



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL184834

ANALISIS KEGAGALAN PADA *SHAFT* MESIN UAP II DI PABRIK GULA GENDING

ADI NOVAL IHSAN
NRP. 0251154000017

Dosen Pembimbing :
Ir. Rochman Rochiem M.Sc.
Alvian Toto Wibisono S.T., M.T

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



TUGAS AKHIR - TL184834

ANALISIS KEGAGALAN PADA *SHAFT* MESIN UAP II DI PABRIK GULA GENDING

**ADI NOVAL IHSAN
NRP. 0251154000017**

**Dosen Pembimbing :
Ir. Rochman Rochiem M.Sc.
Alvian Toto Wibisono S.T., M.T**

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL184834

FAILURE ANALYSIS ON SHAFT STEAM ENGINE IN SUGAR FACTORY GENDING

ADI NOVAL IHSAN
NRP. 0251154000017

Advisor :
Ir. Rochman Rochiem M.Sc.
Alvian Toto Wibisono S.T., M.T

Materials Engineering Department
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

(This page left intentionally blank)

**ANALISIS KEGAGALAN PADA SHAFT MESIN UAP II DI
PABRIK GULA GENDING**

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 Metalurgi dan Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ADI NOVAL IHSAN
Nrp. 0251154000017

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc (Pembimbing I)
2. Alvian Toto Wibisono S.T., M.T (Pembimbing II)

**SURABAYA
JANUARI 2019**



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS KEGAGALAN PADA *SHAFT* MESIN UAP II DI PABRIK GULA GENDING

Nama : Adi Noval Ihsan
NRP : 0251154000017
Departemen : Teknik Material
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.

ABSTRAK

Shaft adalah bagian terpenting pada mesin uap II Pabrik Gula Gending, dimana *shaft* berfungsi sebagai penyalur gaya mesin uap dengan mesin penggilingan. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis faktor penyebab dan mekanisme kegagalan yang terjadi pada *shaft*. Beberapa pengujian dilakukan untuk mendukung analisis ini. Beberapa pengujian tersebut yaitu pengamatan visual, pengujian komposisi, pengujian *metallography*, pengujian kekerasan, SEM dan XRD. Hasil uji komposisi menunjukkan material *shaft* tersebut tidak memenuhi standar AISI 4340. Pengujian *metallography* menunjukkan pada daerah dekat patahan memiliki nilai *grain size* yang lebih tinggi dibanding daerah jauh dari patahan. Pengujian SEM dilakukan pada permukaan patahan dan hasil dari SEM menunjukkan adanya retakan dan garis striasi halus akibat adanya pembebanan berulang. Uji kekerasan dilakukan pada 3 daerah yaitu daerah *initial crack*, *propagation* dan *final crack*. Uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan yang dekat patahan lebih besar daripada daerah jauh patahan. Hasil XRD menunjukkan nilai regangan kristal pada daerah patahan lebih besar daripada daerah jauh patahan. Setelah dilakukannya pengujian-pengujian tersebut didapatkan faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan komponen *shaft* pada mesin uap II, yaitu kesalahan pemilihan material yang tidak sesuai standar, sehingga sifat mekanik yang ada dibawah standar.

Mekanisme kegagalan komponen *shaft* pada mesin uap II diawali adanya *initial crack* pada *keyway* karena adanya pemusatan tegangan pada daerah tersebut dan kemudian retakan merambat pada permukaan sebelum terjadi *final crack* dikarenakan *shaft* tidak mampu menahan tegangan yang terjadi, sehingga menyebabkan *fatigue failure*.

Kata kunci : *shaft, crack, failure, XRD, SEM*

FAILURE ANALYSIS ON SHAFT STEAM ENGINE IN SUGAR FACTORY GENDING

Nama : **Adi Noval Ihsan**
NRP : **0251154000017**
Department : **Teknik Material**
Advisor : **Ir. Rochman Rochiem M.Sc.**
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.

ABSTRACT

Shaft is the most important part of the steam engine II Gending Sugar Factory, where the shaft is force distributor from steam engine to milling machine. This research was conducted to analyze the causal factors and failure mechanisms that occur in the shaft. Several tests were carried out to support this analysis, there are visual observation, composition test, hardness test, mettalography, SEM and XRD. From the composition test results it was found that the shaft material did not fullfil the AISI 4340's standard. From metallography testing it was found that the area near the crack had a higher grain size value than the area far from the crack. SEM testing was carried out on the crack surface and the results of SEM showed cracks and smooth striation lines due to repeated and continuous loading. The hardness test was carried out in 3 areas, namely the initial crack, propagation and final crack area from the fault area to the area far from the fault. The hardness value near the crack was greater than the far of the crack area. From the XRD results, the crystal strain value in the crack area is greater than the far of the crack area. After doing the test, the factors that caused the failure of the shaft components in the steam engine II were made, namely the error of material selection for standard that use of Gending Sugar Factory, because of that the mechanical properties is below the standard. The failure mechanism of shaft components in steam engine II begins with an initial crack on the

keyway due to the concentration of stress on the area and then the cracks propagate on the surface before final cracks occur because the shaft is unable to withstand the stresses that occur.

Key word : *shaft, crack, failure, XRD, SEM*

KATA PENGANTAR

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

“ANALISIS KEGAGALAN PADA *SHAFT* MESIN UAP II DI PABRIK GULA GENDING”

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. Kedua Orang Tua dan Kakak serta Adik yang telah mendukung secara moril maupun material serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan, keselamatan dan kelancaran dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan S.T., M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS.
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem M.Sc selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir yang telah membimbing, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
5. Bapak Alvian Toto Wibisono S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir yang telah membimbing, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
6. Bapak Dr. Eng. Hosta Adgyananta S.T., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI-ITS.
7. Bapak Dr. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. Selaku dosen wali yang telah membantu penulis menjalani Pendidikan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.
8. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang melancarkan Tugas Akhir penulis baik secara langsung maupun tidak langsung.
9. Bapak Agus Setya Wahyudi, Bapak Ngadiono dan Bapak Yugo, selaku pembimbing di Pabrik Gula Gending yang telah

membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.

10. Tim ANVILL (Anky, Yohannes, Zaid dan Junda) yang memberikan banyak pengalaman, pembelajaran dan motivasi kepada penulis untuk senantiasa berprestasi.
11. Teman-teman kabinet Harmonika BEM FTI-ITS 2017/2018 yang telah memberikan banyak dukungan secara moril kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
12. Seluruh mahasiswa Teknik Material serta keluarga MT17 yang penulis sayangi, yang telah menemani dan memberikan banyak pengalaman berharga selama jenjang perkuliahan ini.
13. Seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan.

Penulis mengharapkan kritik yang membangun dari pembaca demi perbaikan dan kemajuan bersama. Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya

Surabaya, 3 Januari 2019

Penulis,

Adi Noval Ihsan
02511540000017

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	2
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Mesin Uap	5
2.2. Poros atau <i>Shaft</i>	6
2.3. Baja.....	9
2.4. Klasifikasi Baja Karbon	9
2.5. ASSAB 705	12
2.6. Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C.....	13
2.7. Analisis Kegagalan.....	14
2.7.1. Prosedur dalam Analisis Kegagalan.....	16
2.8. Kelelahan.....	17
2.8.1. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Lelah ..	21
2.8.2. Perambatan Retak.....	22
2.9. Macam-Macam Pengujian dalam Analisis Kegagalan ...	23
2.10. Penelitian Sebelumnya	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2. Metode Penelitian	30
3.3. Material yang Digunakan	30
3.4. Peralatan	32

3.5. Tahapan Penelitian.....	33
3.5.1. Studi Litetur Perusahaan	33
3.5.2. Pengujian Komposisi Unsur Kimia	33
3.5.3. Pengamatan Visual	33
3.5.4. Preparasi Spesimen.....	33
3.5.5. Pengujian Struktur mikro	33
3.5.6. Pengujian Kekerasan	35
3.5.7. Pengujian SEM.....	35
3.5.8. Pengujian XRD.....	36
3.6. Rancangan Penelitian.....	37
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1. Analisis data	39
4.2. Pembahasan	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	51
5.2. Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	xix
LAMPIRAN	xxiii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	xli
BIODATA PENULIS	xliii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Mesin Uap di Pabrik Gula Gending (PG Gending, 2018)	5
Gambar 2. 2	<i>Shaft</i> utama mesin uap II (PG Gending, 2018)	7
Gambar 2. 3	Dimensi <i>Shaft</i> (Manual Book PG Gending).....	8
Gambar 2. 4	Diagram Fasa Fe- Fe ₃ C (Avner, 1974).....	14
Gambar 2. 5	Skema Pola Patahan (Van Gys, 2013)	20
Gambar 2. 6	Mekanisme Patah Lelah dan Faktornya (ASM Handbook Vol.19 <i>Fatigue and Fracture</i> , 2002) ..	21
Gambar 2. 7	Contoh <i>Torsion Bending</i> (Xiao-lei).....	26
Gambar 2. 8	Contoh Grafik Uji Kekerasan (Gys Van, 2013) ...	27
Gambar 2. 9	Contoh Hasil Uji SEM (Gys Van, 2013).....	27
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3. 2	Penampang patahan <i>shaft</i> mesin uap.....	31
Gambar 3. 3	Daerah Pengambilan Spesimen (a) <i>Initial Crack</i> (b) <i>Propagation</i> (c) <i>Final Crack</i>	31
Gambar 3. 4	(a) Daerah <i>Initial Crack</i> (b) Daerah <i>Propagation</i> (c) Daerah <i>Final Crack</i>	32
Gambar 3. 5	Mikroskop Optik Olympus BX15M-RF	34
Gambar 3. 6	Alat Uji kekerasan <i>Universal Hardness Tester</i> HBRV 187.5A (Teknik Material, 2018)	35
Gambar 3. 7	Alat Uji SEM (Teknik Material, 2018)	36
Gambar 3. 8	Alat Uji XRD (Teknik Material, 2018).....	36
Gambar 4. 1	Permukaan patahan <i>Shaft</i> Mesin Uap II.....	39
Gambar 4. 2	Foto Permukaan Patah <i>Shaft</i> (a) Daerah <i>Initial Crack</i> ; (b) Daerah <i>Propagasi</i> ; (c) Daerah <i>Final Crack</i>	40
Gambar 4. 3	Fraktografi Pada Patah <i>Shaft</i> dengan pembesaran 400x (a) Pada Daerah <i>Initial Crack</i> (b) Pada Daerah <i>Propagation</i> (c) Pada Daerah <i>Final Crack</i>	42
Gambar 4. 4	Struktur Mikro <i>Shaft</i> Menggunakan Etsa Nital dengan pembesaran 200x (a)Daerah <i>Initial Crack</i> Dekat Dengan Patahan (b) <i>Daerah Propagation</i>	

	Dekat Dengan Patahan (c)Daerah <i>Final Crack</i>	
	Dekat Dengan Patahan (d)Daerah yang Jauh Dari	
	Patahan	43
Gambar 4. 5	Pebandingan Kekerasan Pada Daerah <i>Initial Crack</i> ,	
	<i>Propagation</i> , dan <i>Final Crack</i>	45
Gambar 4. 6	Hasil Uji XRD pada Daerah yang Dekat dan Jauh	
	dari Patahan	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia AISI 4340 (avner, 1974)	12
Tabel 2. 2 Permasalahan dalam Kegagalan Komponen Mesin (Brooks, 2002).....	15
Tabel 2. 3 Kasus Kegagalan Material Akibat Perawatan Komponen Mesin (Brooks, 2002).....	15
Tabel 2. 4 Penyebab Kegagalan dalam Komponen Mesin (Brooks, 2002).....	16
Tabel 3. 1 Rancangan Penelitian	37
Tabel 4. 1 Perbandingan Hasil Uji Komposisi <i>Shaft</i> dengan AISI 4340 dan AISI 1040	41
Tabel 4. 2 Persentase Fasa Hasil Struktur mikro dengan Fiji Apps	44
Tabel 4. 3 Nilai <i>Grain Size</i> Menurut ASTM E112.....	44
Tabel 4. 4 Distribusi Kekerasan <i>Shaft</i> dari Bagian yang Patah hingga Bagian Terjauh dari Patahan	44
Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Regangan Kristal	46

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pabrik Gula (PG) Gending adalah salah satu pabrik gula yang berada di Kabupten Probolinggo. Pabrik ini berdiri sejak tahun 1830. Pabrik yang sekarang dinaungi PT Perkebunan Nusantara XI ini menggunakan bahan baku tebu dari kebun kelolaan pabrik yang terletak di sekitar lokasi pabrik. Selain itu, tebu juga diperoleh dari para petani yang menjalin kerjasama dengan pabrik. Produk utama PG Gending, yaitu gula, adalah kristal sakarosa yang diekstrak dari nira tebu. Untuk memperoleh nira tersebut, tebu harus digiling. Pabrik Gula Gending melangsungkan proses penggilingan sebanyak empat tahap. Ada empat mesin penggiling tebu, dimana mesin I dan II bertenaga uap, mesin III bertenaga elektromotor dan mesin IV bertenaga turbin uap. Proses produksi gula berlangsung selama musim tebu, atau disebut juga masa giling, yaitu selama 4-6 bulan. Selama masa giling, proses produksi gula di Pabrik Gula Gending berlangsung 24 jam nonstop dan harus menggiling hingga 65 ton tebu tiap jam.

Mesin-mesin penggiling yang sudah terpasang sejak tahun 1957 ini digerakkan dengan tekanan uap yang dihasilkan dari *boiler*. Uap tersebut mendorong *piston* yang menyebabkan *piston* bertranslasi bolak-balik, menggerakkan *piston rod* yang terkunci dengan pasak pada *crosshead*. Gerakan translasi bolak-balik tersebut diubah menjadi rotasi dengan *connecting rod* yang menghubungkan *crosshead* dengan *crank*. Bagian *crank* itulah yang memutar poros utama mesin uap yang tersambung dengan *flywheel* dan *gear*. Putaran tersebut direduksi beberapa kali untuk menggerakkan gilingan pemerah tebu.

Meski *Non-Destructive Test* dan pembaruan komponen rutin dilakukan sebelum masa giling, tidak jarang terjadi kegagalan (*failure*) pada komponen tertentu pada mesin-mesin penggiling tersebut saat sedang beroperasi. Pada 3 Agustus 2018, poros utama



mesin uap II mengalami kegagalan berupa patah pada bagian tengah (*gear*). Patahnya material tersebut bisa saja diakibatkan oleh pemilihan material yang tidak tepat atau bisa juga dikarenakan mesin bekerja secara berkelanjutan atau berulang yang dimana *shaft* juga ikut didalamnya sehingga material lelah dan akhirnya patah. Oleh karena itu, diperlukan adanya analisis kegagalan pada *shaft* tersebut sehingga kegagalan tersebut tidak terulang kembali dan dapat mendukung produksi gula di Pabrik Gula Gending.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen poros utama di mesin uap penggiling II?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan pada komponen poros utama di mesin uap penggiling II?
3. Bagaimana solusi penyelesaian dari kegagalan komponen poros utama di mesin uap penggiling II?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Desain poros utama memenuhi standar operasional
2. Material dianggap homogen di semua sisi
3. Pengaruh lingkungan diabaikan

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis penyebab terjadinya kegagalan pada komponen poros utama di mesin uap penggiling II.
2. Menganalisis mekanisme kegagalan pada komponen poros utama di mesin uap penggiling II.
3. Menganalisis solusi penyelesaian dari kegagalan pada komponen poros utama di mesin uap penggiling II.

