



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - 141584

ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN PADA PROSES *HARDENING* MATERIAL 4340 TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO UNTUK KOMPONEN *AXLE SHAFT*

JOURDY PRADITYA
0251144000133

Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Alvian Toto Wibisono, ST.,MT

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - 141584

**ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU
TAHAN PADA PROSES *HARDENING* MATERIAL
4340 TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR
MIKRO UNTUK KOMPONEN *AXLE SHAFT***

JOURDY PRADITYA
02511440000133

Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Alvian Toto Wibisono, ST., MT

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE
AND HOLDING TIME ON HARDENING PROCESS
4340 MATERIAL TO HARDNESS AND MICRO
STRUCTURE FOR AXLE SHAFT COMPONENTS**

JOURDY PRADITYA
02511440000133

Advisor
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Alvian Toto Wibisono, ST., MT

MATERIALS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

(This page left intentionally blank)

**ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU
TAHAN PADA PROSES *HARDENING* MATERIAL 4340
TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO
UNTUK KOMPONEN *AXLE SHAFT***

TUGAS AKHIR

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

Oleh :
JOURDY PRADITYA
02511440000133

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

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



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Analisis Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan pada Proses *Hardening* Material 4340 terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro untuk Komponen *Axle Shaft*

Nama Mahasiswa : Jourdy Praditya
NRP : 02511440000133
Jurusan : Teknik Material
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem., M.Sc.
Co-Pembimbing : Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T

Abstrak

Level Luffing Crane adalah mesin yang digunakan untuk transportasi *cargo, container, bag carge* dan curah kering di lingkungan pelabuhan. *Luffing crane* menggunakan rel sebagai sarana untuk berpindah tempatnya. Salah satu komponen dalam *crane* yang sangat penting yaitu *axle shaft* atau bisa disebut sebagai poros roda. *Axle shaft* pada *luffing crane* telah mengalami masalah keausan karena pemakaian material tersebut jauh dari umur yang direncanakan. Hasil uji komposisi meunjukkan material *axle shaft* adalah baja AISI 1045 yang mana tidak sesuai dengan standar sehingga diperlukan optimalisasi dengan perlakuan panas menggunakan material standar yaitu AISI 4340. Dalam penelitian ini dilakukan analisis pengaruh temperatur dan waktu tahan pada proses *hardening* material 4340 terhadap sifat mekanik kekerasan dan struktur mikro untuk komponen *axle shaft*. Pengujian yang dilakukan meliputi uji metalografi, kekerasan dan ketahanan aus. Kemudian dilakukan perlakuan *hardening* menggunakan material standar 4340 dengan temperatur austenisasi 850 °C, 875 °C, dan 900 °C dengan waktu tahan selama 60, 90, dan 120 menit lalu dilakukan pendinginan dengan media oli. Kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen dengan temperatur austenisasi 875 °C dengan waktu tahan 60 menit dengan kekerasan sebesar 528 HV dengan pengurangan massa sebesar 0,0227 mm. Berdasarkan hasil

penelitian didapatkan bahwa semakin tinggi nilai kekerasan semakin banyak jumlah struktur *martensite*.

Kata Kunci : axle shaft, 4340, hardening, waktu tahan, oli, hardness, ketahanan aus

Analysis of The Effect of Temperature and Holding Time on Hardening Process 4340 Material to Hardness and Micro Structure for Axle Shaft Components

Name : Jourdy Praditya
SRN : 02511440000133
Major : Materials Engineering
Advisor : Ir. Rochman Rochiem., M.Sc.
Co-Advisor : Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T

Abstract

Level Luffing Crane is a machine that used to transport cargo, container, bag charge, and etc. Luffing crane uses rail as means of migration. One of the most important component in crane is axle shaft. Axle shaft on luffing crane has experienced wear problem because the use of material is far from the planned age. From the composite test results obtained that the axle shaft material is steel material AISI 1045 which is not suitable to the standard so optimization is required with heat treatment using material standard AISI 4340. In this research process analysis of the effect of temperature and holding time on hardening process 4340 material to hardness mechanical properties and micro structure for axle shaft components. The tests include metallography test, hardness test and wear resistance test. Then the hardening treatment given with austenisation temperature 850 °C, 875 °C and 900 °C with holding time for 60, 90, and 120 minutes then fast cooled with oil. The highest hardness obtained in the specimen which hardened at austenitisation temperature 875 °C with holding time 60 minutes with hardness and mass reduction respectively 528 HV and 0,0227 mm. According to the research results concluded that the higher hardness of material the more material contains martensite structure.

Keyword : axle shaft, 4340, hardening, holding time, oil, hardness, wear resistance

(This page left intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir. Serta tidak lupa shalawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW. Tugas Akhir ditujukan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Jurusan Teknik Material Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Penulis telah menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan pada Proses Hardening Material 4340 terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro untuk Komponen Axle Shaft**”.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, Laporan Tugas Akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga Laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya:

1. Allah SWT berkat pertolongan dan bimbingan-Nya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua dan adik penulis yang telah menjadi sumber motivasi dalam pembuatan laporan ini, serta telah mendukung secara moril maupun materil, dan doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan, keselamatan, dan kelancaran dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
3. Dr. Agung Purniawan S.T, M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
4. Ir. Rochman Rochiem M.Sc selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
5. Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T selaku co dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing,

- membantu, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
6. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material FTI ITS.
 7. Rindang Fajarin S.Si, M.Si selaku dosen wali yang telah membantu penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
 8. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
 9. Bapak Agus dan Bapak Muslics selaku pembimbing di PT. PAL Indonesia (Persero) yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
 10. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Material serta keluarga MT 16 yang penulis sayangi, yang telah menemani dan memberikan banyak pengalaman berharga selama jenjang perkuliahan ini.
 11. Dan seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan laporan ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca demi perbaikan dan kemajuan bersama. Penulis berharap Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, Juli 2018

Penulis,
Jourdy Praditya

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Level Luffing Crane	5
2.2 Axle shaft	10
2.3 Baja Karbon dan Baja Paduan Rendah	13
2.4 AISI 4340	15
2.5 Perlakuan Panas	26
2.5.1 Pemanasan Hingga Temperatur Austenisasi	27
2.5.2 Quench and Tempered	31
2.6 Hardenability	37
2.7 Pengujian Komposisi	39

2.8 Pengujian Kekerasan.....	40
2.8.1 Uji Kekerasan Vickers	40
2.9 Uji Keausan (<i>Pin-on-disc</i>)	41
2.10 Pengujian Metalografi.....	43
2.11 Analisa Kegagalan	44
2.12 Keausan	46
2.12.1 Keausan Karena Perilaku Mekanis (<i>Mechanical Wear</i>).....	47
2.12.2 Keausan Karena Perilaku Kimia (<i>Chemical</i>) ..	49
2.12.3 Keausan Karena Perilaku Panas (<i>Thermal Wear</i>)	49
2.13 Penelitian Sebelumnya	50
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	55
3.1 Diagram Alir	55
3.2 Metode Penelitian	57
3.3 Material yang Digunakan	58
3.4 Peralatan.....	60
3.5 Tahapan Penelitian.....	61
3.5.1 Review Dokumen Perusahaan	61
3.5.2 Preparasi Spesimen	61
3.5.3 Pengamatan Makroskopik dan Mikroskopik ...	61
3.5.4 Uji Komposisi.....	62
3.5.5 Uji Kekerasan	62
3.5.6 Uji Keausan	62
3.5.7 Perlakuan Panas	63
3.6 Rancangan Penelitian.....	64

3.7 Timeline Penelitian	65
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	67
4.1 Analisis Data	67
4.1.1 Analisis Kegagalan Axle Shaft	67
4.1.2 Pengamatan Makro pada Material Axle Shaft	69
4.1.3 Hasil Uji Komposisi Kimia pada Material Axle Shaft yang Mengalami Kegagalan	70
4.1.4 Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Material AISI 4340	70
4.1.5 Hasil Pengujian Kekerasan pada Material AISI 4340	79
4.1.6 Hasil Pengujian Keausan pada Material AISI 4340	81
4.2 Pembahasan	84
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	91
5.1 Kesimpulan.....	91
5.2 Saran.....	91
DAFTAR PUSTAKA	xxi
LAMPIRAN.....	xxv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	xxxix
BIODATA PENULIS.....	xli

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Unit luffing crane (Rahayu, 2017)	5
Gambar 2.2 Komponen luffing crane (Tarjudin, 2017)	6
Gambar 2.3 (a) Skema sistem gantry luffing crane (b) Skema axle shaft dan gear (PT PAL Indonesia).....	9
Gambar 2.4 Axle shaft (Karl Georg, 2010)	10
Gambar 2.5 Diagram Fasa Fe – Fe ₃ C (Avner, 1987).....	14
Gambar 2.6 Struktur mikro material AISI 4340 perbesaran 1000x (Navarro, 2018)	18
Gambar 2.7 Pengaruh unsur paduan terhadap (a) temperatur eutektoid dan (b) kadar karbon dalam eutektoid (Avner, 1987)..	19
Gambar 2.8 Pengaruh kadar chromium terhadap luasan daerah austenite (Avner, 1987)	20
Gambar 2.9 Pengaruh unsur paduan terhadap kekerasan ferit (Avner, 1987)	22
Gambar 2.10 Ilustrasi hardenability pada baja (a) hardenability baik (deep hardening) (b) hardenability buruk (shallow hardening).....	24
Gambar 2.11 Pengaruh kadar Chrom terhadap penurunan kekerasan setelah tempering (Avner, 1987)	25
Gambar 2.12 (a) Perlakuan panas Quenching-Tempering pada baja (b) Kurva Continuous Cooling Transformation (Pampania, 2015).....	27
Gambar 2.13 Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas (Campbell, 2008).....	29
Gambar 2.14 Diagram transformasi pemanasan (Avner, 1987)	30
Gambar 2.15 Diagram CCT untuk baja AISI 4340 (www.steeldata.info).....	32
Gambar 2.16 Isothermal Transformation Diagram untuk proses quenching dan tempering (Makela, 2012).....	33
Gambar 2.17 Struktur mikro hasil transformasi (a) Ferrite-Pearlite (b) Plate Martensite (c) Upper Bainite (d) Lower Bainite (Charre, 2004)	36

Gambar 2.18 Hubungan antara kekerasan, kadar karbon, dan jumlah martensite (Avner, 1987).....	37
Gambar 2.19 Kesetaraan suatu titik di permukaan batang yang diquenched dengan H tertentu dengan titik Jominy (Avner, 1987)	38
Gambar 2.20 Skema ilustrasi uji OES (Nayan, 2009)	40
Gambar 2.21 Tribotester	42
Gambar 2.22 Mekanisme abrasi wear akibat proses cutting (Stachowiak, 2000).....	47
Gambar 2.23 Proses Perpindahan Logam karena <i>Adhesive Wear</i> (Stachowiak, 2000).....	48
Gambar 2.24 <i>Flow wear</i> oleh penumpukan aliran geseran plastis (Stachowiak, 2000).....	48
Gambar 2.25 Fatigue wear karena retak di bagian dalam dan merambat (Stachowiak, 2000).....	49
Gambar 2.26 Grafik distribusi kekerasan 3 jenis baja setelah proses quenching (Priyadarshini, 2016)	53
Gambar 3.1 Diagram alir percobaan.....	57
Gambar 3.2 Material Axle Shaft yang mengalami keausan (AISI 1045).....	59
Gambar 3.3 Spesimen material substitusi AISI 4340	59
Gambar 3.4 Mesin OES (Optical Emission Spectroscopy)	60
Gambar 3.5 Skema uji ketahanan aus material (a) spesimen <i>pin</i> ,	63
Gambar 3.6 Kurva Perlakuan Panas	63
Gambar 4.1 Material Axle Shaft yang mengalami keausan (AISI 1045).....	69
Gambar 4.2 Struktur mikro material AISI 4340 sebelum perlakuan panas perbesaran 500x dengan etsa nital	70
Gambar 4.3 Struktur mikro material AISI 1045 yang mengalami kegagalan perbesaran 500x dengan etsa nital.....	71
Gambar 4.4 Foto struktur mikro AISI 4340 perbesaran 500x dengan etsa nital: (a) HT850-t60, (b) HT850-t90, (c) HT850-t120	73

