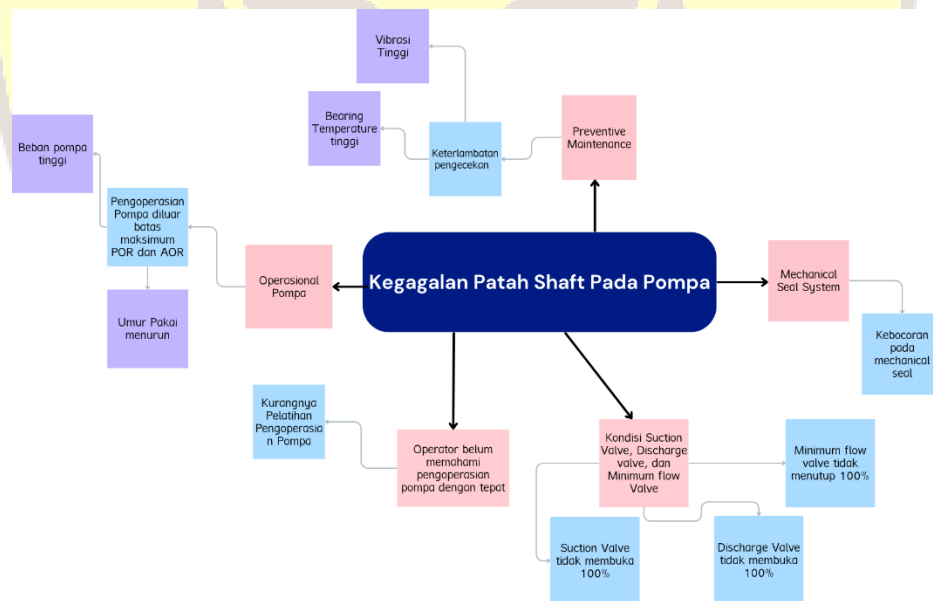


Gambar 29. Trend Vibrasi Pompa HWP

Setelah dilakukan proses dismantle HWP, terdapat *shaft* patah pada bagian *upper shaft*. *Shaft* patah ini yang menyebabkan motor tidak bisa memutar *shaft* karena macet (*stuck*).

3. Mengidentifikasi hal-hal yang berpengaruh pada permasalahan

Mengidentifikasi hal-hal yang berpengaruh dipetakan dalam bentuk *mind map* seperti pada Gambar 30.



Gambar 30. Mind Map hal-hal yang berpengaruh pada permasalahan

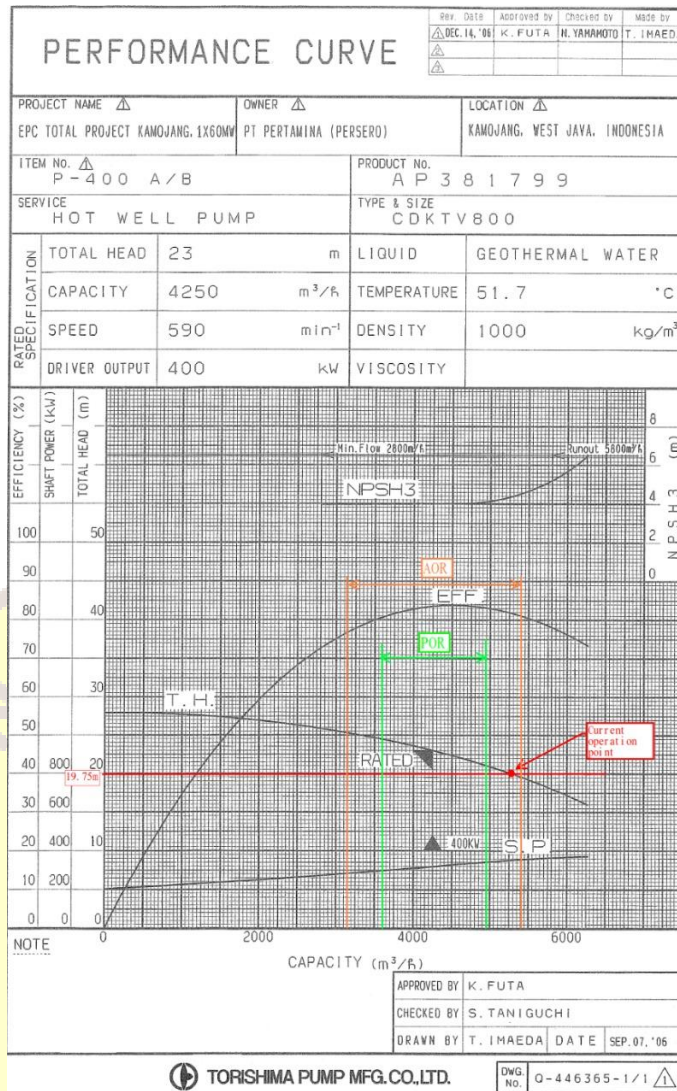
Berdasarkan *mind map* diatas, dilakukan verifikasi dengan melakukan pemeriksaan secara aktual. Hasil dari pemeriksaan diperlihatkan dalam tabel 7.