BAB I PENDAHULUAN



1.5. Manfaat Penelitian

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

1. Masukan untuk hal-hal yang dapat dilakukan agar kegagalan pada poros utama dapat ditanggulangi
2. Referensi pemilihan bahan pada poros utama
3. Referensi pemasangan pada poros utama



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mesin Uap

Fungsi dari mesin uap adalah untuk mengubah energi panas menjadi kerja mekanikal. Energi panas yang dilibatkan adalah hasil pembakaran dari bahan bakar yang berasal dari furnace yang diatur untuk memanaskan air ke air, yang diletakkan dengan ketel uap. Air yang diubah menjadi uap kemudian disambungkan dengan mesin, uap tersebut dipaksa untuk melakukan kerja mekanikal dan dengan melakukan hal tersebut kehilangan energi panas. Kerja mekanikal tersebut dihubungkan dengan mesin yang akan digunakan berguna, seperti sabuk, tali, rantai, dan konektor lainnya. Atau, bisa dikonversikan menjadi energi elektrik dan dialirkan menggunakan kabel (Terrell, 1922).



Gambar 2. 1 Mesin Uap di Pabrik Gula Gending (PG Gending, 2018)

Mesin uap II PG Gending ditunjukkan pada Gambar 2.1, digerakan dengan tekanan uap yang dihasilkan dari *boiler*. Uap tersebut mendorong *piston* yang menyebabkan *piston* bertranslasi bolak-balik, menggerakkan *piston rod* yang terkunci dengan pasak



pada *crosshead*. Gerakan translasi bolak-balik tersebut diubah menjadi rotasi dengan *connecting rod* yang menghubungkan *crosshead* dengan *crank*. Bagian *crank* itulah yang memutar poros utama mesin uap yang tersambung dengan *flywheel*. Putaran tersebut direduksi beberapa kali untuk menggerakkan gilingan pemerah tebu.

Mesin uap di Pabrik Gula Gending ini sendiri bekerja selama 24 jam pada musim giling dimana sekitar 4-6 bulan. Selama setahun biasanya hanya ada satu musim giling, sehingga selama satu tahun mesin hanya digunakan selama 4-6 bulan.

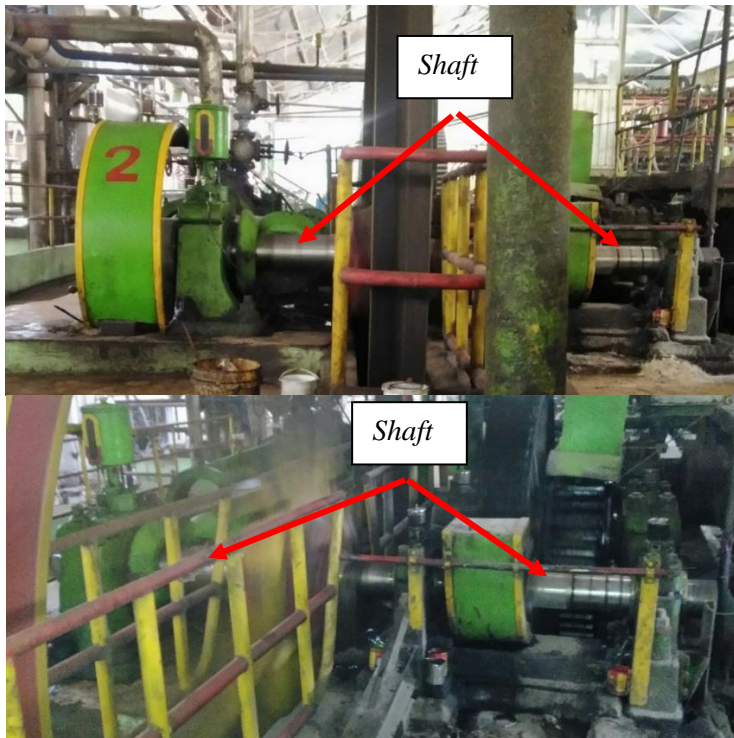
2.2. Poros atau *Shaft*

Poros berfungsi untuk meneruskan tenaga baik berupa puntiran, torsi maupun bending dari suatu bagian ke bagian yang lain. Akibat beban tersebut poros mengalami pembebanan yang terus berulang. Akibatnya suatu poros sering mengalami kegagalan dalam operasinya. Kegagalan akibat beban berulang sangat tidak diinginkan karena tanda-tanda akan terjadinya kegagalan tidak dapat diketahui secara langsung. Kegagalan ini dapat berupa *crack* yang terus berkembang hingga terjadi perambatan *crack* yang kemudian menjadi patah. (Sugiarto, 2013), secara garis besarnya poros dibedakan menjadi:

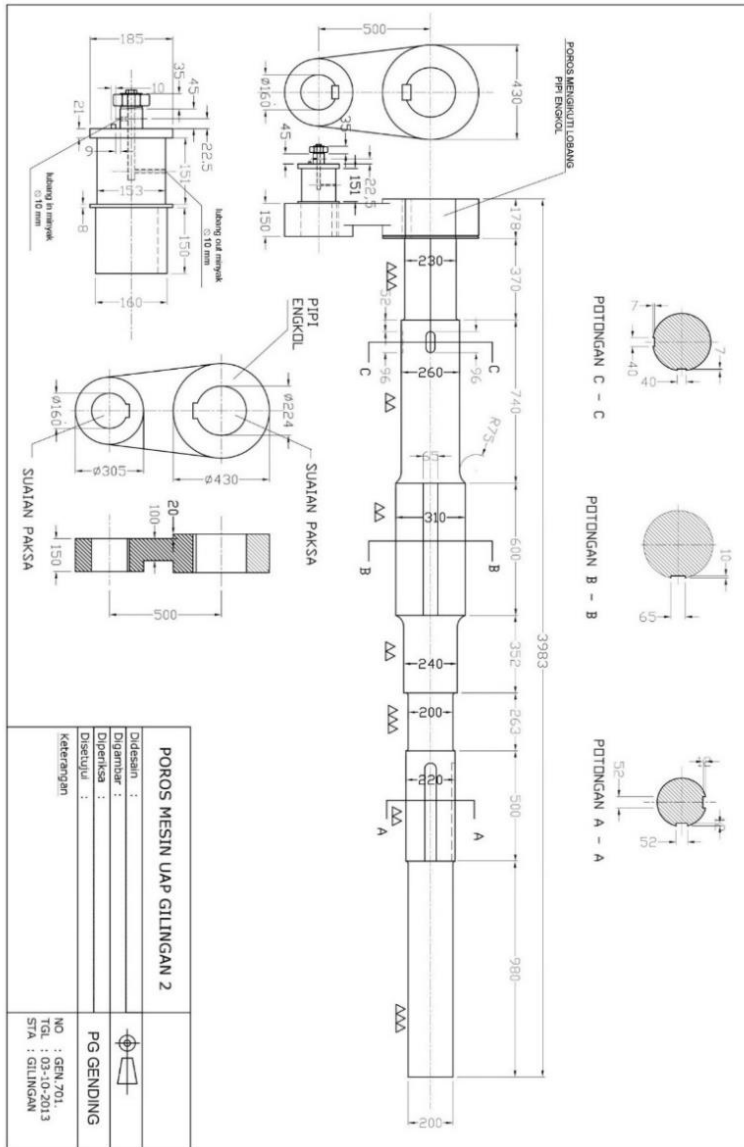
1. Poros Transmisi
Poros ini mendapat beban puntir murni atau puntir dan lentur. Daya ditransmisikan kepada poros ini melalui kopling, roda gigi, sabuk dan rantai.
2. Spindel
Spindel adalah poros transmisi yang relatif pendek, seperti poros utama mesin perkakas, dimana beban utamanya berupa puntiran. Syarat yang harus dipenuhi oleh poros ini adalah deformasinya harus kecil dan bentuk serta ukurannya harus teliti.
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)

Pada pabrik gula gending terdapat *shaft* (ditunjukkan pada Gambar 2.2) yang terletak pada mesin uap ini menghubungkan bagian *flying wheel*, engkol dan *gear* yang dihubungkan dengan mesih penggilingan. *Input* yang dihasilkan dari perputaran engkol dan *flying wheel* sebesar 54 rpm, dan direduksi dengan *gear* sebesar 2,5 rpm untuk disambungkan ke mesin penggilingan. Dimensi *shaft* sendiri ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 2 *Shaft* utama mesin uap II (PG Gending, 2018)



Gambar 2. 3 Dimensi Shaft (Manual Book PG Gending)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



2.3. Baja

Baja merupakan paduan yang terdiri dari unsur Besi (Fe), Karbon (C), dan unsur lainnya. Karbon merupakan salah satu unsur terpenting dalam campuran baja karena dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja. Baja merupakan logam yang paling banyak digunakan dibidang teknik dalam bentuk pelat, pipa, batang dan sebagainya. Secara garis besar baja dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu baja karbon dan baja paduan. Baja karbon terbagi menjadi tiga macam yaitu: baja karbon rendah ($<0,25\%C$), baja karbon sedang ($0,25-0,6\%C$), baja karbon tinggi ($0,6-1,4\%C$). Sedangkan baja paduan terdiri dari baja paduan rendah dan baja paduan tinggi. Penggunaan dari masing-masing jenis baja berbedabeda tergantung kandungan karbon pada baja tersebut. Baja karbon rendah biasanya digunakan untuk kawat, sekrup, ulir dan baut. Baja karbon sedang digunakan untuk rel kereta api, poros roda gigi. Baja karbon tinggi digunakan untuk perkakas potong seperti pisau, milling cutter.

Baja pada dasarnya adalah paduan besi-karbon. Selain terdiri dari besi dan karbon biasanya juga mengandung sejumlah unsur lain, sebagian berasal dari pengotoran pada bijih besi (misalnya silicon dan mangan). Di samping itu seringkali juga sejumlah unsur paduan sengaja ditambahkan ke dalam baja untuk memperoleh suatu sifat tertentu. Mengingat hal ini dapat dibayangkan bahwa jenis baja akan sangat banyak (Suherman, 2003)

2.4. Klasifikasi Baja Karbon

Baja karbon terdiri dari besi dan karbon, karbon merupakan unsur yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja. Selain itu karbon termasuk unsur yang paling efektif dan murah. Oleh karena itu, sebagian besar baja mengandung unsur karbon dengan kadar yang cukup besar dibandingkan dengan unsur paduan lainnya seperti Mn, P, Cu, S dan Si. Adapun pengaruh unsur paduan pada bahan baja karbon adalah :

1. *Carbon (C)*



Karbon pada baja dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja. Akan tetapi jika berlebihan akan menurunkan ketangguhan baja (*toughness*).

2. *Manganese* (Mn)

Pada umumnya semua baja mengandung mangan karena mangan sangat dibutuhkan dalam proses pembuatan baja. Mangan tidak akan memberikan pengaruh yang besar pada struktur baja dengan kadar yang rendah. Dengan adanya unsur paduan mangan pada baja akan membuat butiran struktur mikro baja lebih halus. Penambahan unsur mangan dalam baja juga dapat meningkatkan kekuatan tarik. Sehingga baja dengan adanya penambahan unsur mangan akan memiliki sifat yang kuat. Selain itu unsur mangan juga dapat mencegah terjadinya *hot shortness* (kegetasan pada temperatur tinggi).

3. *Phospor* (P)

Phospor bisa membuat baja mengalami kegetasan pada temperatur rendah. Akan tetapi *phosphor* dapat menaikkan fluiditas yang membuat baja mudah dirol panas. Kadar phospor dalam baja biasanya kurang dari 0,05%.

4. *Sulphur* (S)

Sulphur bisa membuat kegetasan pada baja di temperatur tinggi. Akibatnya baja dengan paduan unsur sulfur di temperatur tinggi akan sulit jika dilakukan pengerjaan seperti pengerolan. Kadar sulfur harus dibuat serendah-rendahnya yaitu lebih rendah dari 0,05% agar bisa mendapatkan sifat baja yang diinginkan.

5. *Silicon* (Si)

Silicon dengan kadar 3,2 % akan menurunkan kekerasan baja. Akan tetapi jika lebih akan meningkatkan kekerasan baja.



Dalam pengaplikasiannya baja karbon sering digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan alat-alat perkakas, komponen mesin dan lainnya. Baja karbon dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah persentase komposisi kimia karbon dalam baja yaitu :

1. Baja Karbon Rendah (*low carbon steel*).
Baja dengan kandungan karbon $< 0,25\%$ memiliki kekuatan sedang dengan keuletan yang baik. Baja karbon rendah biasanya digunakan untuk pembuatan jembatan, bangunan gedung, kendaraan bermotor dan kapal laut. Baja karbon rendah ini memiliki ketangguhan dan keuletan tinggi akan tetapi memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus yang rendah. Penggunaan baja karbon rendah yaitu sebagai berikut:
 - a. Sebagai pelat pada kendaraan.
 - b. Profil, batang untuk keperluan tempa.
 - c. Pekerjaan mesin dan konstruksi bangunan.
2. Baja Karbon Sedang (*medium carbon steel*).
Baja ini mengandung karbon antara $0,25\%$ sampai dengan $0,60\%$. Baja karbon ini memiliki kelebihan dibandingkan dengan baja karbon rendah. Baja karbon sedang memiliki sifat mekanis yang lebih kuat dengan tingkat kekerasan yang lebih tinggi daripada baja karbon rendah. Besarnya karbon yang terdapat dalam besi memungkinkan baja untuk dapat dikeraskan dengan memberikan perlakuan panas (*heat treatment*) yang sesuai. Baja karbon sedang dalam dunia teknik biasanya digunakan sebagai alat-alat perkakas, poros, engkol, roda gigi, ragam, pegas, dan lain lain.
3. Baja Karbon Tinggi (*high carbon steel*).
Baja yang mengandung karbon antara $0,60\%$ sampai dengan $1,4\%$. Baja karbon tinggi memiliki sifat tahan panas, kekerasan serta kekuatan tarik yang sangat tinggi akan tetapi memiliki keuletan yang lebih



rendah sehingga baja karbon ini menjadi lebih getas. Baja karbon ini sulit diberi perlakuan panas untuk meningkatkan sifat kekerasannya, hal ini dikarenakan baja karbon tinggi memiliki jumlah martensit yang cukup tinggi sehingga tidak akan memberikan hasil yang optimal pada saat dilakukan proses pengerasan permukaan. Baja karbon ini banyak digunakan untuk keperluan pembuatan alat-alat konstruksi yang berhubungan dengan panas yang tinggi atau dalam penggunaannya akan menerima dan mengalami panas, misalnya landasan, palu, gergaji, pahat, kikir, mata bor, bantalan peluru dan sebagainya. (Callister, 2014)

2.5. ASSAB 705

ASSAB 705 adalah sebuah baja paduan dengan dengan sifat *hardenability* yang baik dengan penggunaan luas pada penggunaan baja tersebut, hal tersebut dikombinasikan dengan kekuatan tinggi dan ketangguhan yang sangat baik. ASSAB 705 ditunjukkan untuk digunakan secara langsung, tidak dibutuhkan perlakuan panas. Akan tetapi, dapat diberi oli, air atau pengerasan *polymer* untuk mendapatkan kekerasan yang lebih tinggi dan sifat mekanik yang lebih tinggi sesuai dengan dibutuhkan.

Aplikasi yang sering digunakan yaitu, bagian mesin dengan kekuatan tinggi, poros, *gears*, *axle shaft*, *crankshafts*, *connecting rods*, *arbors etx.* (www.ASSAB.com).