Gambar 4.5 Foto struktur mikro AISI 4340 perbesaran 500x dengan etsa nital: (a) HT875-t60, (b) HT875-t90, (c) HT875-t120	75
Gambar 4.6 Foto struktur mikro AISI 4340 perbesaran 500x dengan etsa nital: (a) HT900-t60, (b) HT900-t90, (c) HT900-t120	78
Gambar 4.7 Grafik distribusi kekerasan spesimen uji	81
Gambar 4.8 (a) Grafik distribusi pengurangan massa dibandingkan dengan (b) Grafik distribusi kekerasan.....	83

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan mechanical properties beberapa jenis baja	11
Tabel 2.2 Standar material axle shaft dalam kondisi hardened dan tempered	12
Tabel 2.3 Data Operasional Axle Shaft	12
Tabel 2.4 Komposisi Kimia Baja AISI 4340 (ASTM A29)	16
Tabel 2.5 Mechanical Properties AISI 4340 setelah quenching pada temperatur 845 °C dan tempering beberapa variasi temperatur.....	17
Tabel 2.6 Perilaku unsur paduan dalam baja	21
Tabel 2.7 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin.....	45
Tabel 2.8 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin	45
Tabel 2.9 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin	46
Tabel 2.10 <i>Mechanical Properties</i> setelah 2 jam <i>tempering</i>	51
Tabel 2.11 <i>Mechanical Properties</i> setelah 48 jam tempering	51
Tabel 2.12 Nilai kekerasan setelah pemanasan pada 850 °C dan didinginkan cepat pada beberapa media pendingin.....	52
Table 3.1 Komposisi Kimia Axle Shaft.....	59
Table 3.2 Rancangan Penelitian	64
Table 3.3 Timeline Penelitian.....	65
Tabel 4.1 Kode spesimen dan jenis perlakuan AISI 4340.....	68
Tabel 4.2 Hasil pengujian kekerasan spesimen uji	80
Tabel 4.3 Hasil pengujian keausan spesimen uji	82

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT PAL Indonesia (Persero) merupakan salah satu industri strategis yang memproduksi alat utama sistem pertahanan Indonesia khususnya untuk matra laut, keberadaannya tentu memiliki peran penting dan strategis dalam mendukung pengembangan industri kelautan nasional. PT PAL Indonesia (Persero) memiliki kegiatan utama memproduksi kapal perang dan kapal niaga, memberikan jasa perbaikan dan pemeliharaan kapal, serta rekayasa umum dengan spesifikasi tertentu berdasarkan pesanan. Dengan adanya kegiatan tersebut maka dibutuhkan alat berat untuk membantu pekerjaan yang ada dan salah satunya adalah *crane* dengan jenis *Level Luffing Crane*.

Level luffing crane pada PT PAL Indonesia (Persero) merupakan jenis *crane* yang bergerak pada suatu rel. *Crane* ini bekerja di tepi dok kapal pada temperatur ruangan. Dalam sistem kerjanya *crane* memiliki beberapa sistem penting yang salah satunya adalah sistem gerak *crane* atau biasa disebut sistem *gantry*. Sistem *gantry* ini terdiri dari empat kaki *crane* dimana masing-masing kaki terdapat empat roda yang digerakkan oleh motor penggerak untuk bergerak pada rel. Salah satu bagian penting pada sistem gerak ini adalah *axle shaft* atau biasa disebut poros roda, benda ini berfungsi sebagai poros utama tempat roda gigi berputar. Pada bagian inilah *crane* sering mengalami kerusakan/kegagalan. Kegagalan/kerusakan yang terjadi bisa dikarenakan beban yang berlebih, perawatan yang kurang baik, maupun kesalahan dalam pemilihan material yang digunakan untuk poros roda tersebut. Pada saat studi lapangan ditemukan salah satu *axle shaft* mengalami kegagalan dikarenakan mengalami keausan yang cukup parah. Tentunya kegagalan ini akan sangat berpengaruh pada kinerja *crane* tersebut sehingga terjadi penurunan efisiensi yang pada awalnya *crane* mampu mengangkat beban sebesar 30 ton namun hanya menjadi 17 ton saja. Pada pemakaiannya, *axle shaft*



dirancang untuk penggunaan 2 – 3 tahun. Namun dikarenakan adanya keausan maka umur pakainya hanya bisa dalam waktu kurang lebih 3 bulan saja.

Dari permasalahan yang ada maka dilakukan analisa kegagalan dengan melakukan pengujian komposisi dan kekerasan pada material yang gagal sehingga diketahui bahwa komposisinya tidak sesuai dengan standar operasional PT PAL Indonesia (Persero) dan kekerasannya pun sangat rendah. Diketahui material yang gagal merupakan baja karbon AISI 1045, sedangkan material standar yang digunakan adalah baja paduan AISI 4340. Dari analisa benda yang berhubungan langsung dengan *axle shaft*, salah satunya adalah roda gigi. Jenis material pada roda gigi ini adalah material AISI 4340 yang sudah mengalami perlakuan panas *hardening* dan *tempering*. Tentu *axle shaft* tidak akan sanggup menahan beban dan gesekan dari roda gigi sehingga mengalami keausan. Untuk menjawab permasalahan yang ada, maka dalam penelitian kali ini akan dilakukan proses perlakuan panas *hardening* menggunakan material standar AISI 4340 untuk meningkatkan sifat mekaniknya terutama kekerasan dan ketahanan aus. Perlakuan panas ini menggunakan variasi temperatur austenisasi serta waktu tahannya. Dari penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kekerasannya sehingga menjadikan perlakuan panas ini menjadi solusi tepat untuk kegagalan *level luffing crane*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mekanisme kegagalan *axle shaft* pada *luffing crane*?
2. Bagaimana pengaruh waktu tahan *hardening* pada proses pengerasan baja AISI 4340 terhadap kekerasan dan struktur mikro?
3. Bagaimana pengaruh temperatur *hardening* pada proses pengerasan baja AISI 4340 terhadap kekerasan dan struktur mikro?



1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini adalah:

1. Data operasi seperti temperatur, kecepatan gerak pada *axle shaft* sudah memenuhi standar operasional.
2. Desain *axle shaft* diasumsikan memenuhi standar operasional
3. Material dianggap homogen di semua sisi
4. Pengaruh lingkungan diabaikan
5. Diasumsikan tidak ada penurunan temperatur saat material uji keluar dari dapur pemanas.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis mekanisme kegagalan *axle shaft* pada *luffing crane*.
2. Menganalisis pengaruh waktu tahan *hardening* pada proses pengerasan baja AISI 4340 terhadap kekerasan dan struktur mikro, sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *axle shaft* di *luffing crane*.
3. Menganalisis pengaruh temperatur *hardening* pada proses pengerasan baja AISI 4340 terhadap kekerasan dan struktur mikro, sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *axle shaft* di *luffing crane*.

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. PT. PAL Indonesia (Persero) sebagai pihak utama yang menyokong penelitian dapat menerapkan hasil penelitian untuk:

1. Masukan untuk hal-hal yang dapat dilakukan agar kegagalan pada *axle shaft* dapat ditanggulangi.



-
2. Referensi pemilihan bahan serta *maintenance* pada *axle shaft*.
 3. Referensi perlakuan panas pada *axle shaft*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

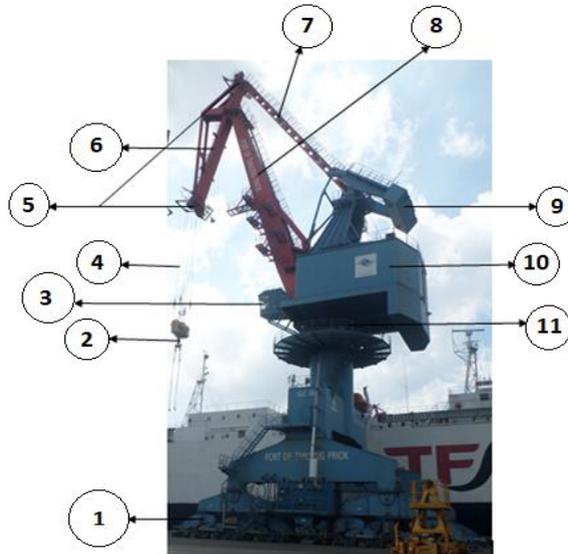
2.1 Level Luffing Crane

Luffing crane adalah mesin yang digunakan untuk transportasi *cargo*, *container*, *bag charge* dan curah kering di lingkungan pelabuhan. Berbentuk seperti *crane* pada kapal, namun terletak di dermaga. Beberapa *crane* menggunakan rel atau roda sebagai sarana untuk berpindah tempatnya. Mekanisme kerja *luffing crane* adalah dengan mengangkat muatan yang akan dipindahkan secara vertical kemudian mengatur posisi target letak benda secara horizontal, lalu menurunkan muatan di tempat yang diinginkan.



Gambar 2.1 Unit *luffing crane* (Rahayu, 2017)

Gambar 2.1 menunjukkan unit *luffing crane* yang berada di pelabuhan. Pada umumnya *crane* ini terletak di dermaga karena kapasitas angkatnya sangat besar dan dapat bergerak di sepanjang dermaga. Kapasitas *luffing crane* PT PAL Indonesia dapat mencapai 30 ton.



Gambar 2.2 Komponen *luffing crane* (Tarjudin, 2017)

Luffing crane memiliki berbagai macam komponen yang dirakit sehingga membentuk satu kesatuan sistem *crane*. Gambar 2.2 menunjukkan berbagai komponen *Luffing Crane* (1) *Gantry* (2) *Hook/Spreader* (3) *Cabin* (4) *Wire Rope* (5) *Pulley* (6) *Main Jib* (7) *Tieback* (8) *Head Jib* (9) *Counterweight* (10) Ruang Mesin Utama (11) *Slewing* (Tarjudin, 2017). Komponen *gantry* berfungsi sebagai sistem utama gerak. *Hook/spreader* berfungsi sebagai pengait untuk mengangkat muatan. *Cabin* berfungsi sebagai ruang kemudi *crane*. *Wire rope* berfungsi sebagai tali pengangkat muatan. *Pulley* berfungsi untuk memutar pengait sehingga dapat dinaikkan atau diturunkan. *Main jib* berfungsi sebagai lengan tambahan untuk menambah jarak angkat beban. *Tieback* berfungsi sebagai penyangga lengan/*jib*. *Head jib* berfungsi sebagai lengan utama pada *crane*. *Counterweight* berfungsi sebagai penyeimbang beban dan memberikan stabilitas pada saat mengangkat beban. Ruang mesin utama berfungsi sebagai tempat mesin utama *crane*. *Slewing* berfungsi untuk menggerakkan *crane* berputar 360°. Dari



beberapa komponen *crane* tersebut termasuk ke dalam beberapa sistem utama. Sistem utama cari *Luffing Crane* sendiri terbagi menjadi empat jenis sistem antara lain:

1. Sistem *Hoist*

Hoist merupakan gerakan mengangkat dan menurunkan barang. Terdiri dari motor listrik kecepatan tinggi, kopling, gearbox, sistem *break*, sensor *proximity*, drum, *pulley*, sistem *loadshell* dan tali/*wirerope*. Rem sistem *hoist* menggunakan tipe roda dengan *electric* hidrolik. Kecepatan angkat yang berbeda dengan beban yang berbeda dapat dilakukan dengan mengendalikan kecepatan putaran frekuensi motor variabel melalui konverter frekuensi.

2. Sistem *Luffing*

Luffing merupakan gerakan maju mundur lengan/*jib*, sehingga membuat barang-barang di bawah menjadi horizontal selama proses *luffing*. Sistem *luffing* terpasang di tengah kolom vertikal dan terdiri dari satu motor kecepatan tinggi, kopling, *gear* dan *rack luffing*, sehingga lengan bergerak maju dan mundur. Rem sistem *luffing* menggunakan tipe roda, dengan *electric* hidrolik. Tingkat kecepatan *luffing* dapat dikendalikan oleh putaran frekuensi motor variabel melalui konverter frekuensi.