Tabel 7. Verifikasi Sub cause dengan aktual di lapangan

No	Sub Cause	Aktual
1	Preventive maintenance	Preventive maintenance dilakukan secara berkala sesuai dengan <i>schedule</i> dan <i>list item</i> pengecekan.
2	Operasional Pompa	Efisiensi pompa menurun terlihat dari nilai <i>pressure discharge</i> pompa yang tidak mampu menahan beban pembangkitan tinggi dan berdasarkan <i>performance curve</i> pompa dioperasikan mendekati batas maksimal AOR
3	Sertifikasi Operator	Operator sudah tersertifikasi dalam pengoperasian pompa
4	Mechanical System	Tidak adanya kebocoran pada <i>mechanical system</i>
5	Kondisi Valve	Tidak terdapat abnormal pada kondisi <i>suction</i> , <i>discharge</i> , dan <i>minimum flow valve</i>

Berdasarkan hasil pemeriksaan secara aktual pada sub cause, dapat dikerucutkan kemungkinan penyebab menunjuk pada sub cause parameter operasional pompa.

Pengoperasian pompa dianalisis melalui *performance curve* untuk mengetahui hubungan parameter pada kinerja pompa selama beroperasi. *Performance Curve* dapat dilihat pada Gambar 31.



Gambar 31. Performance Curve Pompa HWP [4]

Berdasarkan parameter operasi sebelum terjadinya trip bahwa pompa dioperasikan melebihi dari *preferred operation range* (POR) akan tetapi masih berada dibawah *allowable operation range* (AOR). Pengoperasian pompa diantara POR dan AOR akan menyebabkan penurunan efisiensi pompa, getaran dan beban mekanis meningkat, dan umur pompa lebih pendek karena keausan *bearing*, *mechanical seal*, dan *impeller* meningkat.

4. Menentukan akar penyebab

Berdasar dari hasil pengujiannya yang telah dijalankan, adanya bentuk patahan yang teramati dari patahan mengindikasikan modus kegagalan berupa "*fatigue fracture*" dikarenakan adanya retakan pada *shaft* dari sisi luar. Retakan yang

menjadi inisial adalah retakan pada patahan bagian atas, dimana teramati secara jelas adanya perambatan retak dari sisi luar yang menjalar ke bagian dalam. Retakan ini terjadi karena adanya benturan/gesekan (*metal to metal contact*) pada bagian *shaft* yang dibuktikan dengan adanya perubahan bentuk “*dent*” pada sisi luar *shaft*. Benturan terjadi karena adanya beban operasi yang cukup tinggi pada bagian impeller yang mengakibatkan terjadi mekanisme “*bending*” pada *shaft*, sehingga *shaft* bergesekan.

Dalam menentukan akar penyebab ini menggunakan metode *5-whys* untuk menemukan akar penyebab (*root cause*). Analisis *5-whys* dilakukan dengan cara melakukan pengujian-pengujian dan simulasi pada patahan *shaft*. Hasil analisa diperlihatkan dalam Tabel 7.