Material ASSAB 705 memiliki standar setara baja AISI 4340. Berikut Komposisi kimia AISI 4340 ditunjukkan pada Tabel 2.1:

Tabel 2. 1 Komposisi kimia AISI 4340 (avner, 1974)

Unsur	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
(%)	0.38-	0.6-	0.2-	0.7-	1.65-	0.2-
	0.43	0.8	0.35	0.9	2.0	0.3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



2.6. Diagram Fasa Fe-Fe₃C

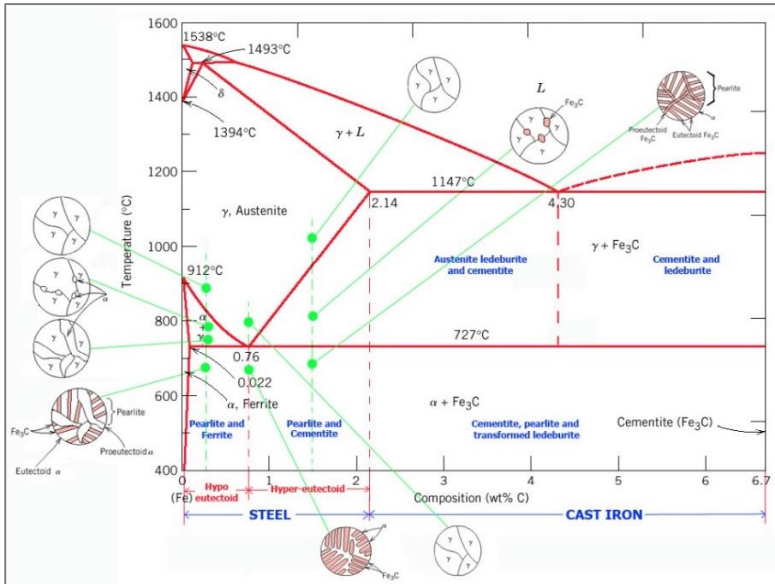
Dalam besi cair karbon dapat larut, tetapi dalam keadaan padat kelarutan karbon dalam besi akan terbatas. Selain sebagai larutan padat, besi dan karbon juga dapat membentuk senyawa interstisial (*interstitial compound*), eutektik dan juga eutektoid, atau mungkin juga karbon akan terpisah (sebagai grafit). Karena itu diagram fasa besi-karbon ada 2 macam, diagram fasa besi – karbida besi dan diagram fasa besi – grafit.

Diagram keseimbangan besi-karbon cukup kompleks, tetapi hanya sebagian saja yang penting bagi dunia teknik, yaitu bagian antara besi murni sampai senyawa interstisial-nya, karbida besi Fe₃C, yang mengandung 6,67 %C. dan diagram fasa yang banyak digunakan adalah diagram fasa besi-karbida besi, diagram Fe- Fe₃C.

Pada keadaan yang betul-betul ekuilibrium karbon akan berupa karbon bebas (grafit), sehingga akan diperoleh diagram kesetimbangan besi-grafit. Perubahan-perubahan dalam keadaan ekuilibrium berlangsung terlalu lama. Seharusnya karbida besi akan terjadi pada temperatur kamar (pada temperatur sekitar 700°C pun perubahan ini akan makan waktu bertahun-tahun). Dalam hal ini karbida besi dikatakan sebagai suatu struktur yang metastabil.

Dari Gambar 2.4 tampak bahwa diagram fasa ini memiliki tiga garis mendatar yang menandakan adanya reaksi yang berlangsung secara isothermal, yaitu:

- Pada 1493°C, kadar karbon antara 0.10-0.50 %, berlangsung reaksi peritektik.
$$L + \delta \rightarrow \gamma$$
- Pada 1147°C, kadar karbon antara 2,14-6,67 %, berlangsung reaksi eutektik.
$$L \rightarrow \gamma + Fe_3C$$
- Pada 727°C, kadar karbon antara 0.022-6.67 %, berlangsung reaksi eutektoid.
$$\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$$



Gambar 2. 4 Diagram Fasa Fe- Fe₃C (Callister, 2014)

2.7. Analisis Kegagalan

Kegagalan dapat diartikan sebagai pemeriksaan/pengujian terhadap komponen-komponen atau struktur yang mengalami kerusakan beserta kondisi yang menyebabkan kegagalan dengan tujuan untuk mengetahui. Penyebab dari kegagalan tersebut. Jadi tujuan utama dari analisis kegagalan adalah untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan serta memberikan solusi-solusi yang dapat dilaksanakan untuk menanggulangi masalah kegagalan tersebut. Dengan kata lain, analisis kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisis kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makroskopis dan mikroskopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen. Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



industry, faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat di karenakan :

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

Tabel 2. 2 Permasalahan dalam Kegagalan 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 baik	5
Material yang tidak jelas	2

2. Perawatan komponen yang kurang baik
Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.3 menunjukan data mengenai kasus kegagalan material yang 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 (pemuluran)
 - d. Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
 - e. Analisis tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat overload
4. Kondisi kerja yang ekstrim
Permasalahan yang 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 temperature tinggi	7
Korosi retak tegang, korosi lelah, pengetasan hydrogen	6
Pemuluran (<i>creep</i>)	3
Abrasi, Erosi	3

2.7.1. Prosedur dalam Analisis Kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisis kegagalan komponen



yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida, 1992):

1. Material yang digunakan
 - a. Data produksi : *melting, rolling, forming, casting, heat treatment*, dan proses *machining*.
 - b. Analisis kimia : pengujian X-Ray, komposisi kimia.
 - c. Sifat mekanik : *tensile, bending, hardness, impact*, dan *fatigue test*.
 - d. Struktur metalurgi : struktur makro dan mikro struktur.
 - e. Pengerasan permukaan dan tegangan sisa ; *finishing*.
 - f. Patah permukaan.
2. Desain tegangan dan kondisi perawatan
 - a. Kekuatan dari luar : golongan, besar, pengulangan
 - b. Atmospher : udara, air, air laut, dan sebagainya
 - c. Yang lain : kondisi perbaikan
3. Uji percobaan
 - a. Uji laboratorium : perhitungan tegangan (kekuatan material, *Finite Element Method (FEM)*, kekuatan lelah, kekerasan patahan.
 - b. Konfirmasi uji lapangan : ukuran tegangan, uji produksi.
4. Hasil uji seluruhnya.

2.8. Kelelahan

Kelelahan adalah kerusakan material yang diakibatkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum (σ_u) maupun tegangan luluh . Apabila suatu logam dikenai tegangan berulang maka logam tersebut akan patah pada tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada beban statik. Adapun mekanisme terjadinya kegagalan *fatigue* dapat dibagi menjadi 3 fase yaitu antara lain :

1. Awal Retak



Mekanisme *fatigue* umumnya dimulai dari adanya awal retakan yang terjadi di permukaan material yang lemah atau daerah dimana terjadinya konsentrasi tegangan dipermukaan akibat adanya pembebanan yang berulang.

2. Perambatan Retak

Jumlah total siklus yang menyebabkan kegagalan *fracture* merupakan penjumlahan jumlah siklus yang menyebabkan retakan awal dan fase perambatannya. Perambatan ini kemudian akan terus menjangar yang nantinya akan berujung pada *failure*.

3. Patah

Patahnya material terjadi ketika material telah mengalami siklus tegangan dan regangan yang menghasilkan kerusakan yang permanen. Ketika terjadi penjangaran retak, penampang pada bagian tersebut akan berkurang sampai pada kondisi dimana penampang pada bagian tersebut tidak mampu menahan beban yang terakhir kali. Pada tahap ini penjangaran retak yang terjadi sangat cepat sehingga struktur akan terpecah menjadi dua. Karakteristik kelelahan logam dibagi menjadi dua yaitu :

a. Karakteristik makro

Karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (dengan mata telanjang dan kaca pembesar).

b. Karakteristik mikro.

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

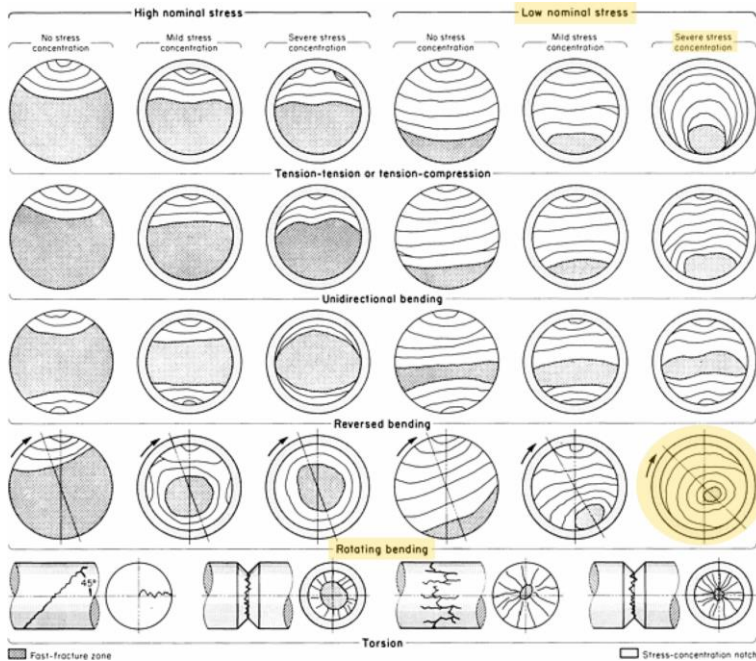
Pada dasarnya kegagalan *fatigue* dimulai dengan terjadinya retakan pada permukaan benda uji. Hal ini membuktikan bahwa sifat-sifat *fatigue* sangat peka terhadap kondisi permukaan, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kekasaran



permukaan, perubahan sifat-sifat permukaan dan tegangan sisa permukaan.

Pada dasar pola patahan *fatigue* terbagi menjadi dua bagian, yaitu pembebanan tinggi dan pembebanan rendah, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.5. Perbedaan dari keduanya dapat dilihat dari pola patahan dimana pembebanan tinggi memiliki daerah elastis lebih sedikit ketimbang daerah getas. Sedangkan, pembebanan rendah memiliki patah daerah ulet (*beach mark*) lebih banyak.

1. *Tension – compression bending* : patahan yang terjadi akibat adanya pembebanan Tarik ulur yang berulang.
2. *Unidirectional bending* : patahan yang terjadi akibat adanya pembebanan satu arah yang berulang.
3. *Reversed banding* : patahan yang terjadi akibat adanya pembebanan dua arah yang berulang.
4. *Rotating bending* : patahan yang terjadi akibat adanya pembebanan putar bolak balik yang berulang.
5. *Torion bending* : patahan yang terjadi akibat adanya pembebanan putar yang berulang.



Gambar 2. 5 Skema Pola Patahan (Van Gys, 2013)

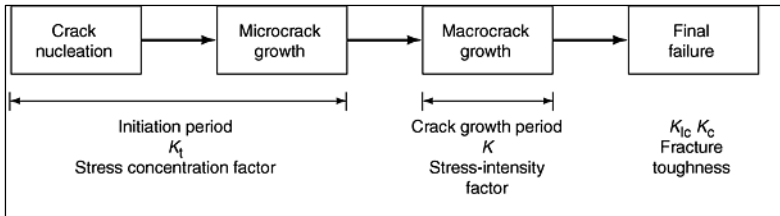
Karakteristik kelelahan logam dapat dibedakan menjadi 2 yaitu karakteristik makro dan karakteristik mikro. Karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan yang dapat diamati secara Laporan visual (dengan mata telanjang atau dengan kaca pembesar). Sedangkan karakteristik mikro hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop. (Aquan, 2007)

Menurut Schijve, terdapat 5 fase yang selama proses *fatigue*, yaitu : (ASM Handbook Committee Volume 19, 2002):

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

Fase – fase tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.14 di bawah ini

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2. 6 Mekanisme Patah Lelah dan Faktornya (ASM Handbook Vol.19 *Fatigue and Fracture*, 2002)

2.8.1. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Lelah

Faktor-faktor yang mempengaruhi atau cenderung mengubah kekuatan lelah yaitu jenis pembebanan, kelembaban lingkungan (korosi), temperatur, komposisi kimia bahan.

a. Faktor kelembaban lingkungan

Faktor kelembaban lingkungan sangat mempengaruhi kekuatan lelah sebagaimana yang telah diteliti Haftirman (1995) bahwa pada kelembaban relatif 70 % sampai 80%. Lingkungan kelembaban yang tinggi akan terkorosi dan akan mengalami retak pada permukaan spesimen yang menyebabkan kegagalan lebih cepat terjadi.

b. Tipe pembebanan

Tipe pembebanan sangat mempengaruhi kekuatan lelah sebagaimana yang diteliti oleh Ogawa (1989) bahwa baja S45S yang diberikan tipe pembebanan lentur putar dan pembebanan aksial mempunyai kekuatan lelah yang sangat berbeda, baja S45S dengan pembebanan aksial mempunyai kekuatan lelah lebih rendah dari baja yang menerima pembebanan lentur putar. (Darami, 2009)

c. Faktor temperatur

Faktor temperatur sangat mempengaruhi kekuatan lelah karena temperatur menaikkan konduktifitas elektrolit lingkungan sehingga dapat mempercepat proses oksidasi. Menurut Haftirman (1995) bahwa pada



pengujian di temperatur 40°C retakan pada spesimen memanjang dari pada pengujian di temperatur 20°C dengan retakan yang halus, karena temperatur yang tinggi menyebabkan molekul air yang terbentuk mengecil di permukaan baja sehingga mempercepat terjadinya reaksi oksidasi dan membuat jumlah pit korosi jauh lebih banyak, akibatnya pit korosi cepat bergabung membentuk retakan yang memanjang. Dieter (1986) mengemukakan secara umum kekuatan leleh baja akan turun dengan bertambahnya temperatur di atas temperatur kamar kecuali baja lunak dan kekuatan leleh akan bertambah besar apabila temperatur turun.

d. Faktor komposisi kimia

Faktor komposisi kimia sangat mempengaruhi kekuatan leleh karena apabila komposisi kimia tidak sesuai dengan standar yang sudah ada maka akan cepat mengalami kegagalan. Sebagai contoh apabila suatu baja kekurangan kadar unsur karbon maka kekerasan dan kekuatannya akan turun sehingga akan cepat mengalami patah atau kegagalan.

2.8.2. Perambatan Retak

Perambatan retak adalah tahap kedua dari ketiga tahap proses kegagalan atau kerusakan. Dalam tahap ini retak akan tumbuh dan menjalar hingga mencapai batas kritis (*critical size*). Dengan adanya perambatan retak maka suatu material akan memiliki umur (*fatigue life*) yang menandakan bahwa material tersebut sudah berada pada titik akhir dan tidak bisa menerima beban lagi. *Fatigue life* dapat ditingkatkan dengan cara :

1. Mengontrol tegangan
 - a. Peningkatan tegangan akan menurunkan umur *fatigue*.
 - b. Kegagalan *fatigue* selalu dimulai pada peningkatan tegangan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



2. Mengontrol struktur mikro.
3. Mengontrol permukaan
 - a. Dalam banyak pengujian dan aplikasi pemakaian, tegangan maksimum terjadi pada permukaan.
 - b. Umur *fatigue* sensitif terhadap kondisi permukaan.
 - c. Faktor lain yang harus dipertimbangkan adalah tegangan sisa permukaan

2.9. Macam-Macam Pengujian dalam Analisis Kegagalan

Untuk mengetahui sifat dan karakteristik suatu material diperlukan yang namanya pengujian. Berikut beberapa macam pengujian untuk material

1. Uji morfologi patahan (makro)

Pengujian yang dilakukan dengan cara visual tanpa alat bantu atau dengan alat bantu seperti *liquid penetran*, *magnetic*, dan mikroskop. Untuk mengetahui pola patahan berupa daerah titik awal patah (*initial crack*), daerah serabut menunjukkan penjaralan retak akibat *fatigue*, daerah permukaan kasar akibat pembebanan statik, dan *beach mark*.
2. Uji kekerasan

Kekerasan suatu material dapat didefinisikan sebagai ketahanan material tersebut terhadap gaya penekanan dari material lain yang lebih keras. Kebanyakan uji kekerasan menggunakan metode indentasi. Pengujian dengan metode indentasi dilakukan dengan penekanan benda uji menggunakan indenter. Kekerasan suatu material ditentukan oleh dalamnya area ataupun luas area indentasi yang dihasilkan (tergantung jenis indenter dan jenis pengujian). Pengujian Vickers Pada metode ini digunakan indenter intan berbentuk piramida dengan sudut 136° dengan beban 100kg. Prinsip pengujian adalah sama



dengan metode Brinell, walaupun jejak yang dihasilkan berbentuk bujur sangkar berdiagonal. Nilai kekerasan suatu material

3. Uji XRD

Uji XRD biasanya dilakukan untuk mengetahui fasa dari suatu material. Selain itu uji XRD juga bisa dilakukan untuk mengetahui jumlah tegangan sisa yang terdapat pada material. Mekanisme uji XRD yaitu dengan cara menembakkan elektron dan elektron akan dibiaskan. Hasil dari pembiasan akan muncul di komputer.