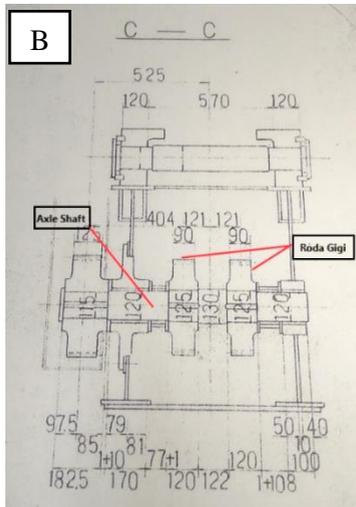
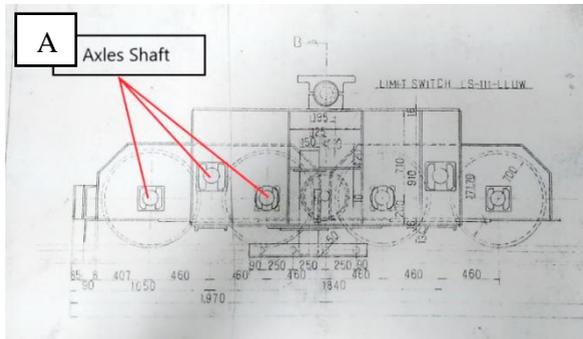
3. Sistem *Slewing*

Slewing adalah gerakan memutar untuk memindahkan barang dari satu sisi ke sisi yang lain. Sistem *slewing* dipasang di ruang mesin dan terdiri motor vertikal, *gear*, sistem *break*, *gearbox*, dan dukungan *rotary*. Dari gerakan motor dapat membuat meja putar berputar 360° arah positif dan negatif. Rem sistem *slewing* menggunakan jenis pedal hidrolik blok, dan rem manual pengunci perangkat *rotary* diterapkan untuk mengunci meja dan silinder putar *slewing*. Perangkat penguncian dalam operasi fleksibel dan nyaman.



4. Sistem Gantry

Sistem *gantry* adalah untuk berpindah tempat dengan menggunakan media bantalan rel. Sistem *gantry* terdiri dari empat roda dalam satu *bogie*, dengan setiap *bogie* di gerakan oleh satu motor penggerak dengan kopling dan *gearbox*. Sistem pengereman menggunakan *thruster brake*, bekerja seperti mengunci/mengganjal roda. Dalam setiap satu set roda terdapat satu *thruster brake* dan dalam setiap roda terhubung dengan roda gigi dan *axle shaft* sebagai porosnya. Motor penggerak merupakan alat untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. *Thruster brake* merupakan sistem pengereman dimana roda akan ditekan hingga menimbulkan gesekan sehingga roda berhenti bergerak. *Gearbox* merupakan salah satu komponen utama yang berfungsi sebagai komponen yang mengkonversi putaran yang dihasilkan oleh motor listrik agar dapat menghasilkan torsi yang lebih besar. Perlakuan panas dilakukan untuk tapak roda dan tepi roda, sedangkan kedalaman lapisan pengerasan harus tidak lebih kecil dari 20 mm (Tarjudin, 2017).



Gambar 2.3 (a) Skema sistem *gantry luffing crane* (b) Skema *axle shaft* dan *gear* (PT PAL Indonesia)

Gambar 2.3 menunjukkan (a) skema sistem *gantry luffing crane* PT PAL Indonesia dimana pada satu kesatuan sistem terdapat *axle shaft* sebanyak 6 buah. *Axle shaft* ini merupakan poros pada roda dan juga *gear* yang akan terhubung dengan motor penggerak; (b) Skema *axle shaft* dan *gear* dimana sebuah *axle shaft* terhubung dengan 2 buah *gear*.



2.2 Axle shaft

Semua kendaraan termasuk alat berat *crane* pasti memiliki *axle shaft* yang tersusun dalam sistem gerak. *Axle shaft* yang terhubung dalam sistem gerak memiliki dua fungsi penting. Pertama untuk mengirimkan torsi ke roda melalui pengaturan gigi. Kedua untuk mempertahankan posisi roda secara komparatif satu sama lain ke arah badan kendaraan (Souvik Das, 2015). Selain digunakan untuk menghubungkan roda dan mentransmisikan tenaga, *axle shaft* juga digunakan untuk mentransmisikan gerak rotasi. Dalam pengoperasiannya *axle shaft* biasanya terkena *torsional stress* dan *bending stress* karena bobotnya sendiri atau pun bobot komponen lain atau juga kemungkinan kesalahan susunan antara *bearing*. Oleh karena itu *axle shaft* harus memiliki kekerasan dan kekuatan yang baik agar mampu menahan *stress* yang bekerja. (Osman Asi, 2005).



Gambar 2.4 *Axle shaft* (Karl Georg, 2010)

Gambar 2.4 menunjukkan sebuah *axle shaft* yang didapat dari PT PAL Indonesia pada sistem *gantry crane*. *Axle shaft* ini memiliki diameter 140 mm dan Panjang 810 mm. Menurut *ASM Handbook* penggunaan material standar untuk aplikasi *axle shaft* dapat menggunakan beberapa jenis material. Beberapa material yang sering digunakan adalah baja 4340, baja 4140, baja 1045, baja 6150, dan lain sebagainya. Sedangkan menurut ASTM A291 penggunaan material standar untuk aplikasi *axle shaft* dibagi menjadi beberapa *grade* dan *class*. Standar ini dapat dilihat pada Lampiran 2. Namun PT PAL Indonesia menggunakan baja 4340 dengan kondisi *hardened* dan *tempered* sebagai standar penggunaan untuk *axle shaft*.



Tabel 2.1 Perbandingan *mechanical properties* beberapa jenis baja

Karakteristik Mekanik	AISI 4140	AISI 4340	AISI 1045	AISI 6150
<i>Tensile Strength</i>	655 MPa / 95000 psi	745 MPa / 108000 psi	565 MPa / 81900 psi	670 MPa / 97200 psi
<i>Yield Strength</i>	415 MPa / 60200 psi	470 MPa / 68200 psi	310 MPa / 45000 psi	415 MPa / 60200 psi
Modulus Elastisitas	190 – 210 GPa / 27557 – 30458 ksi	190 – 210 GPa / 27557 – 30458 ksi	200 GPa / 29000 ksi	190-210 GPa/27557-30458 ksi
<i>Hardness, Brinell</i>	197 HBN	217 HBN	163 HBN	197 HBN
<i>Hardness, Vickers</i>	207 HV	228 HV	170 HV	207 HV

Sumber: Azom, 2012

Tabel 2.1 menjelaskan perbandingan *mechanical properties* dari baja 4340, 4140, 1045, dan 6150. Baja 4340 merupakan baja paduan yang mengkombinasikan *hardenability*, keuletan, ketangguhan, dan kekuatan yang tinggi. Baja ini pun dikategorikan sebagai *Ultrahigh-Strength Steel*. Ada pun baja 4140 yang memiliki *hardenability*, kekuatan, dan ketangguhan yang baik. Baja ini dapat digunakan sampai temperatur 480 °C dan bila digunakan melebihi temperatur tersebut maka kekuatannya akan menurun. Beberapa perlakuan panas seperti *hardening* dan *tempering* dapat dilakukan pada baja jenis ini. Kemudian untuk jenis baja 6150 merupakan jenis baja yang tangguh juga memiliki ketahanan *fatigue* dan *impact* yang baik dalam kondisi setelah perlakuan panas. Dengan perlakuan pasas seperti annealing dapat meningkatkan *machinability* (ASM Handbook, 1990). Ada pula jenis baja karbon 1045 yang memiliki kekuatan dan kekerasan



yang cukup baik. Baja ini memiliki size *accuracy*, *concentricity*, dan *straightness* yang sangat baik yang bersama-sama memungkinkan untuk meminimalkan keausan dalam aplikasi kecepatan tinggi. Baja ini juga dapat diberi perlakuan panas menggunakan *flame* dan induksi *hardening* (Azom, 2013)

Table 2.2 Standar material *axle shaft* dalam kondisi *hardened* dan *tempered*

Perusahaan	Material	Kondisi	Hardness	Tensile Strength
KARL GEORG	42CrMo4 + QT atau C45	<i>Hardened and Tempered</i>	-	-
ASSAB	ASSAB 705 (AISI 4340)	<i>Hardened and Tempered</i>	293-352 HB atau 291-361 HV	≥ 980 N/mm ²

Sumber: ASSAB, KARL GEORG

Tabel 2.2 menjelaskan standar material yang digunakan untuk komponen *axle shaft*. Material yang dapat digunakan untuk komponen *axle shaft* dapat berupa 42CrMo4, C45 (AISI 1045), dan ASSAB 705 (AISI 4340). Semua material ini diberi perlakuan *hardening* dan *tempering* untuk meningkatkan sifat mekaniknya terutama kekerasan dan kekuatan.

Tabel 2.3 Data Operasional *Axle Shaft*

Kapasitas	17 – 18 ton, max 22 ton
Kecepatan	36 m/menit max
Temperatur pemakaian	30 – 40 °C
Waktu pemakaian per hari	6 – 9 jam

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



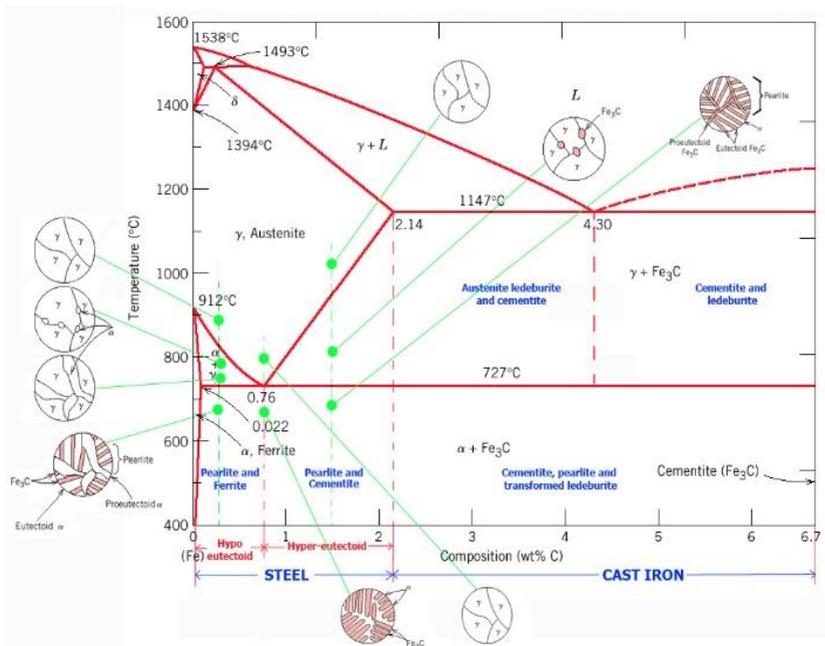
Usia rancangan	2 – 3 tahun
Usia aktual pemakaian	2 – 3 bulan
Material <i>Axle Shaft</i>	Baja S45C
Material <i>Gear</i>	Baja AISI 4340 (<i>Hardened and Tempered</i>), kekerasan 40 – 60 HRC

Sumber: PT PAL Indonesia

Tabel 2.3 menunjukkan data operasional pada Axle Shaft PT PAL Indonesia. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa usia aktual pemakaian sangat jauh sekali dari target usia rancangan pemakaian. Material ini mengalami keausan yang sangat parah sehingga umurnya sangat pendek.

2.3 Baja Karbon dan Baja Paduan Rendah

Baja merupakan paduan dari besi dan karbon. Selain terdiri dari besi dan karbon baja juga mengandung sejumlah unsur lain, unsur ini biasa digunakan pada saat proses pembuatan baja namun kadarnya ditekan serendah mungkin. Disamping itu sering kali unsur paduan ditambahkan ke dalam baja untuk memperoleh suatu sifat tertentu. Baja memiliki jenis yang sangat banyak. Baja dapat diklasifikasikan berdasarkan komposisinya yaitu baja karbon dan baja paduan. Baja karbon masih memiliki sejumlah kandungan unsur namun jumlahnya masih dalam suatu batasan tertentu. Sedangkan baja paduan masih bisa diklasifikasikan menjadi baja paduan rendah dan baja paduan tinggi menurut jumlah unsur paduannya. Untuk lebih mengetahui karakteristik dari baja berikut adalah penjelasan mengenai diagram fasa Fe-Fe₃C (Avner, 1987).