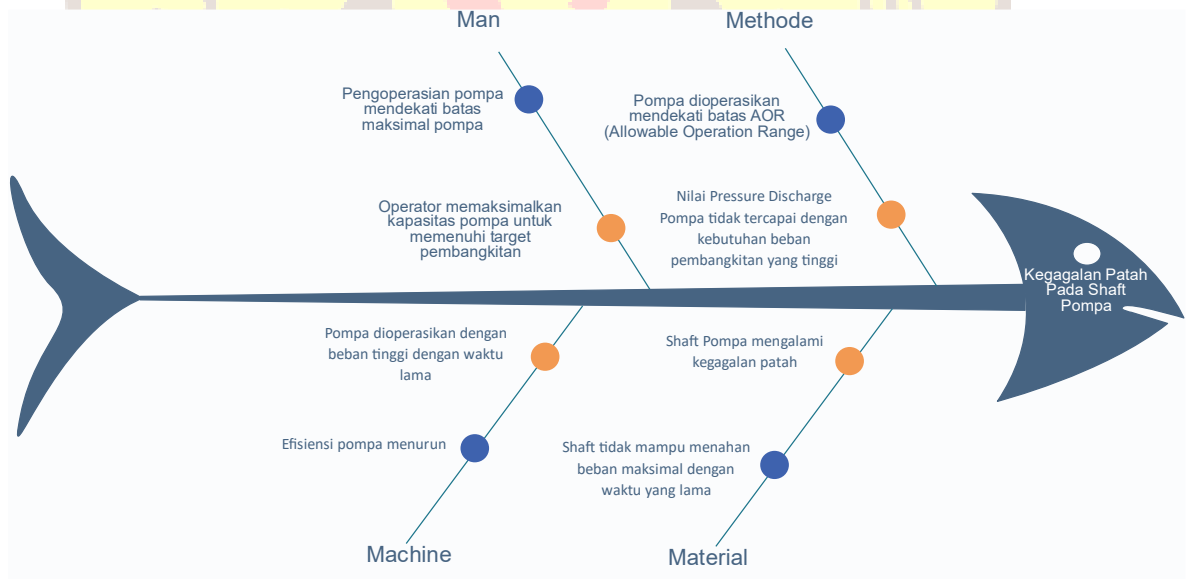
Tabel 8 5-whys Analysis HWP Trip

Masalah: Hot Well Pump trip		
Tingkatan	Pertanyaan “mengapa”	Jawaban
1	Mengapa HWP trip?	Karena terjadi alarm <i>high vibration</i>
2	Mengapa terjadi alarm <i>high vibration</i> ?	Karena terdapat pembacaan lonjakan vibrasi pada pompa
3	Mengapa terdapat pembacaan lonjakan vibrasi pada pompa?	Karena terjadinya <i>stuck</i> pada putaran <i>shaft</i> pompa
4	Mengapa terjadinya macet pada putaran pompa?	Karena <i>shaft</i> pompa patah
5	Mengapa <i>shaft</i> pompa patah?	Karena terjadi akibat beban berulang (<i>fatigue failure</i>) atau mengalami beban siklik akibat pengoperasian jauh dari BEP range (<i>Best Efficiency Point</i>)
Penanggulangan		
	1. Korektif	- Memperbaiki <i>shaft</i> sesuai dengan <i>design</i> dan mengganti <i>shaft</i> selama dilakukan perbaikan <i>shaft</i> yang terjadi kegagalan.

Masalah: <i>Hot Well Pump trip</i>		
Tingkatan	Pertanyaan “mengapa”	Jawaban
	2. Preventif	Pengoperasian pompa dalam range BEP (Best Efficiency Point)

Analisis *5-whys* pada tabel diatas digunakan untuk menelusuri akar penyebab dari kegagalan *shaft hot well pump* yang trip. Pendekatan ini merupakan bagian dari *root cause failure analysis* (RCFA) yang bertujuan untuk menghindari solusi yang hanya menyentuh gejala permukaan. Analisi *5-whys* yang dilakukan telah berhasil mengidentifikasi akar penyebab teknis kerusakan, yaitu kerusakan komponen akibat beban berulang (*fatigue failure*) atau beban siklik akibat pengoperasian jauh dari range BEP (*Best Efficiency Point*).

Kemudian dilakukan analisis menggunakan Fishbone Diagram untuk menentukan *root cause* pada permasalahan di penelitian ini.



Gambar 32. Fishbone Diagram Kegagalan Patah Pada *Shaft* Pompa

Dari gambar diatas merupakan diagram tulang ikan atau fishbone diagram yang menggambarkan analisis penyebab masalah kegagalan pada *shaft* pompa mengalami patah. Diagram tersebut memetakan berbagai faktor yang dapat menyebabkan masalah tersebut, yang dibagi ke dalam kategori People, Machines, Methods, Materials.

Berikut merupakan penjelasan lebih detailnya:

1. Manusia (*People*), Ketidaksesuaian operasional:

Operator mengoperasikan pompa mendekati batas kapasitas batas maksimal dengan tujuan memenuhi target pembangkitan, pompa dioperasikan dengan menyesuaikan nilai *pressure discharge* yang mendekati batas maksimal kapasitas pompa dimana pompa dioperasikan beban maksimal dengan waktu yang lama sehingga dapat dengan cepat menurunkan efisiensi kinerja pompa dan mempercepat umur pakai pompa.