4. Uji SEM

Uji SEM merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakterisasi permukaan dari suatu 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.

5. Uji Metalografi

Metalografi merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui informasi-informasi yang ada didalam suatu material yang dapat diamati dengan mikroskop optik seperti fasa, butir, komposisi kimia dan sebagainya. Adapun langkah-langkah untuk melakukan uji metalografi yaitu: a. Pemilihan spesimen b. Pemotongan spesimen c. Pembungkaiian (*mounting*) d. Penggerindaan (*grinding*) e. Pemolesan (*polishing*) f. Pengetsaan (*etching*) g. Observasi pada mikroskop optik.

6. Uji Komposisi

Uji komposisi kimia merupakan suatu pengujian untuk mengetahui kandungan unsur kimia yang terdapat pada suatu logam benda uji. Komposisi kimia

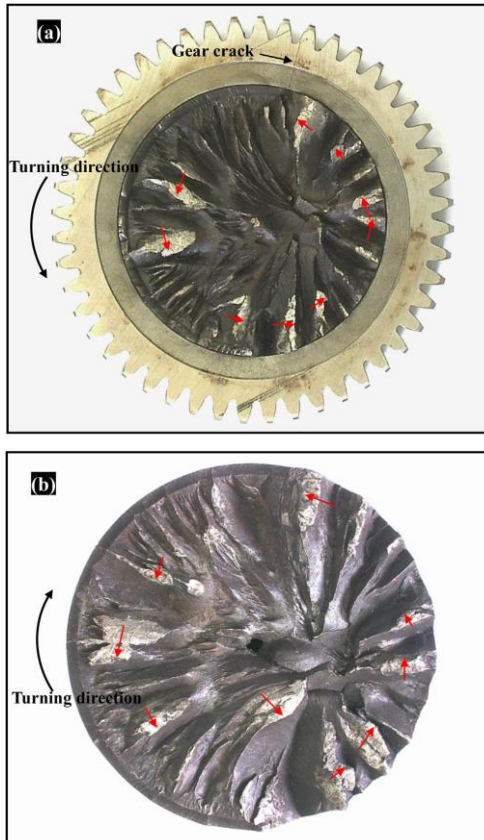


dari logam sangat penting untuk diketahui karena komposisi kimia pada logam bisa menentukan sifat dari logam tersebut. Spectrometer adalah alat yang mampu menganalisis unsur-unsur logam induk atau campurannya dengan akurat, cepat dan mudah dioperasikan.

2.10. 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, 2018)

Pada penelitiannya terkait dengan *crankshaft* mesin diesel menunjukkan bahwa patah yang terjadi berupa patah *torsion bending*, ditunjukkan pada Gambar 2.7.

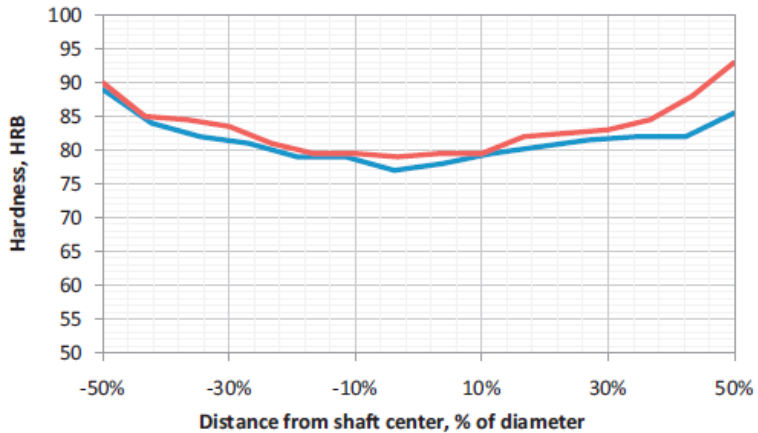


Gambar 2.7 Contoh *torsion bending* (Xiao-lei)

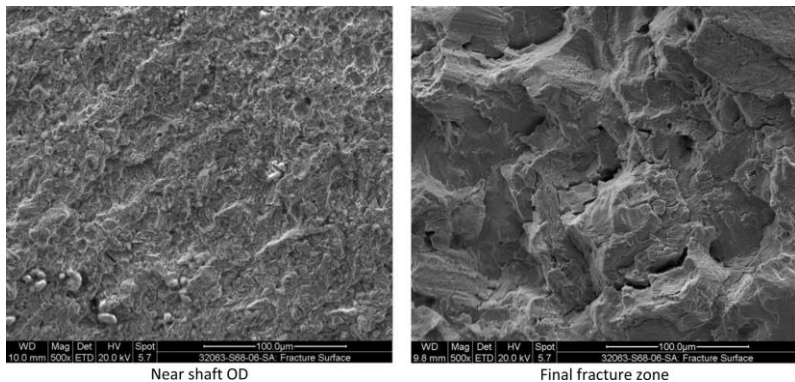
Gys Van, melakukan penelitian *failure analysis* pada *shaft* mesin katrol *conveyor* dan didapatkan adanya kegagalan akibat *fatigue*. Hal ini terjadi karena *shaft* tersebut menahan beban dari *gearbox* dan mesin penggerak. Didapatkan perbandingan kekerasan pada hasil analisis kegagalan bahwa bagian luar dari patahan memiliki kekerasan yang lebih tinggi ketimbang bagian dalam, hal ini ditunjukkan dari Gambar 2.8. Hasil dari penelitian ini juga dapat dilihat hasil pengujian sem yang menunjukkan awal

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

patahan dan akhir patahan, ditunjukkan pada Gambar 2.8. (Gys van Zyl, 2013)



Gambar 2. 8 Contoh Grafik Uji Kekerasan (Gys Van, 2013)



Gambar 2. 9 Contoh Hasil Uji SEM (Gys Van, 2013)

Pada Gambar 2.9 menunjukkan bahwa permukaan pada awal patahan (*initial crack*) memiliki permukaan yang halus, hal ini disebabkan karena material masih bisa mempertahankan kondisinya sehingga bagian-bagian ini memiliki permukaan yang



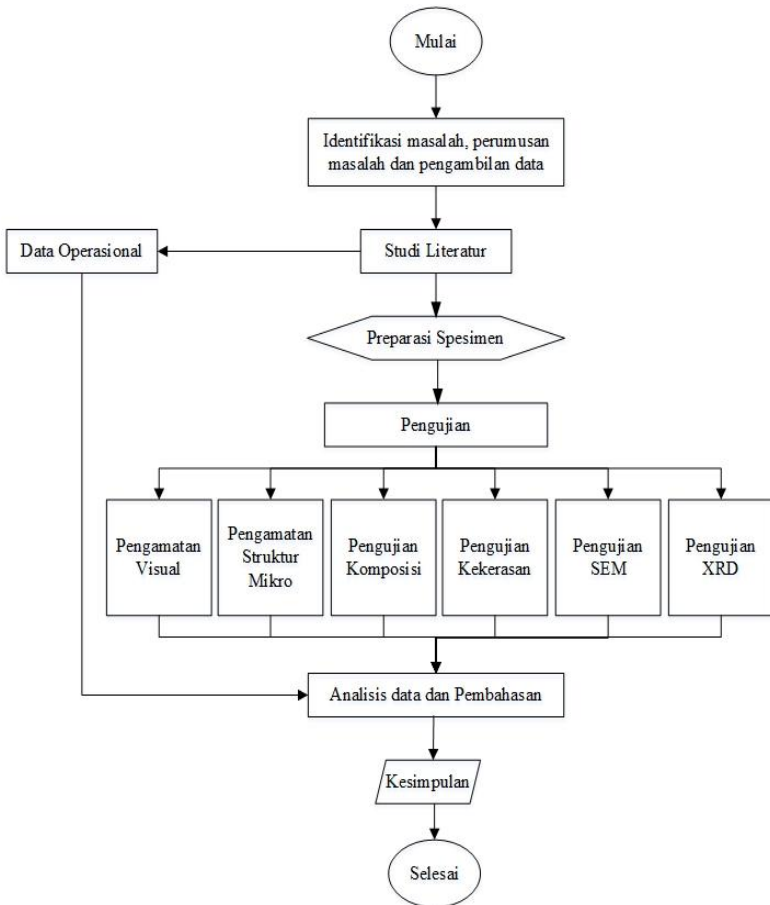
halus. Sedangkan, pada akhir patahan (*final crack*) memiliki permukaan yang kasar karena material sudah tidak bisa mempertahankan kondisinya. (Gys Van, 2013)

Santosh D. Dalvi (2017) melakukan penelitian terhadap kegagalan pada *shaft* baja karbon mesin uap. Didapatkan bahwa material dari *shaft* memenuhi standar yang ada, namun saat dilakukannya pengujian berupa FEM material mengalami pemusatan tegangan yang sangat besar pada bagian *roller*. Akibat pemusatan tegangan tersebut maka terjadi retakan dan menyebabkan penjalaran retak ke seluruh permukaan *shaft*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan berdasarkan alur yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dibawah ini



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



3.2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, studi literature dan pengujian.

Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan

Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponennya dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu Pabrik Gula Gending., dan berdiskusi dengan dosen mata kuliah, dosen pembimbing, dan pihak Pabrik Gula Gending yang ahli pada bidangnya.

2. Studi Literatur

Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, dan situs industry yang mempelajari tentang permasalahan analisis kegagalan khususnya *fatigue* pada *shaft* mesin.

3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam eksperimen ini yaitu : uji komposisi untuk mengetahui komposisi *shaft*, pengamatan makro, pengamatan struktur mikro, dan uji kekerasan menggunakan Vickers untuk mengetahui kekerasan dari *shaft* tersebut.

3.3. Material yang Digunakan

1. Material

Spesimen *Shaft* pada mesin uap II Pabrik Gula Gending mengalami patah yang diperlihatkan pada Gambar 3.2.



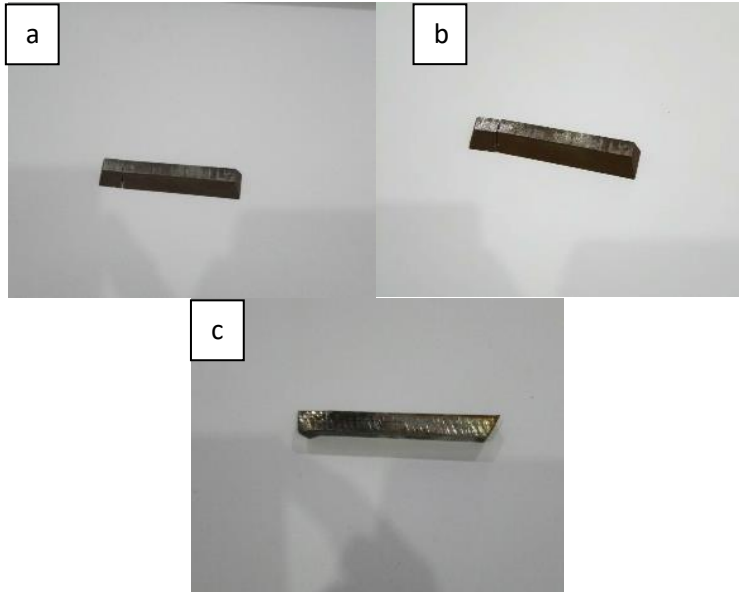
Gambar 3. 2 Penampang patahan *shaft* mesin uap

2. Spesimen

Specimen yang digunakan pada penelitian ini adalah *shaft* mesin uap II yang patah, diperlihatkan pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 berikut :



Gambar 3. 3 Daerah Pengambilan Spesimen (a) *Initial Crack* (b) *Propagation* (c) *Final Crack*



Gambar 3.4 (a) Daerah *Initial Crack* (b) Daerah *Propagation* (c) Daerah *Final Crack*

3.4. Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Penggaris digunakan untuk mengukur specimen
2. Alat pemotong digunakan untuk memotong specimen
3. Kamera digunakan untuk melihat kegagalan secara makro
4. Mesin uji kekerasan digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari specimen
5. Peralatan untuk pengujian metalografi seperti amplas *grade 80* sampai *2000*, mesin polish, dan larutan etsa
6. Mikroskop optik digunakan untuk mengetahui struktur mikro dari *shaft*
7. *Optical Emission Spectrometer* digunakan untuk mengetahui komposisi kimia unsur dari *shaft*
8. XRD digunakan untuk mengetahui fasa dan regangan mikrostruktur material *shaft*

BAB III METODOLOGI PENELITIAN



3.5. Tahapan Penelitian

3.5.1. Studi Litetur Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data-data pendukung yang berkaitan dengan material yang akan diteliti yaitu *shaft* pada mesin uap II, data yang perlu didapatkan yaitu :

1. Data operasional
2. Spesifikasi Material

3.5.2. Pengujian Komposisi Unsur Kimia

Pengujian komposisi unsur kimia diperlukan untuk mengetahui jenis dari *shaft* pada mesin uap II. Hal ini dilakukan untuk mencocokkan hasil dari pengujian komposisi unsur kimia dengan standar yang telah ditetapkan oleh Pabrik Gula Gending.

3.5.3. Pengamatan Visual

Pengamatan visual ini dibutuhkan agar mengetahui apa yang akan dilakukan dengan material sesuai kondisi kegagalan yang terjadi. Sebelum dilakukan preparasi specimen kita harus tau bagai mana yang akan diambil untuk diuji.

3.5.4. Preparasi Spesimen

Sebelum melakukan pengujian maka perlu dilakukan preparasi terlebih dahulu. Preparasi ini adalah pemotongan pada bagian *shaft* daerah patahan dan yang jauh dari daerah patahan, hal ini dilakukan untuk membandingkan dengan kondisi yang rusak dan yang masih tergolong baik.

3.5.5. Pengujian Struktur mikro

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



ditunjukkan pada Gambar 3.5. Pada pengujian metallografi dibagi menjadi dua tahap, yaitu :

1. Tahap persiapan
 - a. *Grinding* : menggosok specimen dengan kertas gosok *grade* 80-20 dan dialiri dengan air. Specimen diputar 90° atau tegak lurus terhadap arah gosokan ketikan pindah *grade*.
 - b. *Polishing* : Memoles specimen dengan pasta alumina diatas piringan yang berputar cepat. Proses ini akan menghasilkan permukaan yang mengkilat seperti cermin
 - c. *Etching* : Mencelup permukaan specimen ke dalam larutan natal. Tidak hanya dengan cara dicelupkan tetapi ada cara lain yaitu dioleskan. Pengolesan etsa natal biasanya dilakukan apabila specimen dengan cara pengetsaan yang dicelup gosong.

2. Tahap pengamatan

Tahap pengamatan dilakukan untuk mengamati struktur mikro specimen dengan mikroskop optik dengan beberapa kali perbesaran. Hal ini dimaksudkan agar struktur mikro yang akan diamati lebih jelas apabila memakai pembesaran yang sesuai.



Gambar 3. 5 Mikroskop Optik Olympus BX15M-RF

BAB III METODOLOGI PENELITIAN



3.5.6. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode Vickers dimana dalam pengujiannya memakai indenter piramida intan, pembebanan sebesar 100 kg dan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian dilakukan pada ketiga spesimen dimana dari daerah yang jauh dari patahan sampai dengan daerah dekat patahan. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 di Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material ITS.



Gambar 3. 6 Alat Uji kekerasan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* (Teknik Material, 2018)

3.5.7. Pengujian Sem

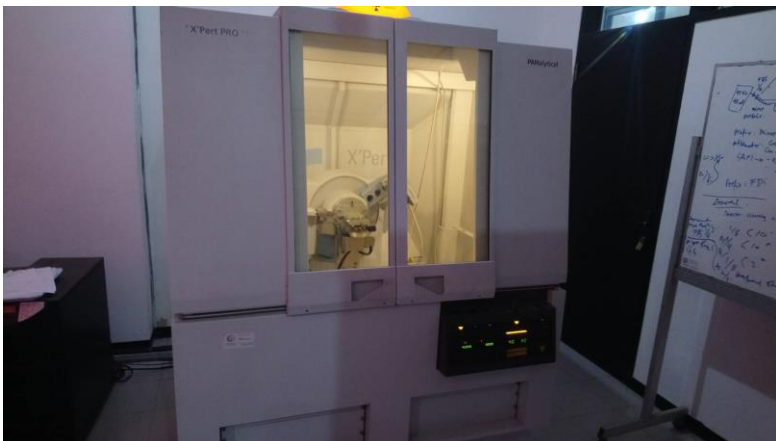
Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui informasi yang terdapat pada permukaan patahan suatu material. Pengujian ini menggunakan alat SEM FEI INSPECT milik Divisi Karakterisasi Departemen Teknik Material ITS.