Gambar 2.5 Diagram Fasa Fe – Fe₃C (Avner, 1987)

Gambar 2.5 menjelaskan 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 fase besi-karbon ada 2 macam, diagram fase besi – karbida besi dan diagram fase besi – grafit.

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



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 2.10 tampak bahwa diagram fase ini memiliki tiga garis mendatar yang menandakan adanya reaksi yang berlangsung secara *isothermal*, yaitu:

- Pada 1496 °C, kadar karbon antara 0.10 – 0.50 %, berlangsung reaksi peritektik. $L + \delta \rightarrow \gamma$ (daerah ini tidak begitu penting untuk dunia teknik)
- Pada 1130°C, kadar karbon antara 2,0 – 6,67 %, berlangsung reaksi eutektik. $L \rightarrow \gamma + Fe_3C$
- Pada 723 °C, kadar karbon antara 0.025 – 6.67 %, berlangsung reaksi *eutectoid*. $\Gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$

2.4 AISI 4340

Setiap jenis baja perlu diberi suatu nama agar mudah dikenali. Nama ini merupakan kode yang ditetapkan dalam suatu standar, lengkap dengan spesifikasi utamanya. Salah satu standar yang umum digunakan adalah AISI dan SAE. AISI merupakan singkatan dari *American Iron and Steel Institute*. Sedangkan SAE merupakan singkatan dari *Society of Automotive Engineers*. AISI dan SAE menyatakan spesifikasi baja dengan empat atau lima angka. Angka pertama menunjukkan jenis bajanya, angka 1 untuk baja karbon, angka 2 untuk baja *nickel*, angka 3 untuk baja *nickel-chromium*. dan seterusnya. Angka kedua pada baja paduan sederhana menunjukkan kadar unsur paduannya. Untuk baja paduan 43xx merupakan jenis baja *nickel-chrom-molybden*. Kemudian untuk dua digit terakhir menunjukkan kadar karbon dalam per seratus persen (Avner, 1987). Jadi untuk baja AISI 4340



merupakan baja paduan dengan kadar nickel 1,83%, chromium 0,50% atau 0,80%, molybdenum 0,25%, dan karbon 0,40%.

Komposisi baja AISI 4340 menurut ASTM A29 ditampilkan dalam tabel 2.4 sebagai berikut

Tabel 2.4 Komposisi Kimia Baja AISI 4340 (ASTM A29)

Grade Designation	%C	%Mn	%P, max	%S, max
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,035	0,040
	%Si	%Ni	%Cr	%Mo
	0,15-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30

Sumber: ASTM A29, 2003

Baja AISI 4340 dianggap sebagai *ultrahigh-strength steel*. Baja ini mengkombinasikan *hardenability* yang baik dengan keuletan, ketangguhan, dan kekuatan yang tinggi. Memiliki ketahanan *fatigue* dan ketahanan *creep* yang tinggi. Biasa digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan yang tinggi. Baja ini pun memiliki *weldability* yang baik. Dalam penggunaannya baja ini diproduksi untuk aplikasi *bolt*, *screw*, *gear*, *pinion*, *axle shaft*, *piston*, dan untuk bagian pesawat terbang. Selain itu baja ini sangat baik untuk diberi perlakuan panas seperti *hardening* dan *tempering*. Untuk temperatur *hardening* dapat dilakukan antara temperatur 800 – 845 °C dan waktu tahan selama 15 menit. Kemudian dapat di *quenching* dalam media oli, larutan garam, serta air. Kemudian untuk temperatur *tempering* dapat dilakukan dari temperatur 200 - 650 °C dengan waktu tahan setengah jam dan didinginkan di udara.

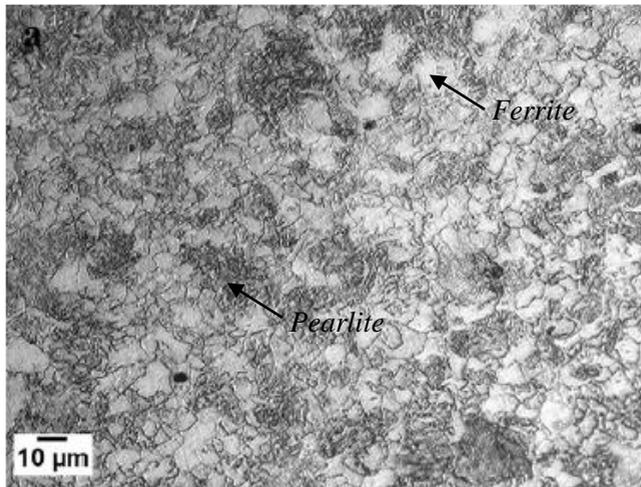


Tabel 2.5 *Mechanical Properties* AISI 4340 setelah *quenching* pada temperatur 845 °C dan *tempering* beberapa variasi temperatur

Tempering temperature		Tensile strength		Yield strength		Elongation in 50 mm (2 in), %	Reduction in area, %	Hardness		Izod impact energy	
°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi			HB	HRC	J	ft · lb
205	400	1980	287	1860	270	11	39	520	53	20	15
315	600	1760	255	1620	235	12	44	490	49,5	14	10
425	800	1500	217	1365	198	14	48	440	46	16	12
540	1000	1240	180	1160	168	17	53	360	39	47	35
650	1200	1020	148	860	125	20	60	290	31	100	74
705	1300	860	125	740	108	23	63	250	24	102	75

Sumber: ASM Handbook Vol 4, 1990

Dari Tabel 2.5 dapat diketahui *mechanical properties* dari baja AISI 4340 yang di *quenching* pada temperatur 845 °C dan di *temper* pada beberapa variasi temperatur. Ketika baja hasil *oil hardening* ditemper pada temperatur yang semakin naik maka kekerasan yang di dapat juga semakin menurun (ASM Handbook, 1990).



Gambar 2.6 Struktur mikro material AISI 4340 perbesaran 1000x (Navarro, 2018)

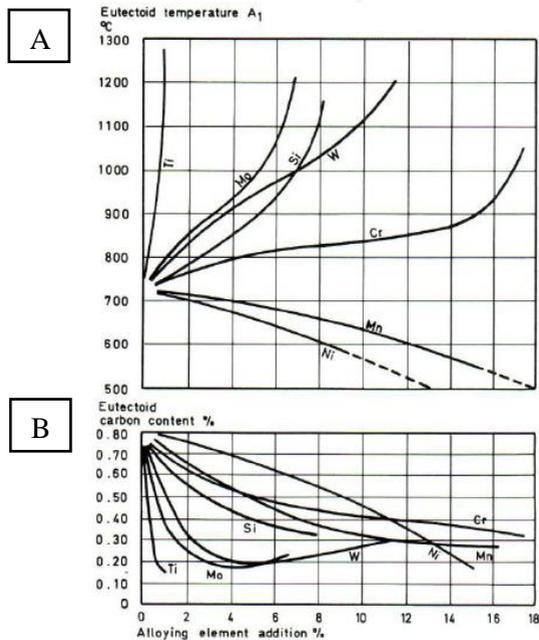
Gambar 2.6 menunjukkan struktur mikro standar dari material AISI 4340. Pada struktur mikro ini tampak ukuran butir agak besar dan terdapat dua fasa dimana daerah gelap merupakan fasa *pearlite* dan daerah terang merupakan fasa *ferrite*.

Komposisi baja AISI 4340 diketahui memiliki beberapa unsur yang persentasenya cukup banyak. Hal ini lah yang menyebabkan baja ini disebut baja paduan rendah dengan jenis baja *nickel-chrom-molybden*. Baja karbon dan baja paduan tentu memiliki beberapa perbedaan terutama dari pengaruh unsur paduan itu sendiri pada beberapa hal. Dibawah ini akan dijelaskan pengaruh unsur paduan terhadap:

1. Diagram Fasa

Ketika suatu unsur paduan ditambahkan ke dalam baja maka diagram fasa Fe-Fe₃C tidak lagi berada dalam kondisi ekuilibrium. Maka dari itu kehadiran unsur paduan akan mengubah titik kritikal yang ada pada diagram fasa khususnya pada titik eutektoid dan membuat titik eutektoid

bergeser ke sebelah kiri . Unsur seperti *nickel* dan *manganese* akan menurunkan temperatur pemanasan kritikal ketika *molybdenum*, *aluminium*, *silicon*, *tungsten*, dan *vanadium* justru menaikannya. Tentunya perubahan temperatur kritikal yang dipengaruhi unsur paduan akan menaikkan atau menurunkan temperatur hardening bila dibandingkan dengan baja karbon biasa. Semua unsur paduan cenderung mengurangi kadar karbon pada titik eutektoid namun hanya unsur *nickel* dan *manganese* yang menurunkan temperatur eutektoid. (Avner, 1987)

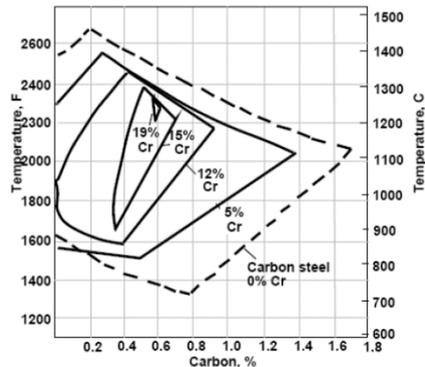


Gambar 2.7 Pengaruh unsur paduan terhadap (a) temperatur eutektoid dan (b) kadar karbon dalam eutektoid (Avner, 1987)

Gambar 2.7 menunjukkan pengaruh unsur paduan terhadap (a) temperatur eutektoid dan (b) kadar karbon



dalam eutektoid. Penambahan jumlah *chrom* akan menaikkan temperatur eutektoid dan menurunkan kadar karbon pada eutektoid. Penambahan *molybdenum* akan menaikkan temperatur eutektoid dan menurunkan kadar karbon pada eutektoid. Penambahan jumlah *nickel* dan *manganese* akan menurunkan temperatur eutektoid dan menurunkan kadar karbon pada eutektoid sehingga mencegah transformasi *austenite* pada pendinginan lambat. Unsur ini disebut juga sebagai unsur penstabil *austenite*. Jadi *austenite* akan dipertahankan pada temperatur kamar, biasanya terjadi pada *austenitic stainless steels*. (Avner, 1987)



Gambar 2.8 Pengaruh kadar *chromium* terhadap luasan daerah austenite (Avner, 1987)

Gambar 2.8 menunjukkan kondisi dari luasan daerah austenite dengan penambahan jumlah unsur paduan. Luasan austenite berkurang ketika kadar unsur paduan *Chromium* semakin banyak dan akan menggeser titik eutektoid ke sebelah kiri atas.

2. Pembentuk atau penstabil fasa tertentu

Pada dasarnya terdapat beberapa kelarutan untuk semua elemen pada ferit, namun beberapa elemen tidak ditemukan secara besar dalam fasa karbida. *Nickel*,



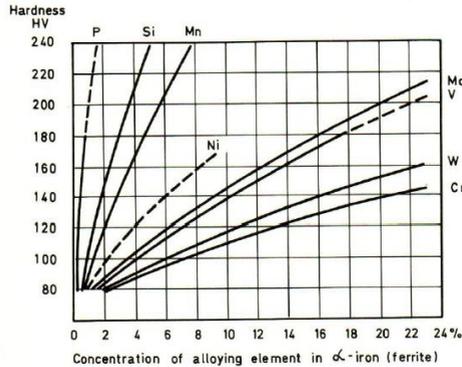
aluminium, silicon, copper, dan cobalt ditemukan besar larut dalam ferit. Dengan adanya kehadiran karbon, proporsi yang cukup besar unsur grup 2 ditemukan larut dalam ferit. Karena itu kecenderungan pembentuk karbida hanya muncul ketika terdapat jumlah karbon yang signifikan (Avner, 1987). Berikut merupakan kecenderungan unsur untuk membentuk fasa tertentu.