2. Mesin (*Machines*), Efisiensi pompa menurun:

Efisiensi pompa menurun terlihat dari nilai *pressure discharge* karena pompa dioperasikan dengan beban tinggi dengan waktu lama.

3. Metode (*Methods*), Pompa dioperasikan mendekati batas AOR (Allowable Operation Range):

Pompa dioperasikan mendekati AOR dengan waktu yang lama dapat mengakibatkan efisiensi kinerja pompa menurun dan kegagalan patah pada *shaft* pompa.

4. Material (*Materials*), Shaft Pompa mengalami kegagalan patah:

Dengan beban pembangkitan maksimal, pompa dioperasikan mendekati AOR, dan sistem *mechanic seal* yang tidak mampu melindungi pompa mengakibatkan kegagalan patah pada *shaft* pompa.

5. Merekomendasikan Solusi

Merekomendasikan tindakan korektif untuk mengatasi akar penyebab. Setelah akar penyebab ditemukan, langkah selanjutnya adalah menerapkan solusi untuk mengatasi masalah tersebut.

Solusi dari akar permasalahan yang didapatkan berdasarkan analisis yang telah dilakukan yaitu menjaga efisiensi kinerja pompa dengan mengoperasikan pada *range best efficiency point* (BEP) dengan tujuan memperlambat masa umur pakai pompa hingga terjadi kegagalan patah pompa tidak terulang.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Mekanisme kegagalan material dipicu karena terdapatnya beban secara berulang dan terus menerus maka titik maksimum komponennya menerima beban dan terdapat deformasi plastis pada bagian luar permukaan sehingga memicu patahan.
- Bentuk patahan yang teramati dari muka patahan mengindikasikan modus kegagalan berupa patah “fatigue” dikarenakan adanya retakan pada *shaft*. Retakan yang menjadi inisiasi adalah retakan pada bagian permukaan yang teramati adanya perembatan retak dari sisi luar yang menjalar ke bagian dalam.
- Berdasarkan hasil penelitian bahwa faktor penyebab utama (*root cause*) material *shaft* terjadi patah yaitu beban kerja tinggi yang berulang karena pompa dioperasikan mendekati batas *allowable range operation* (AOR) dan melebihi batas *preferred range operation* (POR) maka menjadikan material terjadi patah lelah dengan jangka waktu tertentu.
- Menjaga kinerja pompa dengan pengoperasian pada *best efficiency point* (BEP).

2. Saran

Berikut saran yang dapat penulis berikan kepada perusahaan yaitu:

- Pengujian SEM sebaiknya tidak hanya diambil pada bagian identifikasi *intial crack* awal.
- Simulasi FEA dilakukan lebih spesifik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. H. Triantoro, "Analisa Kegagalan pada Shaft Mesin Circulating Water Pump di Pembangkit Listrik PT. X," 2019.
- [2] A. Setiawan, J. T. Mesin, and F. T. Industri, "Analisis Kegagalan Poros Pompa Centrifugal Multistage," vol. 5, no. 2, pp. 0–5, 2016.
- [3] A. R. Hakim, et. al., "Buku Pintar Operasi PLTP Kamojang Unit 4&5," vol. 1, 2024, [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1B-T9_TrR4UvXYlel8CEC3NSHWA_rVhf9D/view?usp=drive_link
- [4] T. Imaeda, "Hotwell Pump - Torishima," 2006, *Torishima, Indonesia*. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1fde2HXaJVkAv5oV0jg3ZgXXWN7JnBg_M/view?usp=drive_link
- [5] J. R. Davis, "Metals Handbook Desk Edition," *Metals Handbook Desk Edition*, 1998, doi: 10.31399/asm.hb.mhde2.9781627081993.
- [6] P. Moore, "Technical handbook of stainless steels," *Atlas steels*, no. August, pp. 1–45, 2013.
- [7] F.-I. P. Products, "Industrial Piping Products AISI 431 / UNS S43100 / DIN 1.4057," pp. 1–3, [Online]. Available: <https://ferrobend.com/datasheets/aisi-316l-stainless-steel.pdf>
- [8] D. Susanto, S. Permana, and R. Suratman, "Analisi Kegagalan Cooler Motor Pompa Circulating Water Pump Di PLTU (Studi Kasus Di PLTU)," *Jurnal Universitas Majalengka*, no. 1, p. 242, 2013.
- [9] A. Dias, *Failure analysis*. 2011. doi: 10.1201/b18952-27.
- [10] E. R. Apriana, "Analisis Kegagalan Pada Pipa Stainless Steel Aisi 304," *Universitas Pasundan*, 2019, [Online]. Available: <http://repository.unpas.ac.id/47763/>
- [11] J. F. Shackelford, *Failure analysis*. 2004. doi: 10.1109/tr.1980.5220796.
- [12] C. R. Walker and K. K. Starr, "Failure Analysis Handbook," 1989.
- [13] D. J. Wulpi, *Understanding How Components Fail*. 1985. doi: 10.1016/0026-0800(86)90014-5.