Gambar 3. 7 Alat Uji SEM (Teknik Material, 2018)

3.5.8. Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui karakterisasi Kristal dari material *shaft*. Pengujian ini menggunakan alat XRD PAN Analytical Xpert Pro milik Divisi Karakterisasi Departemen Teknik Material ITS.



Gambar 3. 8 Alat Uji XRD (Teknik Material, 2018)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN



3.6. Rancangan Penelitian

Tabel 3. 1 Rancangan Penelitian

Bahan	Pengujian			
	Vickers	Strukturmikro	SEM	XRD
Daerah yang dekat dari patahan	√	√	√	√
Daerah yang jauh dari patahan	√	√	√	√



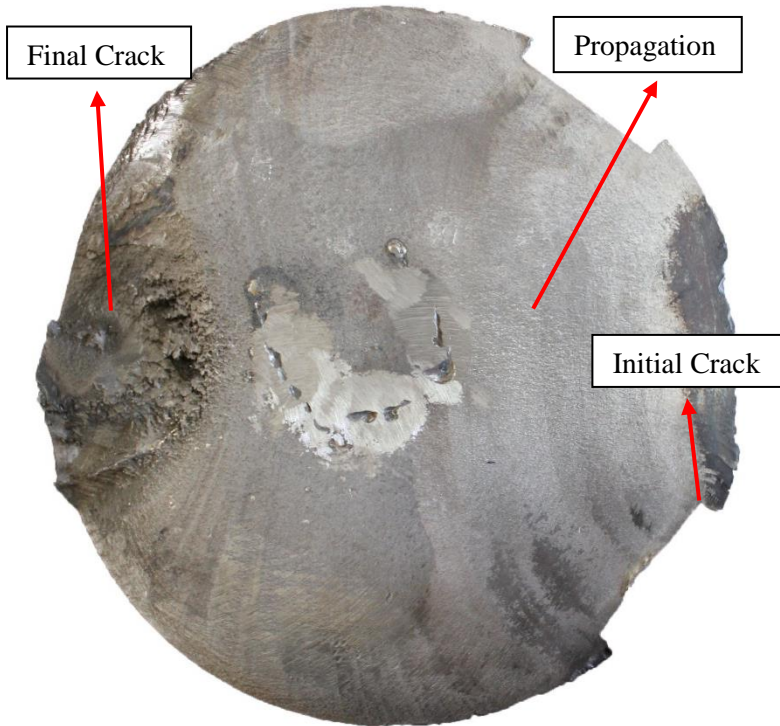
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis data

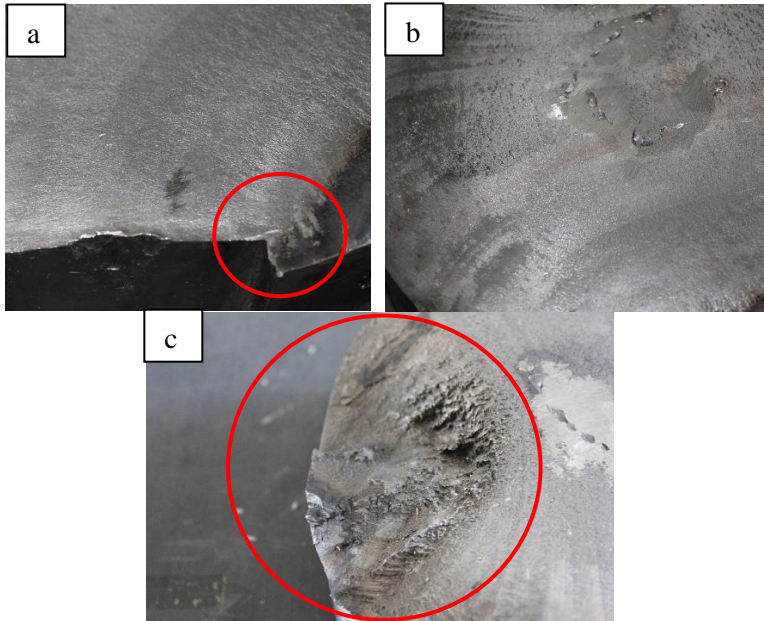
4.1.1. Hasil Pengamatan Visual

Kegagalan pada *shaft* mesin uap II Pabrik Gula Gending ditunjukkan pada Gambar 4.1



Gambar 4. 1 Permukaan patahan *Shaft* Mesin Uap II

garis-garis striasi halus terlihat jelas pada area tengah permukaan patahan. Munculnya garis-garis striasi menandakan bahwa pada *shaft* tersebut mengalami beban atau kerja yang berulang.



Gambar 4. 2 Foto Permukaan Patah *Shaft* (a) Daerah *Initial Crack*; (b) Daerah Propagasi; (c) Daerah *Final Crack*

Gambar 4.2 (a) menunjukkan area awal retakan (*crack initiation*) terletak pada daerah *keyway* dan memiliki permukaan yang cenderung halus, Gambar 4.2 (b) menunjukkan daerah perambatan retak (*crack propagation*) terdapat pada hampir seluruh permukaan patahan dan terdapat garis-garis striasi, dan Gambar 4.2 (c) menunjukkan *final fracture* yang dimana terlihat memiliki permukaan yang kasar dibandingkan dengan daerah lainnya.

4.1.2. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Material *Shaft*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia pada *shaft* dengan menggunakan EOS (*Optical Emission Spectroscopy*). Berdasarkan ASSAB 705 hasil yang didapatkan menunjukkan material yang digunakan untuk *shaft* mesin uap 2 seharusnya adalah AISI 4340.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Tabel 4. 1 Perbandingan Hasil Uji Komposisi *Shaft* dengan AISI 4340 dan AISI 1040

unsur	Kadar %		
	<i>Shaft</i>	AISI 4340	AISI 1040
C	0,387	0,370 – 0,430	0,370 – 0,440
Si	0,268	0,150 – 0,3	–
Mn	0,604	0,6 – 0,8	0,6 – 0,9
P	0,0143	0,0350	≤ 0,040
S	0,0128	0,04	≤ 0,050
Cr	0,287	0,7 – 0,9	–
Mo	0,0324	0,2 – 0,3	–
Cu	0,0175	-	–
Ni	0,0490	1,65 – 2	–
Fe	98.2	95,195 – 96, 33	98 – 99

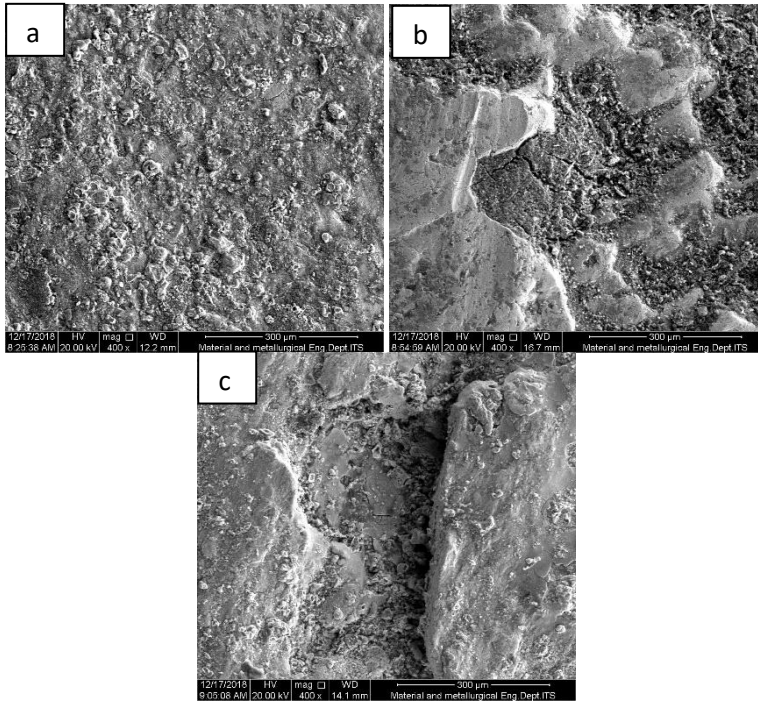
Tabel 4.1 merupakan perbandingan komposisi kimia spesimen *shaft* mesin uap 2 dengan ASSAB 705 dengan komposisi standar, yaitu AISI 4340 dan komposisi kimia AISI 1040. Jika dibandingkan dengan AISI 4340 maka terdapat perbedaan unsur, yaitu unsur Cr, Mo dan Ni. Pada *shaft* unsur Cr, Mo dan Ni berturut-turut sebesar 0,287%, 0,0324%, dan 0,0490, sedangkan pada standar AISI 4340 unsur Cr, Mo dan Ni berturut-turut sebesar 0,7%, 0,2% dan 1,65%. Namun, jika dibandingkan dengan komposisi kimia AISI 1040 maka *shaft* memiliki kesamaan pada komposisi kimianya. Sehingga, *shaft* mesin uap termasuk baja sedang atau *medium*.

4.1.3. Hasil Pengamatan SEM

Sama halnya seperti pengamatan struktur mikro, pengamatan SEM ini dilakukan juga untuk melengkapi karakterisasi pada bagian permukaan dari material yang digunakan untuk *shaft* mesin uap tersebut. Gambar 4.3 merupakan hasil pengamatan SEM pada permukaan *shaft* yang patah. Pada hasil pengamatan SEM tersebut terlihat jelas adanya retakan dan juga



terdapat garis-garis striasi halus pada permukaan patahan *shaft* tersebut.



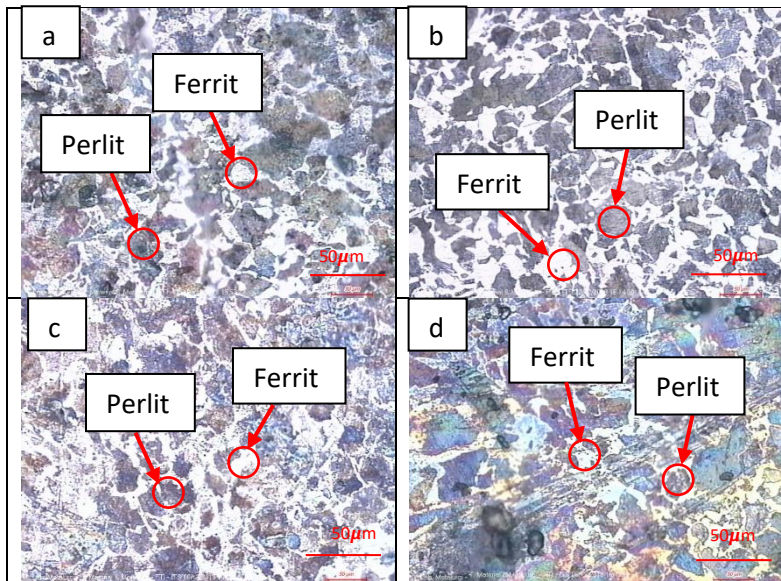
Gambar 4.3 Fraktografi Pada Patah *Shaft* dengan pembesaran 400x (a) Pada Daerah *Initial Crack* (b) Pada Daerah *Propagation* (c) Pada Daerah *Final Crack*

4.1.4. Hasil Pengamatan Mikro Material *Shaft*

Pengamatan struktur mikro menggunakan alat mikroskop optik. Pengamatan struktur mikro dilakukan pada 4 daerah, yaitu pada daerah dekat *initial crack*, *propagation*, *final crack* dan daerah jauh dari patahan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah ada perubahan yang terjadi pada 4 daerah tersebut

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada hasil pengamatan struktur mikro terdapat 2 fasa yang diperoleh yaitu fasa ferit dan perlit. Hal ini sesuai dengan penjelasan pada diagram fasa Fe-Fe₃C bahwa baja dengan kadar karbon 0,4%C memiliki fasa ferit dan perlit. Gambar 4.3 a merupakan gambar pada daerah dekat *initial crack*, Gambar 4.3 b merupakan gambar pada daerah dekat *propagation*, Gambar 4.3 c merupakan gambar pada daerah dekat *final crack*, sedangkan Gambar 4.3 d merupakan gambar pada daerah jauh dari patahan.



Gambar 4. 4 Struktur Mikro *Shaft* Menggunakan Etsa Nital dengan pembesaran 200x (a)Daerah *Initial Crack* Dekat Dengan Patahan (b)Daerah *Propagation* Dekat Dengan Patahan (c)Daerah *Final Crack* Dekat Dengan Patahan (d)Daerah yang Jauh Dari Patahan

**Tabel 4. 2** Persentase Fasa Hasil Struktur mikro dengan *Fiji Apps*

Zona	Persentase Struktur mikro	
	Ferrit (%)	Perlit (%)
<i>Initial crack</i>	49,1	50,9
<i>Prapagation</i>	48,9	51,1
<i>Final crack</i>	48,4	51,6
Jauh dari Patah	48,6	51,4

Pada hasil pengamatan struktur mikro terdapat perbedaan pada besar kecil butir tiap zona. Menurut ASTM E112, maka didapatkan nilai *Grain Size* tiap zona yang ditunjukkan pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Nilai *Grain Size* Menurut ASTM E112

Zona Patahan	Nilai <i>Grain Size</i> (G)
<i>Initial crack</i>	8,2969
<i>Propagation</i>	7,7789
<i>Final crack</i>	8,4495
Daerah dari patahan	7,0788

4.1.5. Hasil Pengujian Kekerasan Material *Shaft*

Pengujian kekerasan pada material *shaft* mesin uap 2 dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dari material tersebut. Pengujian menggunakan 3 sampel yaitu yang pertama pengujian dilakukan pada daerah dekat *initial crack*, daerah *propagation*, dan daerah *final crack*. Pada setiap sampel dilakukan 6 kali indentasi menggunakan metode *Vickers*, yang dimulai dari titik dekat dengan patahan sampai daerah yang jauh dari patahan.