Tabel 2.6 Perilaku unsur paduan dalam baja

Alloying Element	Group 1	Group 2
	Dissolve in Ferrite	Combined in Carbide
Nickel	Ni	-
Silicon	Si	-
Aluminium	Al	-
Copper	Cu	-
Manganese	Mn	Mn
Chromium	Cr	Cr
Tungsten	W	W
Molybdenum	Mo	Mo
Vanadium	V	V
Titanium	Ti	-

Sumber: Avner, 1987

Tabel 2.6 menjelaskan perilaku unsur paduan dalam baja. Dari beberapa unsur paduan ada yang cenderung larut dalam ferit dan unsur lainnya cenderung membentuk karbida dengan berikatan ketika berinteraksi dengan karbon. Untuk unsur yang larut dalam ferit akan meningkatkan kekerasan dan kekuatan ferit itu sendiri. Urutan keefektifan penguatan besi berdasarkan berat pada *unsur chromium, tungsten, vanadium, molybdenum, nickel, manganese, dan silicon* dapat dilihat pada Gambar 2.9



Gambar 2.9 Pengaruh unsur paduan terhadap kekerasan ferit (Avner, 1987)

Selain itu jumlah karbida pun dipengaruhi oleh kehadiran unsur-unsur paduan yang dapat membuat sifat dari baja menjadi keras dan getas. Kehadiran unsur pembentuk karbida mempengaruhi temperatur pengerasan dan waktu perendaman. Karbida kompleks lambat untuk larut dan cenderung tersisa dalam austenite. Ketika ada karbida yang tidak larut maka akan berpengaruh pada penurunan pertumbuhan butir. Hal ini tentu menurunkan kemampuan baja untuk dikeraskan. Namun ketika karbida larut dalam austenite, unsur pembentuk karbida menjadi sangat berpengaruh untuk *deep-hardening*. Untuk seluruh karbida yang ditemukan memiliki sifat keras dan getas. Untuk karbida chrom dan karbida vanadium sangat luar biasa untuk memberikan kekerasan dan ketahanan aus. (Avner, 1987)

3. Diagram Transformasi

Unsur paduan memiliki pengaruh besar pada mekanisme transformasi pada semua jenis transformasi dari *austenite* ke *pearlite*, *bainite*, dan *martensite*. Unsur paduan yang hanya larut di dalam *ferrite* hanya akan memberikan efek kuantitatif pada proses transformasi.



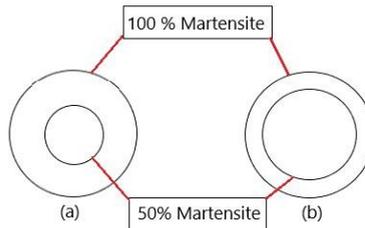
Unsur *cobalt* akan mempercepat proses pembentukan *ferrit* dan *cementite* pada pendinginan. Namun unsur-unsur lain seperti *nickel*, *silicon*, *copper*, *aluminium*, dan sebagainya justru akan menghambat. Unsur-unsur paduan pembentuk karbida akan memberikan pengaruh secara kuantitatif dan kualitatif pada *isothermal transformation*, jenis unsur seperti *chrom*, *molibdenum*, *tungsten*, *vanadium* mempengaruhi dekomposisi *austenite* pada temperatur yang berbeda. Pengaruh unsur paduan secara kuantitatif berpengaruh pada banyaknya fasa yang terbentuk setelah pendinginan. Sedangkan pengaruh unsur paduan secara kualitatif akan memudahkan mendapatkan suatu fasa tertentu hanya dengan pendinginan equilibrium. Unsur seperti *chrom*, *molibdenum*, *tungsten*, *vanadium* menghambat transformasi *pearlite* pada temperatur 700-500 °C dan menghambat transformasi *bainite* pada temperatur 500-400 °C. Namun akan mempercepat transformasi *bainite* pada temperatur 400-300 °C (Maalekian, 2007). Dapat disimpulkan bahwa pengaruh unsur paduan pada diagram transformasi adalah akan menggeser kurva ke kanan. Juga unsur-unsur paduan kecuali *cobalt* akan menurunkan temperatur pembentukan *martensite* M_s , juga M_f -nya. Hal ini menyebabkan pembentukan *martensit* menjadi lebih mudah (Avner, 1987).

4. *Hardenability*

Hardenability adalah kemampuan baja untuk dapat dikeraskan dengan membentuk *martensite*. *Hardenability* menggambarkan dalamnya pengerasan yang diperoleh dengan pengerasan, biasanya dinyatakan dengan jarak suatu titik di bawah permukaan dimana strukturnya terdiri dari 50% *martensite* (dianggap bahwa pengerasan terjadi bila terjadi *martensite* sebanyak 50%). Suatu baja dikatakan memiliki *hardenability* baik bila baja memperlihatkan tebal pengerasan (*depth of hardening*)



yang besar dan dikatakan memiliki *hardenability* buruk bila baja memiliki pengerasan yang dangkal (*shallow hardening*) (Avner, 1987). Unsur paduan yang memperlambat reaksi *ferrite* dan *pearlite* akan meningkatkan *hardenability*. *Austenite grain size* dan kadar karbon juga mempengaruhi *hardenability* pada baja (Maalekian, 2007). Gambar 2.10 berikut memperlihatkan ilustrasi kedalaman pengerasan



Gambar 2.10 Ilustrasi *hardenability* pada baja (a) *hardenability* baik (*deep hardening*) (b) *hardenability* buruk (*shallow hardening*)

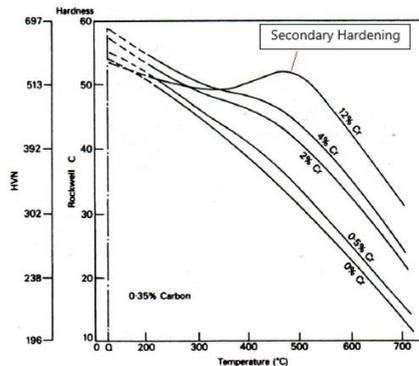
Gambar 2.10 merupakan ilustrasi *hardenability* pada baja (a) *hardenability* baik (*deep hardening*) (b) *hardenability* buruk (*shallow hardening*). Suatu baja dikatakan dapat dikeraskan bila memiliki jumlah *martensite* sebanyak 50% dibawah permukaan. Gambar (a) memperlihatkan bahwa baja memiliki 50% *martensite* dengan kedalaman yang cukup besar. Sedangkan gambar (b) memperlihatkan bahwa baja memiliki 50% *martensite* dengan kedalaman yang dangkal.

5. *Tempering*

Baja yang dikeraskan akan melunak bila dipanaskan kembali (*tempering*). Semakin tinggi temperatur *tempering* maka akan semakin banyak penurunan kekerasan yang terjadi. Semua unsur paduan akan menghambat laju penurunan kekerasan karena *tempering*, karenanya baja paduan akan membutuhkan

temperatur *tempering* yang lebih tinggi. Unsur-unsur yang mudah larut dalam ferrit, unsur yang tidak membentuk karbida seperti *nickel*, *silicon*, dan *manganese* pengaruhnya kecil sekali.

Unsur pembentuk karbida mempunyai pengaruh yang lebih kuat apalagi unsur pembentuk karbida kompleks seperti *chrom*, *tungsten*, *molibdenum*, dan *vanadium*, pengaruhnya kuat sekali. Bukan saja akan menghambat peurunan kekerasan, bahkan bila terdapat dalam jumlah besar dapat menaikkan kekerasan pada *tempering* pada temperatur tinggi. Fenomena ini disebut sebagai *secondary hardening*.



Gambar 2.11 Pengaruh kadar *Chrom* terhadap penurunan kekerasan setelah *tempering* (Avner, 1987)

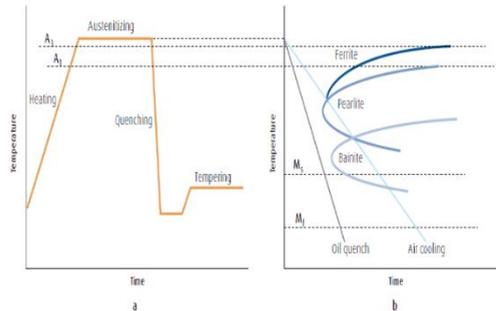
Dari gambar 2.11 dapat diketahui bahwa untuk temperatur yang sama dan dengan kadar *chrom* yang berbeda akan menunjukkan perbedaan penurunan kekerasan. Hal ini membuktikan bahwa unsur paduan akan menghambat penurunan kekerasan pada saat *tempering*. Namun pengaruh unsur *chrom* sebagai pembentuk karbida apabila ditambahkan pada persentase yang tinggi terlihat menghasilkan *secondary hardening*. (Avner, 1987)



2.5 Perlakuan Panas

Perlakuan panas adalah kombinasi dari pemanasan dan pendinginan serta waktu dan diaplikasikan pada logam atau paduan pada saat keadaan solid dengan tujuan untuk mendapatkan *mechanical properties* yang diinginkan. Biasanya dilakukan untuk mendapatkan sifat tahan aus yang tinggi atau kekuatan yang lebih baik. Pengerasan dilakukan dengan memanaskan baja sampai temperatur *austenite* (temperatur kritikal). Tujuannya adalah untuk membentuk fasa *austenite* yang homogen kemudian dilakukan pendinginan sehingga akan mendapatkan struktur baru yang memiliki sifat yang keras (Avner, 1987). Secara umum perlakuan panas dibagi dalam tiga tahap, yaitu:

1. Pemanasan sampai suhu tertentu sesuai dengan proses perlakuan panas dan dengan kecepatan tertentu tergantung dari dimensi dan konduktifitas perpindahan panas benda kerja.
2. Mempertahankan suhu untuk waktu tertentu, sehingga temperaturnya merata pada seluruh bagian benda kerja.
3. Pendinginan dengan media pendingin yang bergantung pada proses perlakuan panas dan benda kerja. Pada baja karbon rendah dan sedang biasanya digunakan air sebagai media pendingin, karena laju pendinginannya cukup cepat sehingga terbentuk *martensit*. Sedangkan pada baja karbon tinggi dan baja paduan digunakan minyak sebagai media pendingin dengan laju pendinginan yang lebih lambat. (Rina Dwi Yani, 2008)



Gambar 2.12 (a) Perlakuan panas *Quenching-Tempering* pada baja (b) Kurva *Continuous Cooling Transformation* (Pampania, 2015)

Prosedur untuk *quenching* dan *tempering* dapat dilihat seperti pada Gambar 2.12. Pada gambar 2.12 (a) baja dipanaskan hingga temperatur austenitasi di atas temperatur A_3 kemudian ditahan beberapa waktu sampai membentuk fasa *austenite* yang homogen. Kemudian didinginkan cepat ke dalam media oli atau pun didinginkan lambat dengan pendinginan udara. Setelah mencapai temperatur kamar maka dilakukan pemanasan kembali untuk mencapai kekerasan akhir. Gambar 2.12 (b) merupakan kurva *continuous cooling transformation*, dari kurva dapat dilihat dengan melakukan pendinginan menggunakan media oli dan dengan media udara akan menghasilkan transformasi fasa yang berbeda.

2.5.1 Pemanasan Hingga Temperatur Austenitasi

Baja dikeraskan dengan austenitisasi, pendinginan cepat (*quenching*), dan kemudian tempering untuk mencapai kekerasan akhir. Agar memperoleh *martensit* yang keras maka pada saat pemanasan harus dapat terjadi struktur *austenite*, karena hanya *austenite* yang dapat bertransformasi menjadi *martensite*. Baja memiliki komposisi yang berbeda-beda maka dari itu penting

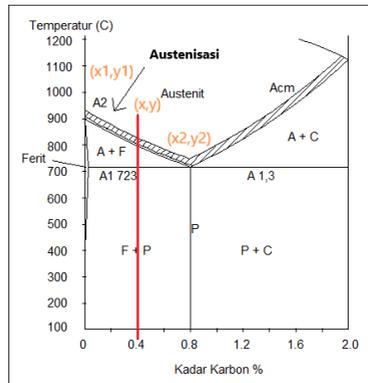


untuk memahami ketebalan maksimum yang dapat dikeraskan pada suatu media pendingin yang spesifik, misalnya air atau media oli, dan memperkirakan variasi kekuatan akhir dan keuletan yang dapat diperoleh pada temperatur *tempering* yang berbeda-beda. *Tempering* tidak digunakan untuk mengeraskan baja. Baja dikeraskan dengan austenitisasi dan *quenching*. *Tempering* dilakukan untuk mengembalikan keuletan yang hilang saat dikeraskan dan biasanya penghalusan (*softening*) diperoleh dengan *tempering*.