- [14] H. Chandra, "Analisis Kegagalan Material," p. 58, 2019.
- [15] H. P. Bloch, "Root Cause Failure Analysis," *Petrochemical Machinery Insights*, pp. 561–571, 2017, doi: 10.1016/b978-0-12-809272-9.00035-9.
- [16] K. S. Dhull, B. Dutta, S. Pattnaik, P. V. Samir, and I. M. Devraj, "Comparative Evaluation of Adhesive Bond Strength of Conventional GIC and Cention N to Enamel and Dentin of Primary Teeth: An In Vitro Study," *Int. J. Clin. Pediatr. Dent.*, vol. 15, no. 4, pp. 412–416, 2022, doi: 10.5005/jp-journals-10005-2410.
- [17] K. Azhar, E. Syams, and M. Sapuan, "Experimental Determination of the Fatigue Behavior of Austenitic 316L Stainless Steel under Fatigue and Creep-Fatigue Tests at High Temperature," vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2013.
- [18] R. Dheo and Y. Bintang, "Implementasi metode root cause failure analysis (RCFA) untuk memperbaiki kerusakan eretan dan tailstock mesin bubut mawitec," 2025, [Online]. Available: [http://repository.polman-babel.ac.id/id/eprint/2046/1/proposal proyek akhir dheo revando dan bintang yudistira \(1\).pdf](http://repository.polman-babel.ac.id/id/eprint/2046/1/proposal%20proyek%20akhir%20dheo%20revando%20dan%20bintang%20yudistira%20(1).pdf)
- [19] T. Supriyono, B. Tarigan, and T. Nurjaman, "Failure Analysis on the Mini Pile Hammer," *Prosiding SNTTM*, vol. 18, no. ISSN 2623-0313, pp. 105–111, 2018, [Online]. Available: <http://repository.unpas.ac.id/56859/>
- [20] M. F. Kumayasari and A. I. Sultoni, "Studi Uji kekerasan Rockwell Superficial vs Micro Vickers," *Jurnal Teknologi Proses dan Inovasi Industri*, vol. 2, no. 2, 2017, doi: 10.36048/jtpii.v2i2.789.
- [21] R. Dahlan and S. Hanto, "Analisa kegagalan perpatahan komponen drive shaft pada lokomotif diesel," vol. 1, no. 2, pp. 93–103, 2024.
- [22] G. Y. R. Ginting, G. D. Haryadi, and ..., "Analisis Kegagalan Pada Komponen Kritis Hydraulic Axial Pump Dengan Kapasitas 2000 Liter Per Second Menggunakan Metode Fault ...," ... *Teknik Mesin*, vol. 10, no. 3, pp. 445–454, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/35141>

3. Perhitungan Teoritis Shaft

Power Output (P) = 400 kW

Speed (n) = 592 RPM

Rated Torque (Tn) = 658.1 kg·m

Starting Torque (Ts) = 493.6 kg·m

Breakdown Torque (Tb) = 1,316.2 kg·m

Diameter Shaft (d) = 105 mm

No	Jenis Shaft	Rata-rata Diameter (mm)
1	Upper Shaft HWP	106,52
2	Lower Shaft HWP	104,53
3	Lower Shaft intermediate	103,77
Rata-rata = 105 mm		

1. Torsi

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi(590)}{60} = 61,7 \text{ rad/s}$$

- Rated Torque (Tn) = 658.1 × 9.81 = 6453.8 N·m
- Starting Torque (Ts) = 493.6 × 9.81 = 4840.6 N·m
- Breakdown Torque (Tb) = 1,316.2 × 9.81 = 12907.5 N·m