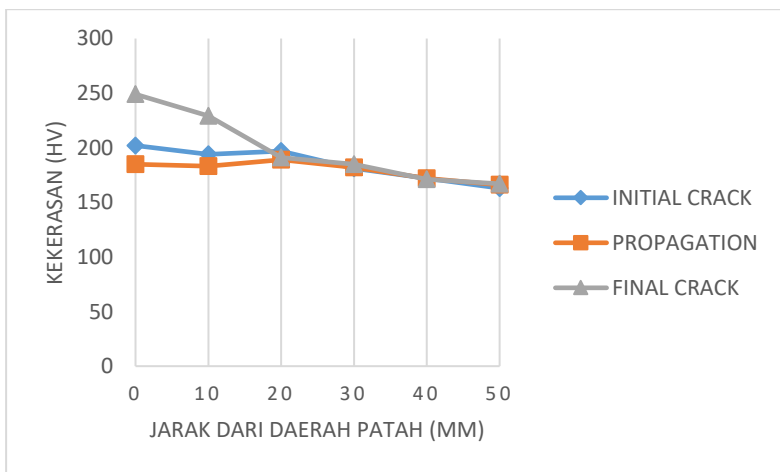
Tabel 4. 4 Distribusi kekerasan *shaft* dari bagian yang patah hingga bagian terjauh dari patahan

Zona Patah	Jarak Dari Patahan (mm)	Kekerasan (HV)
<i>Initial Crack</i>	0	202
	10	194

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Zona Patah	Jarak Dari Patahan (mm)	Kekerasan (HV)
	20	197
	30	181
	40	172
	50	163
<i>Propagation</i>	0	185
	10	183
	20	189
	30	182
	40	175
	50	166
<i>Final Crack</i>	0	249
	10	229
	20	191
	30	185
	40	171
	50	167



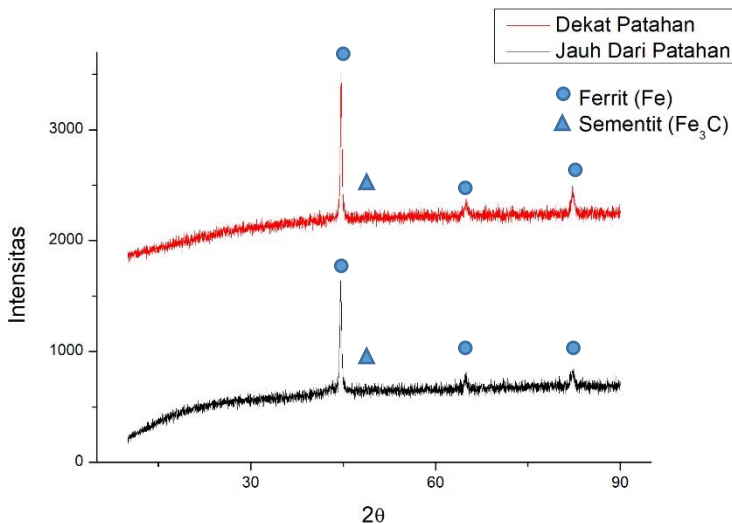
Gambar 4. 5 Pebandingan Kekerasan Pada Daerah *Initial Crack*, *Propagation*, dan *Final Crack*.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



4.1.6. Hasil Pengujian XRD

Pengujian XRD bertujuan untuk menganalisis regangan kristal dengan metode *William-Hall* pada material *shaft* Mesin uap II. Analisis menggunakan program *origin* dan *Match* berdasarkan data pengujian XRD. Hasil *output* dari program *origin* dan *Match* dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan hasil perhitungan regangan kristal pada material *shaft* mesin uap II dapat dilihat pada tabel.



Gambar 4. 6 Hasil Uji XRD pada Daerah yang Dekat dan Jauh dari Patahan

Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Regangan Kristal

Zona Patahan	FWHM (2Θ)	Regangan Kristal
Jauh Dari Patahan	0,1338	0,000142
Dekat Patahan	0,5353	0,000569

4.2. Pembahasan

Shaft mesin uap tersebut menerima pembebanan secara terus menerus baik dari mesin uap maupun dari mesin uap 2. Hasil

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



perhitungan tegangan akibat torsi dan bending menunjukkan bahwa komponen *shaft* bekerja pada tingkat tegangan principal sebesar 18,6 MPa. Tegangan ini relatif kecil bila dibandingkan dengan kekuatan yield material, namun apabila terdapat kecacatan di bagian daerah awal patahan (*initial crack*). Maka cacat kecil tersebut akan merambat (*propagation*). Tegangan yang rendah tersebut juga mengakibatkan daerah propagasi menjadi lebih besar dibandingkan daerah akhir patahan (patah statik). Namun, ketika luasan dari komponen hanya tersisa 2827,433 mm² maka komponen mengalami tegangan principal sebesar 922,22 MPa. Tegangan principal ini meningkat akibat penampang komponen semakin kecil sehingga menghasilkan patah statis di akhir patahan (*final crack*).

Jika dilihat dari pola patahannya maka material *shaft* tersebut mengalami patahan berupa *rotating bending* dengan ditandai adanya garis-garis strisasi pada seluruh permukaan material patahan. *Rotating bending* adalah patahan akibat bending dan torsi pada material tersebut, dimana bending disini akibat menahan berat gear dan torsi akibat putaran dari mesin uap sendiri. Material tersebut patah pada bagian *gear*, dimana pada bagian ini gear tersebut memberikan tegangan ke *shaft* dan pada bagian ini terdapat pemusatan tegangan. Area paling umum menjadi awal patahan adalah konsentrasi tegangan yang terjadi pada radius terkecil pada *keyway* dan sudut-sudut yang tajam pada area penampang yang melintang pada poros (Setiawan, 2016).

Perbedaan komposisi kimia pada *shaft* mesin uap yang seharusnya AISI 4340 dan ternyata memiliki komposisi AISI 1040 membuat sifat mekanik tidak sesuai dengan standar yang ada. Perbedaan sifat mekanik yang berbeda berdasarkan Callister, 2014 yaitu sifat *fatigue strength*, *shear strength*, dan *tensile strength*. Secara berturut-turut untuk AISI 1040 memiliki nilai sebesar 340 MPa, 390 MPa, dan 540 MPa, dan berturut-turut untuk AISI 4340 memiliki nilai sebesar 740 MPa, 770 MPa, dan 1150 MPa.

Penambahan unsur paduan kedalam campuran baja mempunyai tujuan, yaitu untuk meningkatkan sifat mekanik dari

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



baja tersebut (Suherman, 1999). Kurangnya sifat mekanik yang diinginkan pada *shaft* mesin uap II tersebut dapat mengakibatkan kegagalan material berupa kesalahan pemilihan material. Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominan adalah faktor kesalahan dalam pemilihan material, hasil dari statistik untuk kesalahan pemilihan material memiliki nilai yang paling besar yaitu sekitar 38% dalam kasus kegagalan material yang ada (Brooks, 2002).

Hasil uji SEM terlihat pada permukaan patahan terdapat garis striasi halus. Garis striasi yang timbul disebabkan karena adanya pembebanan berulang yang dialami oleh komponen sebelum patah. Pada Gambar 4.3 merupakan hasil dari uji SEM pada permukaan patahan *shaft*. Gambar (a) merupakan dari daerah awal retakan ditunjukkan dengan permukaan yang halus. Pada Gambar 4.3 (b) menunjukkan adanya retakan dan arah dari propagasi. Di daerah tersebut juga terlihat adanya garis striasi halus. Adanya retakan menandakan awal terjadinya kegagalan pada material *shaft*. Pembebanan berulang dan terus menerus yang dialami oleh komponen menyebabkan retak yang terbentuk dan mudah menjalar hingga akhirnya mencapai dimensi yang cukup signifikan untuk menyebabkan komponen patah (Sutowo, 2014). Pada Gambar 4.3 (c) merupakan hasil uji SEM pada daerah akhir patahan. Dari hasil SEM tersebut terlihat patahan lebih kasar dan lebih gelap.

Dari pengujian struktur mikro pada Gambar 4.4 didapatkan struktur mikro ferrit dan perlit yang mendukung karakterisasi material ini sebagai baja karbon sedang atau *medium*. Pada Gambar 4.4 (d) menunjukkan hasil pengujian struktur mikro material *shaft* di daerah yang jauh dari patahan. Terlihat hasil dari pengujian struktur mikro tersebut terdapat 2 fasa yaitu fasa ferrit dan perlit. Hal ini sesuai dengan diagram Fe-Fe₃C bahwa struktur mikro dengan kadar karbon 0,4%C adalah Ferrit dan perlit (Moolwan, 2013). Berdasarkan hasil perhitungan persentase fasa dengan menggunakan aplikasi *FIJI APPS* menunjukkan bahwa material *shaft* memiliki persentase fasa ferrit dan perlit sesuai hasil

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



perhitungan menggunakan *level rule* dengan selisih yang tidak terlalu signifikan, dimana kadar perlit dan ferrit berturut-turut berdasarkan hasil dari *level rule*, yaitu sekitar 49,5% dan 50,5%.

Sekilas pada Gambar 4.4 terlihat tidak ada yang berubah karena struktur yang terbentuk tetap ferit dan perlit. Akan tetapi, strukturmikro di daerah yang dekat patahan terlihat butirnya semakin mengecil dapat dilihat pada Tabel 4.3 dimana nilai *grain size* pada dekat patahan lebih besar sedangkan jauh dari patahan nilai *grain size* lebih kecil, hal ini terjadi karena adanya *strain hardening*. Bahan yang mengalami pembebanan pada umumnya terjadi peningkatan tegangan dalam yang dikenal dengan *strain hardening*. Beban khususnya beban tarik yang dikenakan pada bahan maka bahan mengalami reaksi terhadap beban tersebut dengan mengalami deformasi dalam hal ini mengalami regangan/strain. Semakin besar tegangan tarik yang diberikan maka semakin besar pula kekerasan yang terjadi pada bahan (Rusianto, 2008).

Hasil uji kekerasan yang dilakukan pada 3 daerah yaitu daerah *initial*, *propagation* dan *final*, dimana setiap daerah diambil 6 titik dari daerah dekat dengan patahan sampai daerah yang jauh dari patahan. Dapat dilihat pada Gambar 4.5 bahwa daerah yang dekat dengan patahan memiliki rata-rata nilai kekerasan yang lebih besar dibandingkan daerah yang jauh dari patahan, semakin dekat dengan patahan maka nilai kekerasan semakin besar pula. Hal ini terjadi karena adanya deformasi yang terdapat pada daerah dekat patahan membuat kekerasan meningkat (efek *strain hardening*) (Fuller, 2007).

Gambar 4.5 juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan nilai kekerasan pada daerah *initial crack*, *propagation* dan *final crack* yang berada pada daerah dekat dengan patahan. Nilai kekerasan tertinggi pada daerah *final crack* yaitu sebesar 249 HV. *Final crack* yang terjadi merupakan patah plastis, dimana patah plastis mempunyai deformasi yang sangat besar (Bhattacharyya, 2007), sehingga pada daerah *final crack* mempunyai kekerasan yang paling besar karena mempunyai deformasi yang paling besar,



dimana semakin tinggi daerah deformasi maka kekerasan semakin besar pula. Sedangkan pada daerah *propagation* memiliki nilai kekerasan yang paling rendah karena deformasi yang terjadi lebih kecil ketimbang daerah lainnya.

Untuk menunjang hasil penelitian, dilakukan pula pengujian menggunakan sinar X, atau disebut XRD. Sinar X yang dipancarkan alat uji XRD menumbuk atom-atom Fe pada baja yang tersusun dalam tatanan struktur kristal tertentu. Berpendarnya sinar akibat menumbuk atom-atom inilah yang kemudian dibaca oleh sensor untuk mengetahui struktur kristal dari spesimen yang diuji. Struktur kristal tersebut dapat menyatakan fasa dari baja yang diuji, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Hasil pengujian XRD menunjukkan bahwa struktur kristal yang terbentuk adalah BCC (fasa ferrit) dan *Orthorhombik* (fasa sementit), ditunjukkan pada Gambar 4.6. Berdasarkan hasil dari pengujian XRD sendiri dapat dihitung regangan kristal dapat dilihat dari Tabel 4.5, bahwa daerah pada dekat patahan memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan daerah yang jauh dari patahan. Hal ini sesuai dengan yang dijelaskan oleh (Rusianto, 2008) bahwa semakin besar tegangan dalam atau regangan kristal yang terbentuk dapat menyebabkan kerusakan atau perpatahan pada material jika tegangan tersebut melebihi kemampuan kekuatan dari material tersebut. Pelebaran puncak disebabkan oleh regangan sisa tak merata yaitu akibat terbentuknya sub-butir, butir melengkung dan adanya dislokasi. Regangan sisa tersebut disebabkan oleh tegangan yang berada dalam butir (Sugondo, 2007)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang di dapat dari penelitian ini yaitu :

1. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan beberapa faktor yang menyebabkan material *shaft* mengalami patah:
 - a. Kesalahan komposisi kimia material tidak sesuai dengan standar yang telah ditetapkan oleh Pabrik Gula Gending. Material *shaft* seharusnya memiliki standar ASSAB 705 dengan komposisi AISI 4340 namun berdasarkan hasil penelitian menunjukkan material memiliki komposisi AISI 1040.
 - b. Pola patahan yang terlihat *rotating bending*. Ditandai dengan adanya awal retakan (*initial crack*) pada daerah *keyway*, dilanjutkan dengan adanya penjalaran retak (*propagation*) yang ditandai dengan adanya garis striasi halus dan akhir patahan (*final crack*) pada daerah dengan permukaan yang kasar.
2. Mekanisme kegagalan pada material *shaft* ini disebabkan karena adanya beban yang berulang dan 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*.
3. Hal hal yang dapat dilakukan untuk mencegah agar tidak terjadi kegagalan yaitu melakukan analisis komposisi material pada *shaft* ataupun pada material lainnya sebelum digunakan. Hal ini penting karena jika terjadi kesalahan pemilihan material maka besar kemungkinan maka material tersebut mengalami kegagalan material.



5.2. Saran

Adapun saran yang diberikan penulis untuk Pabrik Gula Geding adalah :

1. Pembelian *shaft* harus disertakan dengan sertifikat komposisi kimia dan sifat mekanik sesuai dengan standar yang telah ditetapkan oleh pihak Pabrik Gula Gending sendiri
2. Mengurangi adanya sudut sudut tajam pada desain *shaft* untuk mencegah kemungkinan terjadinya retakan

DAFTAR PUSTAKA

- _____, 1990. ASM Handbook Volume 1 : *Properties and Selection: Irons Steel and High Performance Alloys*. USA: ASM International
- _____, 2003. ASTM A29/A29M-03 : *Standard Specification for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought and Cold-Finished, General Requirements for*. Material Park: ASTM International
- _____, 2003. ASTM A291-03 : *Standard Specification for Steel Forgings, Carboon and Alloy, for Pinions, Gears and Shaft for Reduction Gears*. Material Park: ASTM International
- _____, 2007. ASTM E3-01 : *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Material Park: ASTM International
- _____, 2003. ASTM E92-82 : *Standard Test Method for Vickers Hardness for Metallic Material*. Material Park: ASTM International
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Co
- Basselo, Daswin dkk. 2014. *Optimasi Diameter Poros Terhadap Variasi Diameter Sproket pada Roda Belakang Sepeda Motor*. Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi
- Bhattacharyya, Sandip dkk. 2007. *Failure Analysis of an Input Shaft of Skip Drive Gearbox*. India
- Brooks, Charlie and Choudhury, Ashok. 2002. *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York: McGraw-Hill
- Callister Jr, William D. 2014. *Materials Science and Engineering an Introduction, 9th Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, Hoboken
- Darami, Asy'ari Yunus. 2009. *Struktur dan Sifat Material*. Jakarta: Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Darma Persada
- Dalvi, Santosh D dkk 2017. *Failure Analysis of A Carbon Steel Roller Shaft of Continuous Pad Steam Machine*.


- Mumbai: Lokmanya Tilak Collage of Engineering, University of Mumbai. India
- Dieter, George E. 1987. *Mechanical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Fuller, R.W dkk. 2007. *Failure Analysis of AISI 304 Stailess Steel Shaft*. USA
- Haftirman, S. Hattori, and T. Okada. 1995. *Fatigue Strength of Structural Steel in High-Humidity Environment*. Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers. Japan, vol. A 61-586, pp. 1179-1184.
- Moolwan, Charmont dkk. 2013. *Failure Analysis of a two High Gearbox Shaft*. Bangkok
- Nishida, Shin-ichi. 1992. *Failure Analysis in Engineering Application*. Oxford: Butterworth- Heinemann
- Rusianto, Toto. 2008. *Pengaruh Tegangan Dalam (Internal Stress) terhadap Laju Korosi pada Baut*. Yogyakarta: Teknik Mesin FTI IST AKPRIND
- Setiawan, Angga dan Witantyo. 2016. *Analisa Kegagalan Poros Pompa Centrifugal Multistage (GA101A) Sub Unit Sintesa Urea PT. Petrokimia Gresik*. Surabaya: Teknik Mesin FTI ITS
- Suherman, Wahid. 1999. *Ilmu Logam II*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Suherman, Wahid. 2003. *Ilmu Logam I*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sugiarto, Teguh dkk. 2013. *Analisis Uji Ketahanan Lelah Baja Karbon Sedang AISI 1045 dengan Heat Treatment (Quenching) dengan Menggunakan Alat Rotary Bending*. Lampung: Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung
- Sugondo, 2007. *Pengaruh Deformasi pada Karakteristik Kristalit dan Kekuatan Luluh Zircaloy-4*. Batan. Serpong
- Sutowo, Cahya dkk. 2014. *Analisa Kegagalan pada Poros Baja Karbon S45C Aplikasi Komponen As Sink Roll*. Tangerang: Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI.