Kandungan karbon sangat penting terhadap kemampuan suatu baja untuk dikeraskan. Keuletan berkurang dengan meningkatnya kandungan karbon, kandungan karbon pada umumnya dijaga sekitar 0,45% pada baja teknik. Penambahan unsur paduan akan menggeser hidung diagram TTT ke kanan, sehingga mempermudah benda kerja yang tebal untuk dikeraskan. Unsur paduan tidak meningkatkan kekerasan *martensit* secara signifikan, tetapi *hardenability*, kedalaman dari permukaan struktur mikro *martensit* dapat dihasilkan pada baja (Campbell 2008).

Pada proses austenitisasi, baja dipanaskan sampai daerah austenit (γ) dan ditahan selama beberapa waktu tertentu untuk melarutkan karbida sampai menjadi larutan padat austenit. Waktu penahanan pada saat austenitisasi dapat ditentukan dengan diagram transformasi pemanasan seperti pada gambar 2.11 atau pada umumnya adalah minimal 1 jam atau 15 sampai 20 menit untuk setiap ketebalan 25 mm yang nantinya akan diikuti dengan pendinginan cepat pada air, minyak, maupun udara. Temperatur yang dibutuhkan untuk melakukan austenitisasi pada kadar karbon *hypoeutectoid* adalah sekitar 30-50 °C diatas temperatur kritis A_3 . Temperatur ini sama dengan temperatur pada saat proses *annealing*. Temperatur dibawah garis A_3 masih banyak terdapat *proeutectoid ferrit* yang mana akan tersisa setelah *quenching*, hal ini tentu akan menurunkan kekerasan. Diagram temperatur austenitisasi ditunjukkan seperti pada gambar 2.13 dan waktu tahan pemanasan ditunjukkan pada gambar 2.14.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Gambar 2.13 Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas (Campbell, 2008)

Metode perhitungan temperatur austenitisasi dapat dilihat pada persamaan (2.1) sebagai berikut

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \quad \dots 2.1$$

$$\frac{y-910}{723-910} = \frac{0,4-0}{0,8-0}$$

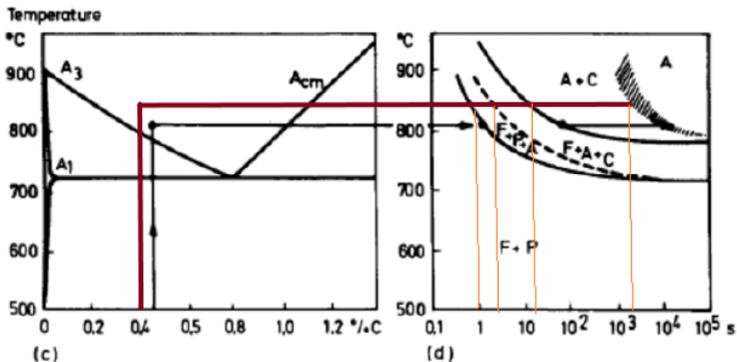
$$y = 816,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatur austenitisasi} = 816,5 + 50 = 866,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Gambar 2.13 menunjukkan rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas. Peningkatan kadar karbon, temperatur berkurang sepanjang garis A3 sampai mencapai minimum pada A1, komposisi eutektoid (0,8%), dan kemudian meningkat sepanjang garis A_{cm}. Tahap pertama pada pembentukan austenit adalah nukleasi dan pertumbuhan austenit dari perlit (ferit+Fe₃C). Pembentukan *austenite* yang homogen dapat dipercepat dengan meningkatkan temperatur dan meningkatkan kehalusan partikel karbida mula-mula. Meskipun begitu, temperatur austenitisasi perlu dijaga serendah mungkin untuk mengurangi retak dan distorsi, mengurangi oksidasi dan dekarburisasi, dan mengurangi pertumbuhan butir (Campbell,



2008). Temperatur yang dibutuhkan untuk mencapai 100% austenit pada baja *hypereutektoid* cukup tinggi, meskipun begitu austenit untuk pengerasan pada baja dapat diperoleh pada temperatur sekitar 770°C. Karbida yang tidak terlarut dalam jumlah kecil memiliki pengaruh yang kecil pada sifat mekanik akhir baja. Temperatur austenisasi dapat dihitung menggunakan persamaan (2.1). Dari persamaan diketahui x merupakan kadar karbon pada baja dan y adalah temperatur. Untuk baja 4340 merupakan jenis baja *hypoeutektoid* dimana kadar karbonnya adalah 0-0,8 %C. Maka x_1 merupakan kadar karbon pada saat 0 %C dan y_1 adalah temperatur pada saat 0 %C yaitu 910 °C. Kemudian x_2 merupakan kadar karbon pada saat 0,8 %C dan y_2 adalah temperatur pada saat 0,8% C yaitu 723 °C. Lalu x merupakan kadar karbon pada baja 4340 dan y merupakan temperatur A3. Setelah melakukan perhitungan dengan persamaan (2.1) maka didapatkan temperatur A3 sebesar 816,5 °C kemudian untuk temperatur austenisasi adalah 30-50 °C diatas A3, maka temperatur austenisasinya adalah 866,5 °C.



Gambar 2.14 Diagram transformasi pemanasan (Avner, 1987)

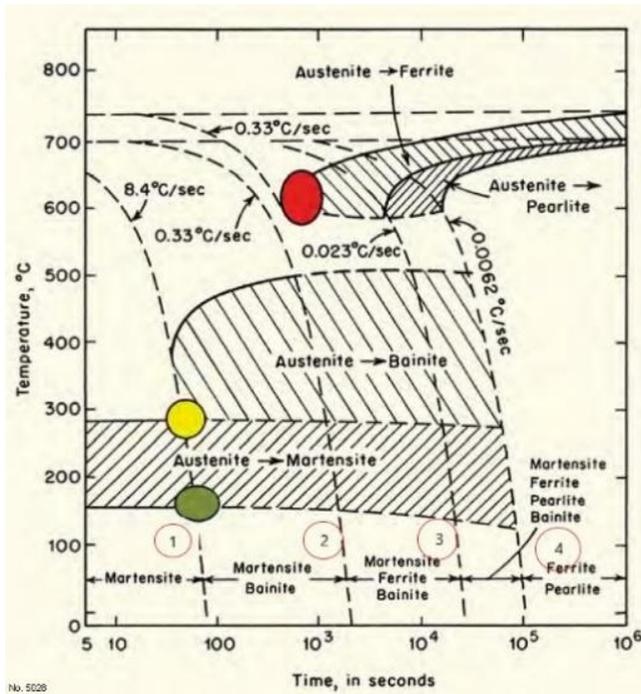
Gambar 2.14 menunjukkan transformasi selama proses pemanasan hingga mencapai fasa *austenite*. Setelah mencapai temperatur 866,5 °C, fasa pada baja adalah *ferit* dan *perlit*. Pada waktu 1 detik maka *ferit* dan *perlit* akan mengalami transformasi



mejadi *ferit*, *perlit*, dan *austenite*. Setelah mencapai waktu 5 detik fasa berubah menjadi *ferit*, *asutenit*, dan *cementite*. Kemudian pada waktu 5 detik hingga 2000 detik fasa pada baja adalah *austenite* dan *cementite*. Setelah melewati 2000 detik maka fasa pada baja adalah *austenite* yang homogen. Gambar 2.13 memberikan informasi kebutuhan *holding time* pada proses austenisasi.

2.5.2 Quench and Tempered

Proses perlakuan panas *hardening* dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur austenitisasi, ditahan beberapa waktu tertentu pada temperatur tersebut, lalu didinginkan dengan cepat (*quenching*), sehingga diperoleh martensit. Pada suatu benda kerja yang dikeraskan maka kekerasan yang terjadi akan tergantung pada seberapa banyak martensit yang terbentuk dan kekerasan martensit itu sendiri. Banyaknya martensit yang akan terjadi tergantung pada seberapa banyak austenit yang terjadi pada saat pemanasan dan seberapa cepat pendinginannya sedangkan kekerasan martensit tergantung pada kadar karbon dalam baja yang terlarut dalam austenit. Pada saat baja didinginkan secara cepat dari temperatur austenitisasi (*quench*), karbon tidak memiliki waktu untuk berdifusi dari struktur mikro austenit ketika struktur ini bertransformasi menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*), struktur ini disebut martensit. Saat kondisi perlakuan panas sebenarnya, transformasi umumnya tidak terjadi saat kondisi isothermal tetapi terjadi saat kondisi pendinginan yang terus menerus (*Continuous Cooling*). Proses ini dapat dilihat pada diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*) berikut

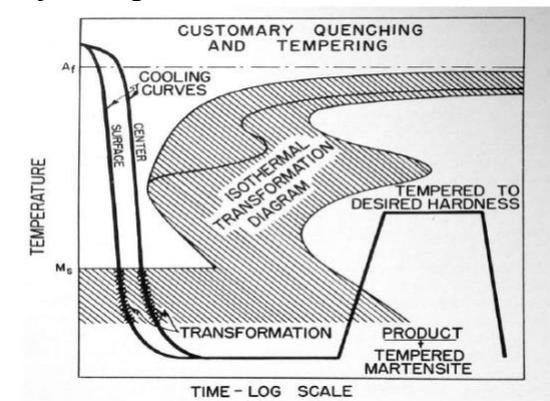


Gambar 2.15 Diagram CCT untuk baja AISI 4340
(www.steeldata.info)

Pada gambar 2.15 dapat dilihat bahwa diagram CCT untuk baja AISI 4130 memiliki beberapa keterangan. Pada gambar tersebut terdapat daerah pembentukan suatu struktur seperti *ferrit*, *perlit*, *bainit* dan *martensit*. Diagram ini menjelaskan bagaimana pengaruh dari kecepatan pendinginan terhadap hasil akhir dari struktur mikro baja 4340. Pada garis (1) bila baja didinginkan cepat dengan kecepatan 8,4 °C/sec maka baja dapat langsung membentuk *martensit*. Pada garis (2) bila baja didinginkan agak lambat dengan kecepatan 0,33 °C/sec maka akan terdapat *martensit* dan *bainit* pada struktur akhirnya. Pada garis (3) bila baja didinginkan lambat dengan kecepatan 0,023 °C/sec maka struktur akhir yang didapat adalah *martensit*, *ferrit*, dan *bainit*. Pada garis (4) bila baja

didinginkan sangat lambat dengan kecepatan $0,0062\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ maka struktur akhir yang didapat adalah *ferrite* dan *pearlite*, struktur *martensit* tidak mungkin terbentuk pada pendinginan ini.

Proses *quenching* merupakan proses mendinginkan pada laju pendinginan tertentu untuk membentuk *martensit*. Distorsi struktur BCT menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang tinggi pada baja yang di-*quench*. *Quenching* dikatakan berhasil jika telah mampu mendapatkan struktur mikro, kekerasan, kekuatan, maupun ketangguhan yang diinginkan dengan tetap meminimalisir tegangan sisa, distorsi, dan kemungkinan terjadinya retak/*cracking*. Penggunaan media *quenching* yang tepat juga ikut berpengaruh pada kecepatan pendinginan. Semakin tinggi kecepatan pendinginan maka semakin dalam juga efek dari pengerasan/pembentukan *martensit*. Beberapa baja di-*quench* dengan air atau oli untuk menghasilkan laju pendinginan yang cukup. Pendinginan dengan air menghasilkan laju pendinginan tercepat juga menghasilkan tegangan sisa yang paling tinggi sehingga dapat menghasilkan distorsi dan retak.