Torsi Teoritis

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{400,000}{61,7} = 6474.09 \text{ N.m}$$

2. Shear Stress

$$\tau_n = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16(6453,8)}{\pi \times 105^3} = 28,5 \text{ Mpa}$$

$$\tau_s = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16(4840,6)}{\pi \times 105^3} = 21,4 \text{ Mpa}$$

$$\tau_b = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16(12097,5)}{\pi \times 105^3} = 57,1 \text{ Mpa}$$

3. Normal Stress Axial

$$\sigma_{Norm} = \frac{F}{A} = \frac{920 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} 105^2} = 0,106 \text{ Mpa}$$

4. Principal Stress

$$\sigma_1 = 0,053 + 57,1 \approx 57,15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 0,053 - 57,1 \approx -57,05 \text{ MPa}$$

Tegangan aksial pada poros (σ_x) = **0,106 MPa**

Tegangan lateral/ring (σ_y) = **0,000 MPa**

Tegangan geser pada bidang x-y (τ_{xy}) = **57,1 MPa** (berdasarkan *breakdown torque*)

Titik pusat Mohr:

$$C = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \frac{0,106 + 0}{2} = 0,053 \text{ MPa.}$$

Jari-jari Mohr:

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sqrt{0,053^2 + 57,1^2} = 57,1 \text{ MPa}$$

Principal stresses ($\sigma_1 \geq \sigma_2$):

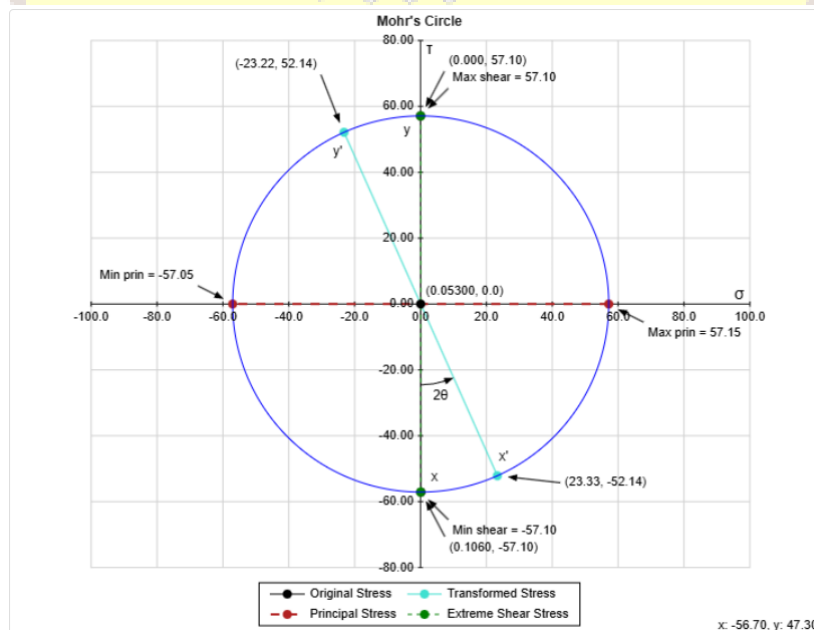
$$\sigma_{1,2} = C \pm R$$

$$\sigma_1 = C + R = 57,153 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = C - R = -57,047 \text{ MPa}$$

Sudut principal:

$$\tan(2\theta_p) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \approx 45^\circ$$



4. Perhitungan Standard Deviasi, Uncertainty, Relative Standard Deviation (RSD)

1. Standard Deviasi (SD)

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Keterangan:

- x_i : nilai kekerasan tiap titik
- \bar{x} : rata-rata
- n : jumlah data

$$s = 1,53$$

SD = 1~3% dari rata-rata (Sangat Homogen)

2. Relative Standard Deviation (RSD)

$$RSD = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$$

$$RSD = \frac{1,53}{153,67} \times 100\%$$

$$RSD = 0,995\%$$

RSD < 2% (Sangat Homogen)

3. Uncertainty (Ketidakpastian Pengukuran)

$$U = k \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$u = \frac{1,53}{\sqrt{3}} = 0,88 \text{ HV}$$

$$U = k \cdot u$$

$$U = 2 \cdot 0,88 = 1,77 \text{ HV}$$

$$U = \pm 1,77 \text{ HV}$$

$$153,67 = \pm 1,77 \text{ HV}$$