- Terrell, Craft. 1922. ***STEAM-ENGINE PRINCIPLES AND PRACTICE***. New York : McGRAW-HILL BOOK COMPANY
- Xiao-lei, Zhi-wei. 2013. ***Failure analysis of a truck diesel engine crankshaft***. China : Dalian Maritime University
- Van, Gys Zyl. 2013. ***Failure Analysis of Conveyor Pulley Shaft***. Saudi Arabia: SABIC T&I Jubail xxi


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. Hasil Uji OES



PT. LOGAMINDO SARIMULIA
IRON AND STEEL FOUNDRY
Telp : (62-31) 8544540 - 41 Fax : (62-31) 8544542
E-mail : Lisafoundry@gmail.com
www.logamindosarimulia.com



Method: Fe-10-F IARM 200C
Comment: Low alloy Steel
Sample Name: PORROS
Quality: Element concentration

10/11/2018 3:23:22 PM

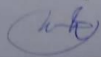
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.388	0.271	0.602	0.0143	0.0109	0.289	0.0323	0.0485
2	0.392	0.270	0.619	0.0157	0.0145	0.288	0.0341	0.0491
3	0.381	0.263	0.589	0.0130	0.0131	0.283	0.0307	0.0494
< x > (3)	0.387	0.268	0.604	0.0143	0.0128	0.287	0.0324	0.0490
sd	0.0055	0.0046	0.0151	0.0014	0.0018	0.0032	0.0017	0.0046
rsd	1.4	1.7	2.5	9.7	14.1	1.1	5.2	0.9

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0611	0.0062	0.0177	< 0.0010	0.0096	0.0029	< 0.0100	< 0.0030
2	0.0607	0.0060	0.0174	< 0.0010	0.0159	0.0030	< 0.0100	< 0.0030
3	0.0608	0.0059	0.0175	< 0.0010	0.0090	0.0027	< 0.0100	< 0.0030
< x > (3)	0.0609	0.0060	0.0175	< 0.0010	0.0115	0.0029	< 0.0100	< 0.0030
sd	0.00021	0.00014	0.00019	0.00000	0.00038	0.00019	0.00000	0.00000
rsd	0.3	2.3	1.1	0.0	33.4	6.6	0.0	0.0

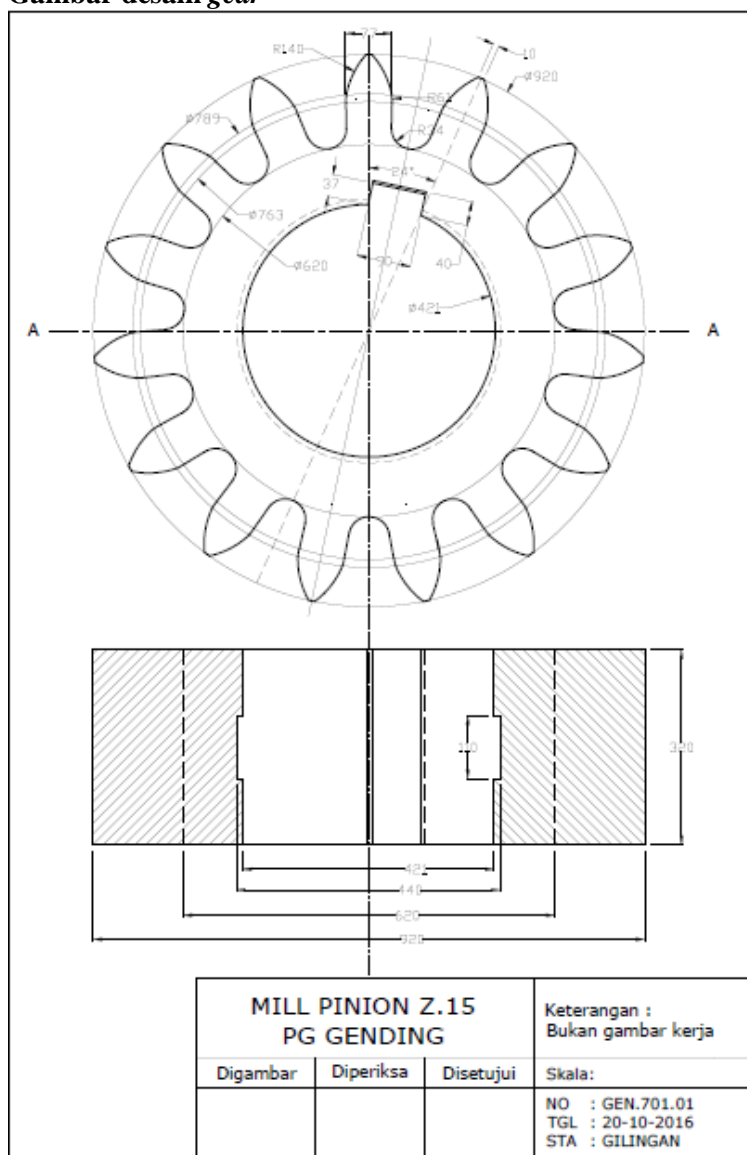
	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	B	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0013	0.0051	< 0.0015	< 0.0040	0.0016	< 0.0030	0.00042	< 0.0020
2	0.0024	0.0083	< 0.0015	< 0.0040	0.0015	< 0.0030	0.00052	< 0.0020
3	0.0016	0.0065	< 0.0015	< 0.0040	0.00054	< 0.0030	0.00054	< 0.0020
< x > (3)	0.0018	0.0067	< 0.0015	< 0.0040	0.0012	< 0.0030	0.00048	< 0.0020
sd	0.00059	0.0016	0.00000	0.00000	0.00060	0.00000	0.00006	0.00000
rsd	33.2	24.3	0.0	0.0	48.8	0.0	12.7	0.0

	La	Fe	Sb	Te
	%	%	%	%
1	< 0.0010	98.2	< 0.0010	0.0016
2	< 0.0010	98.2	< 0.0010	0.0022
3	< 0.0010	98.2	< 0.0010	0.0023
< x > (3)	< 0.0010	98.2	< 0.0010	0.0021
sd	0.00000	0.0355	0.00000	0.00036
rsd	0.0	0.0	0.0	17.7

Tanda tangan



2. Gambar desain gear



3. Perhitungan massa gear

$$\text{Volume gear} = 83059,3 \text{ cm}^3$$

$$\text{density gear } (\rho) = 7,87 \text{ gr/cc (AISI 1040)}$$

$$\text{Massa} = \text{density gear} \times \text{volume}$$

$$\text{Massa} = 7,87 \text{ gr/cc} \times 83059,3 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa} = 677,4247308 \text{ kg}$$

4. Gambar tempat shaft mesin uap 2



5. Data hasil uji kekerasan

a. Dearah *Initial Crack*

Titik	D1	D2	HV
1.	0,489	0,556	202
2.	0,516	0,556	194
3.	0,566	0,498	197
4.	0,556	0,554	181
5.	0,538	0,544	172
6.	0,566	0,602	163
Rata-rata			184,83

b. Daerah *Propagation*

Titik	D1	D2	HV
-------	----	----	----

1.	0,548	0,552	185
2.	0,546	0,558	183
3.	0,548	0,538	189
4.	0,542	0,564	182
5.	0,564	0,562	175
6.	0,566	0,592	166
Rata-rata			180

c. Daerah *Final Crack*

Titik	D1	D2	HV
1.	0,472	0,474	249
2.	0,492	0,492	229
3.	0,544	0,536	191
4.	0,558	0,538	185
5.	0,564	0,576	171
6.	0,600	0,554	167
Rata-rata			198,667

6. Hasil Pengujian XRD

Selection Criteria

Elements:

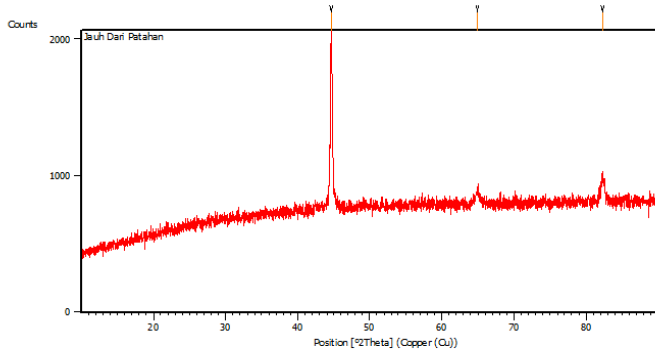
Elements that must be present: Fe

Elements that must NOT be present: All elements not mentioned above

Peak List

No.	2theta [°]	d [Å]	I/I0	FWHM	Matched
1	14.61	6.0624	47.00	0.1671	
2	32.29	2.7729	41.37	0.1337	
3	35.04	2.5607	52.42	0.1003	
4	44.64	2.0298	1000.00	0.2674	A ▲
5	45.11	2.0098	102.07	0.0668	
6	48.56	1.8749	54.10	0.1003	
7	69.26	1.3566	57.52	0.1003	▲
8	69.84	1.3468	55.62	0.1003	
9	76.08	1.2511	52.33	0.1003	
10	78.14	1.2232	74.14	0.1337	
11	82.08	1.1741	113.82	0.1671	
12	82.24	1.1722	178.24	0.3342	A ▲

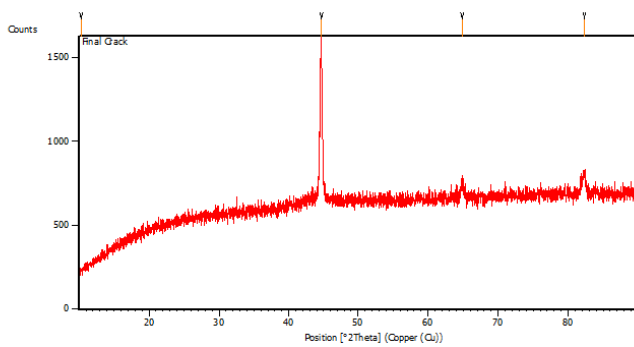
a. Daerah Jauh dari Patahan



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6369	1275.15	0.1338	2.03010	100.00
64.9670	105.98	0.5353	1.43549	8.31
82.2335	201.42	0.2676	1.17236	15.80

b. Daerah Dekat Patahan



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.2955	2.14	0.5353	8.59229	0.23
44.6156	930.05	0.1004	2.03101	100.00
64.8812	88.52	0.3346	1.43718	9.52
82.3154	111.19	0.3346	1.17140	11.96

7. Perhitungan Regangan Mikrostruktur

a. Daerah Jauh dari Patahan

$$FWHM = 0,1338 \ 2\Theta$$

$$\text{Position} = 44,6369 \ 2\Theta$$

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

$$\beta_{(2\theta)} = 0,1338 \times \frac{\pi}{180}$$

$$\beta_{(2\theta)} = 2,335 \times 10^{-3} \text{rad}$$

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

$$\varepsilon = \frac{2,335 \times 10^{-3} \text{rad}}{4} \times \frac{\cos 22,318}{\sin 22,318}$$

$$\varepsilon = 1,42 \times 10^{-3}$$

b. Daerah Dekat Patahan

$$FWHM = 0,5352 \ 2\Theta$$

$$\text{Position} = 44,6156 \ 2\Theta$$

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

$$\beta_{(2\theta)} = 0,5352 \times \frac{\pi}{180}$$

$$\beta_{(2\theta)} = 9,342 \times 10^{-3} \text{rad}$$

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

$$\varepsilon = \frac{9,342 \times 10^{-3}}{4} \times \frac{\cos 22,318}{\sin 22,318}$$