Gambar 2.16 *Isothermal Transformation Diagram* untuk proses *quenching* dan *tempering* (Makela, 2012)

Gambar 2.16 merupakan *Isothermal Transformation Diagram* untuk proses *quenching* dan *tempering*. Ketika baja dipanaskan sampai pada temperatur austensasi maka akan



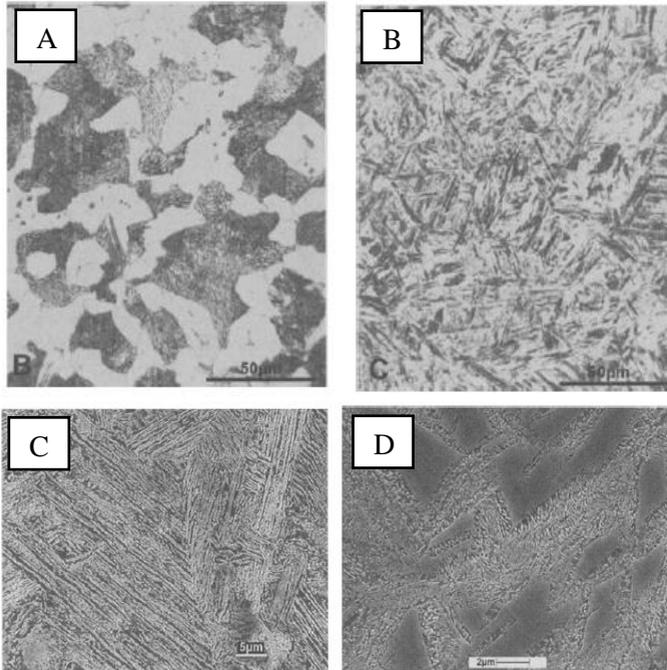
dilakukan pendinginan cepat sampai dibawah garis M_s yang merupakan garis *martensite start*. Setelah pendinginan maka didapat transformasi *asutemite* menjadi *martensite*. Setelah itu akan dilakukan pemanasan kembali sampai pada temperatur tertentu untuk melunakkan baja agar tidak terlalu getas. Fasa *martensite* memiliki karakteristik yang keras, getas, dan tegang. Dengan memanaskan kembali baja maka dapat menghilangkan tegangan yang ada pada fasa *martensite*. Proses ini dinamakan proses *tempering*. Struktur akhir dari *tempering* adalah baja dengan struktur *tempered martensite*.

Tempering merupakan perlakuan untuk menghilangkan tegangan dalam dan menguatkan baja dari kerapuhan. *Tempering* didefinisikan sebagai proses pemanasan logam setelah dikeraskan pada temperatur *tempering* (di bawah temperatur kritis), yang dilanjutkan dengan proses pendinginan. Fasa yang terbentuk setelah proses *tempering* adalah *tempered martensit*. Fasa tersebut terdiri dari struktur martensit yang telah kehilangan tetragonalitasnya akibat munculnya fasa karbida epsilon karena karbon memiliki energi untuk berdifusi keluar dari struktur martensit. Fasa karbida epsilon merupakan senyawa submikroskopik sebagai tanda awal *tempering* dilakukan pada temperatur pada kisaran 100-200°C. Pada temperatur ini, senyawa submikroskopik tersebut berupa $Fe_{2.4}C$ yang selanjutnya berubah menjadi Fe_3C ketika temperatur dinaikan (Avner, 1974). Dengan keluarnya karbon dari struktur martensit maka tegangan di dalam struktur BCT akan berkurang sehingga juga kekerasan/kekuatannya mulai berkurang. Secara umum dapat dikatakan bahwa bila temperatur penemperan makin tinggi maka kekerasannya akan makin rendah. Sebagai akibat penemperan bukan hanya penurunan kekerasan tetapi juga naiknya keuletan/ketangguhan, makin tinggi temperatur temper makin rendah kekerasannya dan makin tinggi keuletan/ketangguhannya. Bahkan dalam banyak hal tujuan utama melakukan penemperan adalah memperoleh kembali sebagian keuletan/ketangguhan. Pada sebelumnya telah disebutkan bahwa fasa yang terbentuk dari



proses *tempering* adalah *tempered martensit*. Struktur mikro dari *tempered martensit* terdiri dari partikel sementit yang sangat kecil dan terdispersi merata yang tertanam dalam matriks ferit kontinyu. Ini mirip dengan struktur mikro spheroidite kecuali partikel sementit jauh lebih kecil. *Tempered martensit* mungkin hampir sekuat dan sekeras martensit, namun dengan keuletan dan ketangguhan yang lebih tinggi. Fase sementit memperkuat matriks ferit di sepanjang batas, dan martensit bertindak sebagai penghalang gerakan dislokasi selama deformasi plastis. Fase ferit kontinyu juga sangat ulet dan cukup keras yang membuat sifat dari *tempered martensit* meningkat (Callister, 2010).

Baja yang telah dikeraskan bersifat rapuh dan tidak cocok untuk digunakan, melalui proses *tempering* kekerasan dan kerapuhan dapat diturunkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan. Kekerasan turun, kekuatan tarik akan turun pula sedangkan keuletan dan ketangguhan baja akan meningkat. Meskipun proses ini menghasilkan baja yang lebih lunak, proses ini berbeda dengan proses anil (*annealing*) karena sifat-sifat fisis dapat dikendalikan dengan cermat. Proses *tempering* pada umumnya diawali dengan proses *quenching*. Lamanya penemperan sesuai dengan kekuatan bahan tersebut.

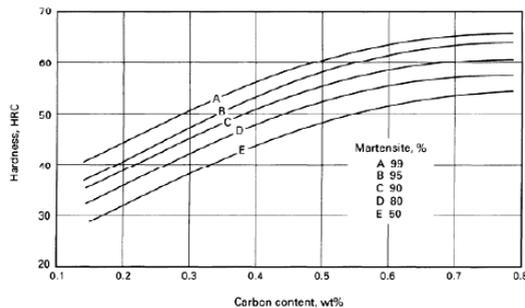


Gambar 2.17 Struktur mikro hasil transformasi (a) *Ferrite-Pearlite* (b) *Plate Martensite* (c) *Upper Bainite* (d) *Lower Bainite* (Charre, 2004)

Gambar 2.17 menjelaskan hasil struktur mikro hasil transformasi (a) *Ferrite-Pearlite* (b) *Plate Martensite* (c) *Upper Bainite* (d) *Lower Bainite*. Gambar 2.17 (a) merupakan struktur dari *ferrite-pearlite*, terlihat bagian terang merupakan *ferrite* dan bagian gelap merupakan *pearlite* yang berbentuk lamel-lamel yang tersusun dari *ferrite* dan *cementite*. Gambar 2.17 (b) merupakan struktur dari *plate martensit*, struktur ini didapat pada *medium carbon steel*. Gambar 2.17 (c) merupakan struktur dari *upper bainite*. Gambar 2.17 (d) merupakan struktur dari *lower bainite*.

2.6 Hardenability

Tujuan akhir dari proses perlakuan panas pada baja adalah untuk meningkatkan kekerasan. Untuk mencapai kekerasan maka fase mikrostruktur yang paling berperan adalah kehadiran *martensite*, yang mana fase ini menjadi konstituen yang paling keras pada baja paduan rendah. Kekerasan dari martensite pada umumnya bergantung pada kadar karbon yang terkandung pada baja. Bila mikrostruktur tidak seluruhnya martensite maka kekerasan pun akan berkurang. Pada proses pengerasan sangat penting untuk mencapai kekerasan penuh untuk kedalaman minimum tertentu setelah pendinginan. Hal ini bertujuan untuk membentuk fase full martensite. (ASM vol 4, 1991)



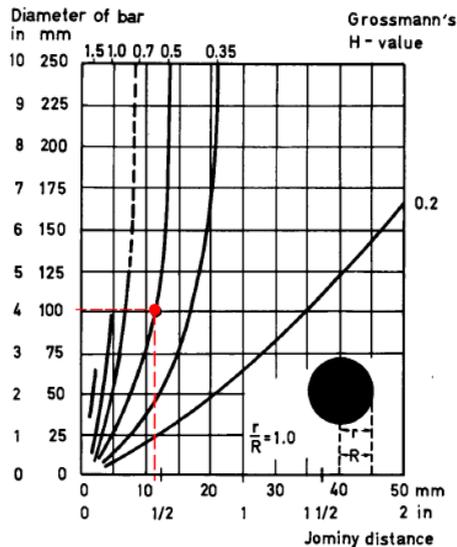
Gambar 2.18 Hubungan antara kekerasan, kadar karbon, dan jumlah martensite (Avner, 1987)

Gambar 2.18 menjelaskan tentang hubungan antara kekerasan, kadar karbon, dan jumlah *martensite*. Dari grafik dapat dilihat bahwa peluang terbentuknya *martensite* sangat dipengaruhi oleh kadar karbon yang dibuktikan dengan naiknya kurva menuju nilai kekerasan yang lebih tinggi. Dan jumlah *martensite* pun berbanding lurus dengan kekerasan dari baja. Semakin banyak jumlah *martensite* maka akan semakin keras pula baja. Dari hal-hal tersebut dapat disimpulkan bahwa *hardenability* merupakan kemampuan baja untuk dapat dikeraskan dengan membentuk *martensite*. *Hardenability* menggambarkan dalamnya pengerasan



yang diperoleh dengan pengerasan. Suatu baja dikatakan memiliki *hardenability* yang tinggi bila baja memperlihatkan tebal pengerasan (*depth of hardening*) yang besar atau dapat mengeras pada seluruh penampang dari suatu benda yang cukup besar (Avner, 1987).

Hardenability dikatakan baik apabila pengerasan dapat mencapai bagian dalam material (*deep hardening*) dan dikatakan buruk apabila pengerasannya dangkal (*shallow hardening*). Untuk mengetahui kekerasan pada suatu material dapat dihitung menggunakan kurva kesetaraan di suatu permukaan batang dengan titik jominy.



Gambar 2.19 Kesetaraan suatu titik di permukaan batang yang diquench dengan H tertentu dengan titik Jominy (Avner, 1987)

Gambar 2.19 merupakan kurva kesetaraan suatu titik di permukaan batang yang diquench dengan H tertentu dengan titik Jominy. Sumbu y merupakan diameter dari permukaan batang, sumbu x merupakan jarak titik jominy, dan H merupakan nilai koefisien kekuatan pendinginan. Sebagai contoh bila suatu

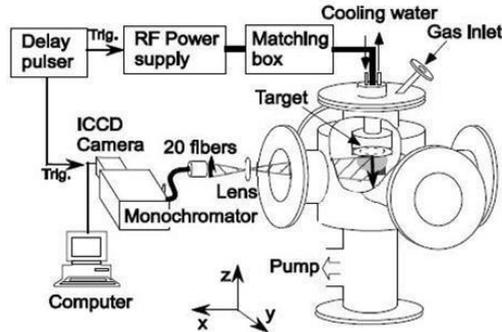


material memiliki diameter 100 mm dilakukan pendinginan dengan menggunakan media oli ($H=0,5$) maka dari kurva dapat ditentukan jarak jominynya dengan menarik garis. Untuk diameter 100 mm maka kekerasan permukaannya sama dengan jarak 12 mm pada specimen jominy (Avner, 1987).

2.7 Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi kimia merupakan suatu pengujian untuk mengetahui kandungan unsur kimia yang terdapat pada suatu logam benda uji. Komposisi kimia dari logam sangat penting untuk menghasilkan sifat logam yang baik. *Spectrometer* adalah alat yang mampu menganalisa unsur-unsur logam induk dan campurannya dengan akurat, cepat dan mudah dioperasikan. Pengujian OES dilakukan untuk mengetahui persentase komposisi unsur kimia dalam spesimen uji. Standar pengujian yang digunakan berdasarkan ASTM A571 yang berisi tentang metode analisis komposisi kimia untuk baja, baja tahan karat, dan baja paduan lain. Preparasi spesimen dilakukan dengan mengamplas permukaan agar permukaan menjadi rata dan bersih.

Pada *emission spectroscopy*, energi yang diperoleh dari atom yang mengemisikan radiasi elektromagnetik dikumpulkan dan dianalisis oleh spektrometer. Gambar 2.20 menunjukkan skema ilustrasi OES. Emisi yang terbentuk pada frekuensi tertentu dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis unsur pada spesimen uji. Berdasarkan teori kuantum, elektron menempati level energi yang terendah saat kondisi normal (*ground state*). Namun, ketika atom diberi energi potensial dari luar maka elektron dapat tereksitasi keluar kulit menempati tingkat energi yang lebih tinggi. Kondisi tersebut dinamakan kondisi tereksitasi. Elektron yang keluar ditangkap oleh detektor dan sistem komputer akan mengenalinya melalui konfigurasi energi dari elektronnya. Jadi unsur yang terdapat pada spesimen dapat diketahui baik secara kualitatif maupun kuantitatif (Nayan, 2009).