$$\varepsilon = 5,69 \times 10^{-3}$$

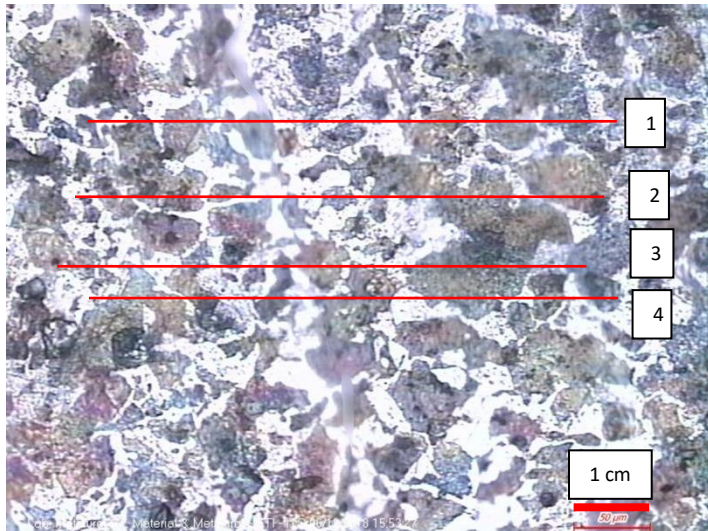
8. Perhitungan level rule ferrit perlit

$$\alpha = \frac{0,8 - 0,4}{0,8 - 0,008} \times 100\% = 50,5\%$$

$$\text{perlit} = \frac{0,4 - 0,008}{0,8 - 0,008} \times 100\% = 49,5\%$$

9. Perhitungan *Grain Size*

a. Pada daerah *Initial Crack*



Garis	Jumlah Perpotongan Butir
1.	21
2.	19
3.	18
4.	19
Total	77

$$M = \frac{\text{Panjang Garis}}{\text{Skala}}$$

$$M = \frac{10000 \mu m}{50 \mu m}$$

$$M = 200x$$

$$\bar{r} = \frac{L_T}{PM}$$

$$\bar{t} = \frac{(4 \times 70 \text{ mm})}{(77 \times 200)}$$

$$\bar{t} = 0,018$$

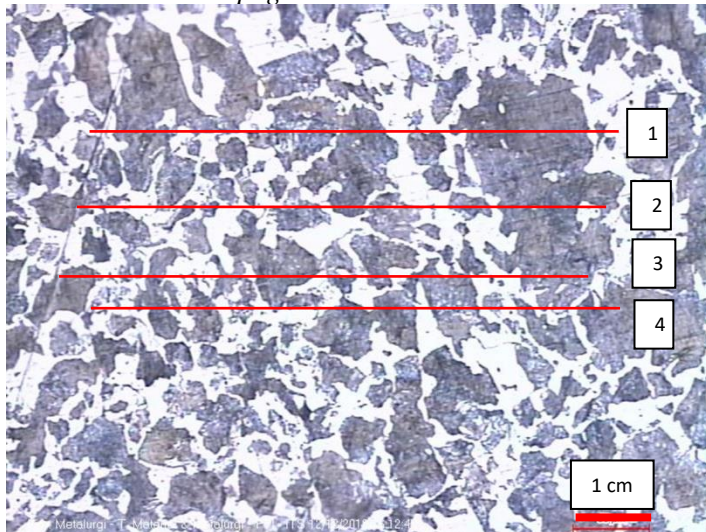
ASTM E112

$$G = -6,6457 \log \bar{t} - 3,298$$

$$G = -6,6457 \log (0,018) - 3,298$$

$$G = 8,2969$$

b. Pada daerah *Propagation*



Garis	Jumlah Perpotongan Butir
1.	14
2.	18
3.	17
4.	16
Total	65

$$M = \frac{\text{Panjang Garis}}{\text{Skala}}$$

$$M = \frac{10000 \mu\text{m}}{50 \mu\text{m}}$$

$$M = 200x$$

$$\bar{i} = \frac{L_T}{PM}$$

$$\bar{i} = \frac{(4 \times 70 \text{ mm})}{(65 \times 200)}$$

$$\bar{i} = 0,021$$

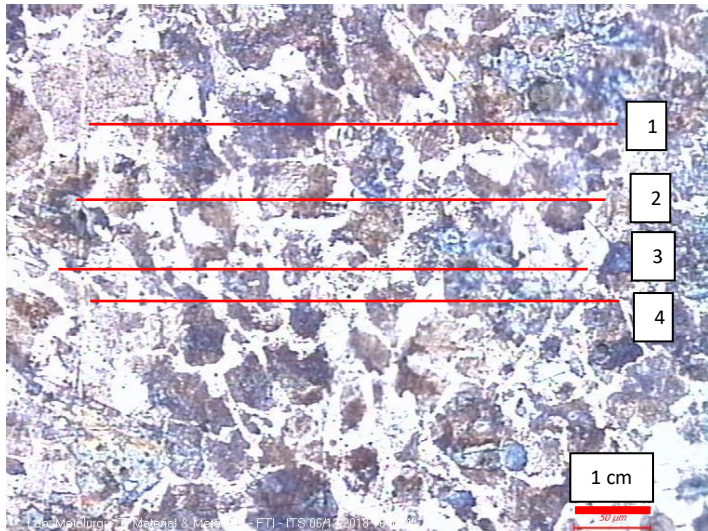
ASTM E112

$$G = -6,6457 \log \bar{i} - 3,298$$

$$G = -6,6457 \log (0,021) - 3,298$$

$$G = 7,7789$$

c. Pada daerah *Final Crack*



Garis	Jumlah Perpotongan Butir
-------	--------------------------

1.	20
2.	19
3.	22
4.	21
Total	82

$$M = \frac{\text{Panjang Garis}}{\text{Skala}}$$

$$M = \frac{10000 \mu\text{m}}{50 \mu\text{m}}$$

$$M = 200x$$

$$\bar{i} = \frac{L_T}{PM}$$

$$\bar{i} = \frac{(4 \times 70 \text{ mm})}{(82 \times 200)}$$

$$\bar{i} = 0,017$$

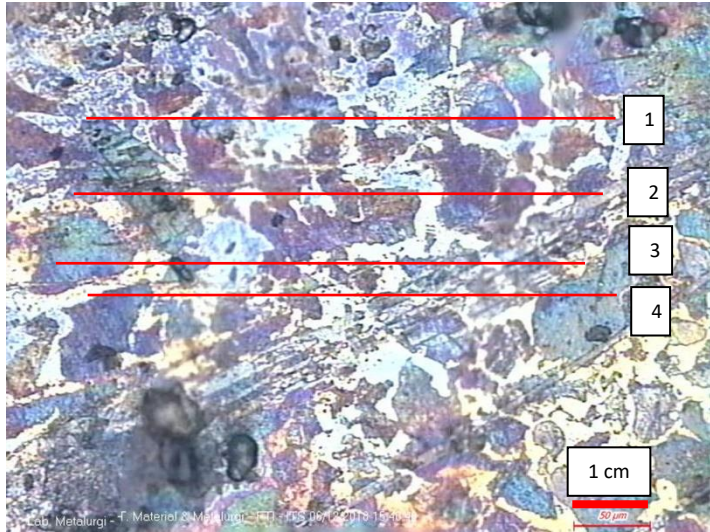
ASTM E112

$$G = -6,6457 \log \bar{i} - 3,298$$

$$G = -6,6457 \log (0,017) - 3,298$$

$$G = 8,4495$$

d. Pada daerah yang jauh dari patahan



Garis	Jumlah Perpotongan Butir
1.	12
2.	15
3.	13
4.	11
Total	51

$$M = \frac{\text{Panjang Garis}}{\text{Skala}}$$

$$M = \frac{10000 \mu m}{50 \mu m}$$

$$M = 200x$$

$$\bar{l} = \frac{L_T}{PM}$$

$$\bar{l} = \frac{(4 \times 70 \text{ mm})}{(51 \times 200)}$$

$$\bar{l} = 0,02745$$

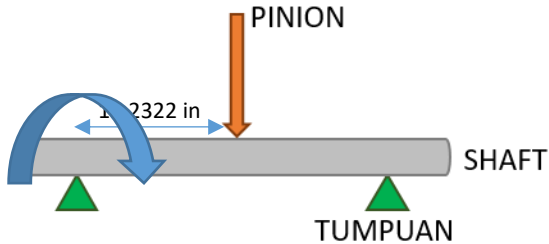
ASTM E112

$$G = -6,6457 \log \bar{i} - 3,298$$

$$G = -6,6457 \log (0,02745) - 3,298$$

$$G = 7,0788$$

10. Perhitungan beban torsi dari mesin uap



$$\text{Rpm} = 54$$

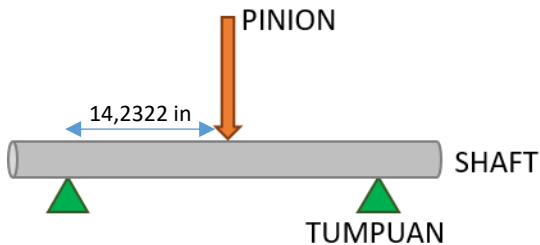
$$\text{Daya Hp} = 147,9 \text{ Watt}$$

$$T = \frac{6300 \times \text{Hp}}{\text{rpm}}$$

$$T = \frac{6300 \times 147,9}{54}$$

$$T = 172606,0057 \text{ lb in}$$

11. Perhitungan *bending*



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

$$F = 677,424 \times 9,8$$

$$F = 6638,7552 \text{ N}$$

$$F = 1492,4515 \text{ lb}$$

$$Mb = F \times r$$

$$Mb = 1492,4515 \times 14,2322$$

$$Mb = 21.240,868 \text{ lb in}$$

12. Perhitungan tegangan principal

a. Pada diameter 22cm



$$\tau = \frac{T \times r}{j}$$

$$\tau = \frac{172606,005 \times 8,67}{\frac{\pi}{32} \times 8,67^4}$$

$$\tau = 2697,73 \text{ lb/in}^2$$

$$\tau = 18,595 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{Mb}{Z}$$

$$\sigma = \frac{21.240,86824}{\frac{\pi}{32} \times 8,67^3}$$

$$\sigma = 331,98 \text{ lb/in}^2$$

$$\sigma = 2,289 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = 0$$

$$\sigma_y = 2,289 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = 18,595 \text{ MPa}$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{1}{2} |\sigma_x^2 - \sigma_y^2| + \tau_{xy}^2\right)}$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{1}{2} |0^2 - 2,289^2| + 18,59^2\right)}$$

$$R = 18,66 \text{ MPa}$$

$$\tau_{max} = R$$

$$\sigma_{rata-rata} = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\sigma_{rata-rata} = \frac{1}{2} (0 + 2,289)$$

$$\sigma_{rata-rata} = 1,1445 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = \sigma_{rata-rata} + R$$

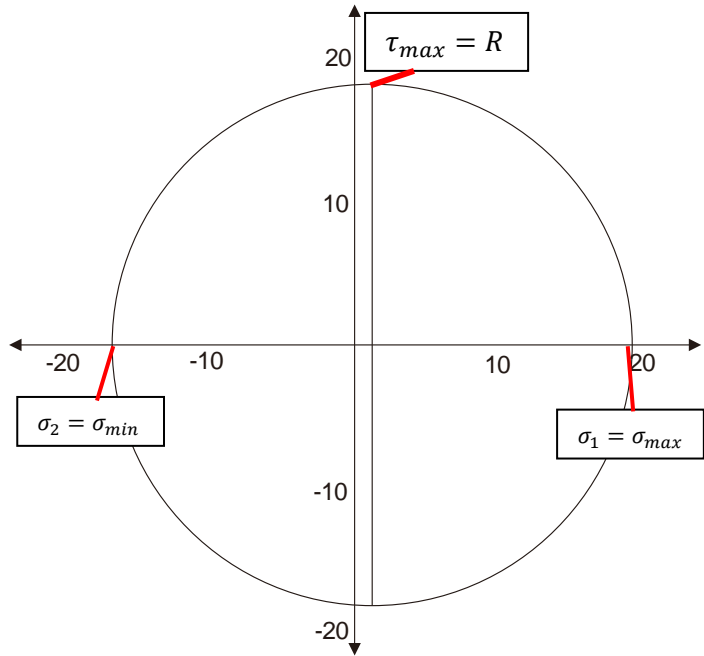
$$\sigma_1 = \sigma_{max} = 1,1445 + 18,66$$

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = 19,8045$$

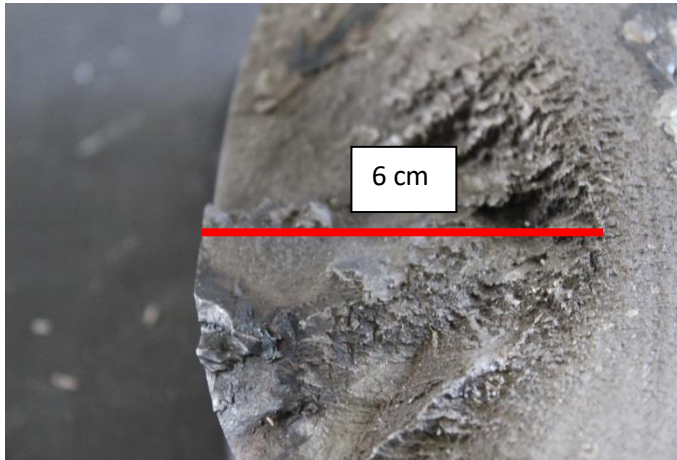
$$\sigma_2 = \sigma_{min} = \sigma_{rata-rata} - R$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = 1,1445 - 18,66$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = -17,5155$$



b. Pada diameter 6cm



$$\tau = \frac{T \times r}{j}$$

$$\tau = \frac{172606,005 \times 2,36}{\frac{\pi}{32} \times 2,36^4}$$

$$\tau = 133758,07 \text{ lb/in}^2$$

$$\tau = 922,228 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{Mb}{Z}$$

$$\sigma = \frac{21.240,86824}{\frac{\pi}{32} \times 2,36^3}$$

$$\sigma = 17782,33 \text{ lb/in}^2$$

$$\sigma = 122,6 \text{ MPa}$$

$$R = \sqrt{(1/2 |\sigma_x^2 - \sigma_y^2| + \tau_{xy}^2)}$$

$$\sigma_x = 0$$

$$\sigma_y = 122,6 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = 922,228 \text{ MPa}$$

$$R = \sqrt{(1/2 |\sigma_x^2 - \sigma_y^2| + \tau_{xy}^2)}$$

$$R = \sqrt{(1/2 |0^2 - 122,6^2| + 922,228^2)}$$

$$R = 926,26 \text{ MPa}$$

$$\tau_{max} = R$$

$$\sigma_{rata-rata} = 1/2 (\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\sigma_{rata-rata} = 1/2 (0 + 122,6)$$

$$\sigma_{rata-rata} = 61,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = \sigma_{rata-rata} + R$$

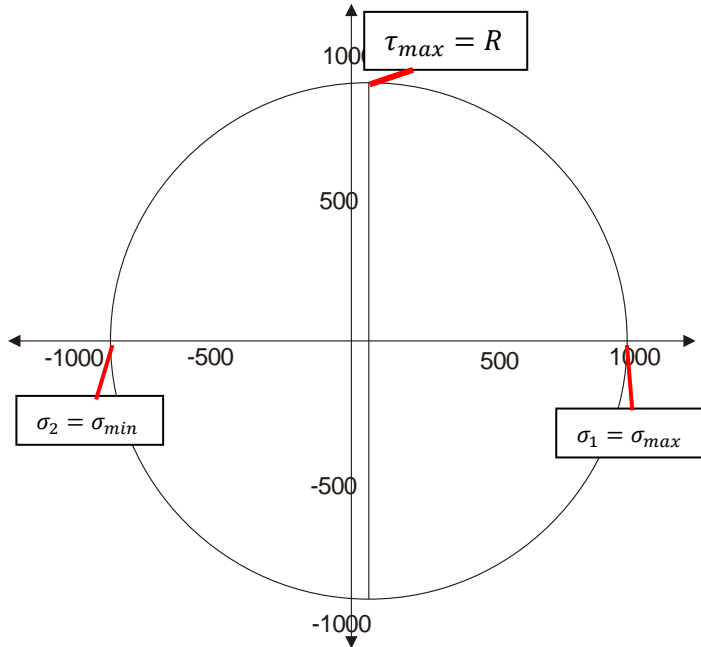
$$\sigma_1 = \sigma_{max} = 61,3 + 926,26$$

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = 987,56$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = \sigma_{rata-rata} - R$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = 61,3 - 926,26$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = -864,96$$



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

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. Kedua Orang Tua dan Kakak serta Adik yang telah mendukung secara moril maupun material serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan, keselamatan dan kelancaran dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan S.T., M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS.
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem M.Sc selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir yang telah membimbing, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
5. Bapak Alvian Toto Wibisono S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir yang telah membimbing, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
6. Dr. Eng. Hosta Adgyananta S.T., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI-ITS.
7. Dr. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. Selaku dosen wali yang telah membantu penulis menjalani Pendidikan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.
8. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang melancarkan Tugas Akhir penulis baik secara langsung maupun tidak langsung.
9. Bapak Agus Setya Wahyudi, Bapak Ngadiono dan Bapak Yugo, selaku pembimbing di Pabrik Gula Gending yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
10. Tim ANVILL (Anky, Yohannes, Zaid dan Junda) yang memberikan banyak pengalaman, pembelajaran dan motivasi kepada penulis untuk senantiasa berprestasi.

11. Para prajurit Clan Smansa Boner (Jelang, Shofwan, Marcel, Richo, Betet, Agas, Firza, Husein) yang selalu menemani penulis untuk berjuang bersama melawan kerasnya dunia.
12. Teman-teman penghuni Lab Metal (Junda, Adhe, Ivan, Madeline, Anto, Naufal, Ajeng) yang selalu berbagi motivasi dan bantuan selama pengerjaan Tugas Akhir.
13. Rafi Wirawan (Suhu Mekpat) yang memotivasi saya untuk belajar lebih pada mata kuliah Mekanika Patahan sebagaimana keberlangsungan hidup umat manusia.
14. Sahabat saya Junda Azizi dan Nabil Musyafa yang telah membantu saya mengarungi kerasnya perjalanan membawa spesimen dari Pabrik Gula Gending ke ITS.
15. Teman-teman kabinet Harmonika BEM FTI-ITS 2017/2018 yang telah memberikan banyak dukungan secara moril kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
16. Bapak Chanan dan Bapak Sutari selaku laboran di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material FTI-ITS yang turut mendukung Tugas Akhir penulis.
17. Seluruh mahasiswa Teknik Material serta keluarga MT17 yang penulis sayangi, yang telah menemani dan memberikan banyak pengalaman berharga selama jenjang perkuliahan ini.
18. Seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan.

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Tegal pada 7 September 1997 sebagai anak kedua dari tiga bersaudara. Riwayat pendidikan penulis adalah TK Pertiwi Tegal, SD Randugunting 2 Tegal, SMP Negeri 7 Tegal, SMA Negeri 1 Tegal dan sedang menempuh pendidikan S-1 di Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama berkuliah, penulis telah mengikuti berbagai kegiatan dan organisasi. Penulis pernah mengikuti pelatihan Program Studi Islam, Latihan Kepemimpinan dan Manajerial Mahasiswa Tingkat Dasar, serta Latihan Kepemimpinan Mahasiswa Wirausaha Tingkat Dasar. Penulis pernah menjuarai *Chula International Inovation Challenge for Community* 2018 di Thailand. Penulis pernah menjabat sebagai Staff Departemen Kewirausahaan BEM FTI ITS 2016/2017. Penulis juga pernah menjabat sebagai Kepala Departemen Hubungan Luar BEM FTI ITS 2017/2018.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT Dirgantara Indonesia di Divisi Heat Treatment pada Agustus – September 2018. Selama kerja praktek, penulis mendalami topik terkait “Proses *Solution Heat Treatment Aluminium 2024* Pada Komponen *D-Nose Panel* Pesawat *Airbus A-350* Di Pt Dirgantara Indonesia”.

Tugas akhir penulis adalah dalam bidang Metalurgi Manufaktur dengan judul “Analisis Kegagalan Pada *Shaft* Mesin Uap II di Pabrik Gula Gending”

Email: adinovalihsan@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)