Gambar 2.20 Skema ilustrasi uji OES (Nayan, 2009)

2.8 Pengujian Kekerasan

Pada umumnya, kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen (Dieter, 1987). Hal ini sering diartikan sebagai ukuran kemudahan dan kuantitas khusus yang menunjukkan nilai kekerasan material. Pada pengujian kekerasan terdapat tiga jenis ukuran kekerasan, hal ini tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu, kekerasan goresan (*scratch hardness*), kekerasan lekukan (*indentation hardness*) dan kekerasan pantulan (*rebound*). Pengujian yang sering dilakukan pada logam adalah pengujian kekerasan indentasi. Pada model ini kekerasan suatu material diukur terhadap tahanan plastis dari permukaan suatu material komponen konstruksi mesin dengan spesimen standart terhadap *indenter*. Terdapat berbagai macam uji kekerasan indentasi, antara lain: uji kekerasan *Brinell*, *Vickers*, *Rockwell*, dan *Knoop*

2.8.1 Uji Kekerasan Vickers

Uji kekerasan *Vickers* menggunakan penumbuk piramida intan yang dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besarnya sudut antara permukaan-permukaan piramida yang saling berhadapan adalah 136° . Sudut ini dipilih karena nilai tersebut mendekati sebagian besar nilai perbandingan yang diinginkan antara diameter



lekukan dan diameter bola penumbuk pada uji kekerasan *brinell*. Angka kekerasan piramida intan (*DPH*), atau angka kekerasan *Vickers* (*VHN* atau *VPH*), didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan (Dieter, 1987). Pada prakteknya luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. *VHN* dapat ditentukan dari persamaan (2.2) berikut

$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = \frac{1,845P}{L^2} \quad \dots 2.2$$

2.9 Uji Keausan (*Pin-on-disc*)

Pin-On-Disc merupakan alat dari tribotester yang di gunakan untuk mengetahui gesekan dan keausan suatu bahan material yang saling bersentuhan. *Pin-On-Disc* memiliki beberapa komponen yaitu pin yang ujungnya berbentuk bola atau flat yang terbuat dari bahan material tertentu yang diinginkan untuk pengujian tersebut dan disc berbentuk piringan yang juga terbuat dari bahan material yang diinginkan (Armanto, 2012). Pada proses pengujian menggunakan *PinOn-Disc* juga bisa divariasi beban dan temperatur sesuai dengan kebutuhan penelitian. Keausan dari bahan terjadi karena banyak faktor dan mekanismenya dipengaruhi oleh berbagai parameter, meliputi parameter bahan, lingkungan, kondisi operasi, dan geometri dari keausan. Keausan (*wear*) adalah hilangnya materi dari permukaan benda padat sebagai akibat dari gerakan mekanik.

Pengujian ini dapat diaplikasikan pada beberapa jenis material, salah satu ketentuannya yaitu dimensi material tertentu dan dapat menahan tekanan yang diberikan selama pengujian tanpa mengalami kegagalan. Bentuk pin secara khusus berbentuk silinder atau bola, dengan diameter antara 2 – 10 mm dan ukuran disc antara 30 – 100 mm, serta memiliki ketebalan 2 – 10 mm.

Berat keausan dan volume keausan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.3) dan (2.4). Untuk faktor keausan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.5). (Darmanto, 2014)



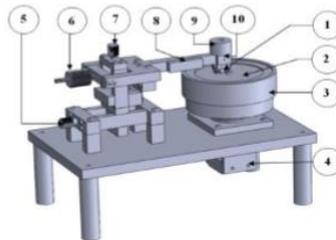
$$\text{Berat keausan} = \text{Berat awal} - \text{berat akhir} \quad \dots 2.3$$

$$\text{Vol. Keausan} = \frac{\text{Berat keausan (gram)}}{\text{Berat jenis } \left(\frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}\right)} \quad \dots 2.4$$

$$\text{Faktor keausan} = \frac{\text{vol keausan (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N)} \times \text{jarak tempuh (m)}} \quad \dots 2.5$$

Alat dan bahan untuk pengujian *pin on disc* adalah :

1. Alat *Tribotester* digunakan untuk menguji keausan pin seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.21



Gambar 2.21 *Tribotester*

2. *Regulator*
Regulator pengatur tegangan listrik digunakan untuk mengatur voltase pada motor listrik penggerak disc agar putaran disc dapat diatur.
3. *Tachometer*
Sebagai alat untuk mengetahui putaran pada disc.
4. Timbangan digital
Sebagai alat untuk mengukur berat pada pin sebelum dan sesudah pengujian.

Tahapan yang harus dilakukan sebelum pengujian dan penelitian yaitu dengan persiapan dan pemeriksaan peralatan: Menyiapkan dan memeriksa alat uji dan peralatan yang digunakan,



Melakukan pengecekan kondisi peralatan (*Pin-On-Disc*, Regulator, Tachometer, Timbangan Digital, Mikroskop), Melakukan perawatan atau penggantian baterai pada peralatan, Memeriksa pemasangan alat uji dan perlengkapan alat uji, Memastikan alat uji semua bisa bekerja dengan semestinya dengan baik untuk mendapatkan hasil yang optimal dan menghindari terjadinya kecelakaan kerja. Tahap yang dilakukan saat memulai pengujian yang pertama adalah melakukan Penimbangan pada pin lalu mengatur putaran disc yang diinginkan. Lalu memasang *pin* dan *disc*, pengujian tiga jenis kondisi pelumasan yang berbeda dan menggunakan alat tribotester *pin-on-disc* dan pengambilan data dari hasil pengujian untuk mengetahui keausan yang terjadi akibat kontak (ASTM G99,2003).

2.10 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi atau mikrostruktur bertujuan untuk mengetahui fasa, bentuk, dan ukuran dari struktur mikro pada material. Selain itu juga untuk memprediksi mikrostruktur yang akan terbentuk setelah adanya proses *hardening*. Pengujian ini menggunakan standar ASTM E3 dengan tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Tahap Persiapan

- *Cutting*: Mereduksi ukuran spesimen yang akan diuji menggunakan gergaji mesin/manual.
- *Mounting*: Membuat pegangan untuk mempermudah pemegangan spesimen saat melakukan proses *grinding*.
- *Grinding*: Menggosok spesimen dengan amplas silikon karbida (SiC) yang dimulai dari grade 80 hingga grade 2000. Sehingga akan diperoleh permukaan yang halus.
- *Polishing*: Memoles spesimen menggunakan pasta alumina dengan tujuan untuk memastikan tidak ada goresan pada permukaan yang akan diujikan.



- *Etching*: Mencelupkan permukaan spesimen uji kedalam larutan etsa. Larutan etsa yang digunakan tergantung dari material yang akan diujikan.
2. Tahap Pengamatan
Tahap ini dilakukan untuk mengamati struktur mikro yang terdapat dalam material yang diujikan menggunakan mikroskop optik. Pengamatan ini dilakukan dengan beberapa kali perbesaran.

2.11 Analisa Kegagalan

Analisa 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. Tujuan utama dari analisa kegagalan adalah untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan serta memberikan solusi-solusi yang dapat dilaksanakan untuk menanggulangi masalah kegagalan tersebut.

Dengan kata lain, analisa kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makrokopis dan mikrokopis 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 industri (Brooks, 2002). Faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri disebabkan oleh beberapa factor seperti:

1. Faktor kesalahan pemilihan material

Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominan yaitu faktor kesalahan dalam memilih material. Tabel 2.7 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material



Tabel 2.7 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin

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

Sumber: Brooks, 2002

2. Perawatan komponen yang kurang baik

Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.8 menunjukkan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi

Tabel 2.8 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin

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

Sumber: Brooks, 2002

3. Kesalahan dalam perancangan komponen

Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:



1. Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
2. Kegagalan getas akibat beban kejut
3. Kegagalan pada temperatur tinggi (pemuluran)
4. *Static delayed fracture*
5. Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
6. Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*
7. Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.
8. Kondisi kerja yang ekstrim
Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin

Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan (<i>fatigue</i>)	25
Kegagalan getas (<i>brittle fracture</i>)	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperatur tinggi	7
Korosi retak tegang, korosi	6
Penggetasan <i>hydrogen</i> dan korosi lelah	3
Abrasi, Erosi	3

Sumber: Brooks, 2002

2.12 Keausan

Definisi paling umum dari keausan yang telah dikenal sekitar 50 tahun lebih yaitu hilangnya bahan dari suatu permukaan

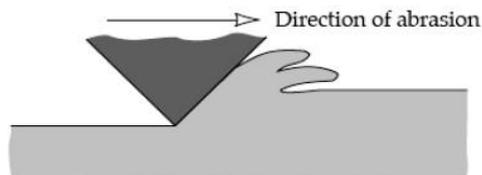
atau perpindahan bahan dari permukaannya ke bagian yang lain atau Bergeraknya bahan pada suatu permukaan. (Almen J.O, 1950). Keausan umumnya didefinisikan sebagai kehilangan material secara progresif akibat adanya gesekan (friksi) antar permukaan padatan atau pemindahan sejumlah material dari suatu permukaan sebagai suatu hasil pergerakan relatif antara permukaan tersebut dan permukaan lainnya (Yuwono, 2008). Keausan biasa terjadi pada setiap material yang mengalami gesekan dengan material lain. Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respons material terhadap sistem luar (kontak permukaan). Mekanisme keausan dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku mekanis dari bahan dan keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku kimia dari bahan (Zum Gahr, 1987) sedangkan menurut Koji Kato, tipe keausan terdiri dari tiga macam, yaitu *mechanical*, *chemical* dan *thermal wear* (Hokkirigawa and Kato K, 1989).

2.12.1 Keausan Karena Perilaku Mekanis (*Mechanical Wear*)

Digolongkan lagi menjadi *abrasive*, *adhesive*, *flow and fatigue wear*.

a. *Abrasive wear*.

Keausan ini terjadi jika partikel keras atau permukaan keras yang kasar menggerus dan memotong permukaan sehingga mengakibatkan hilangnya material yang ada dipermukaan tersebut (*earth moving equipment*) (Zum Gahr, 1987) (Hokkirigawa and Kato K, 1989). Contoh : Proses permesinan seperti *cutting*

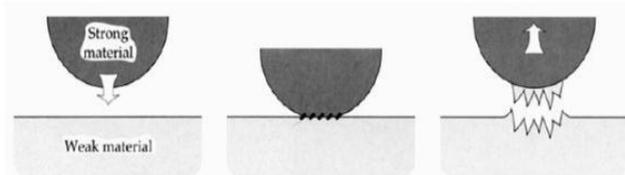


Gambar 2.22 Mekanisme *abravise wear* akibat proses *cutting* (Stachowiak, 2000)



b. *Adhesive wear*.

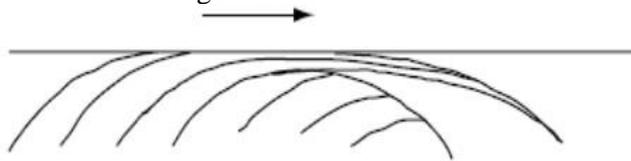
Keausan ini terjadi jika partikel permukaan yang lebih lunak menempel atau melekat pada lawan kontak yang lebih keras.



Gambar 2.23 Proses Perpindahan Logam karena *Adhesive Wear* (Stachowiak, 2000)

c. *Flow wear*.

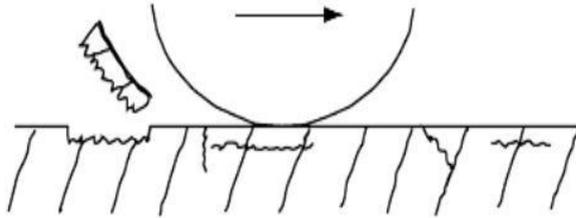
Keausan ini terjadi jika partikel permukaan yang lebih lunak mengalir seperti meleleh dan tergeser plastis akibat kontak dengan lain



Gambar 2.24 *Flow wear* oleh penumpukan aliran geseran plastis (Stachowiak, 2000)

d. *Fatigue wear*.

Fenomena keausan ini didominasi akibat kondisi beban yang berulang (*cyclic loading*). Ciri-ciri nya perambatan retak lelah biasanya tegak lurus pada permukaan tanpa deformasi plastis yang besar, seperti: *ball bearings*, *roller bearings* dan lain sebagainya



Gambar 2.25 *Fatigue wear* karena retak di bagian dalam dan merambat (Stachowiak, 2000)

2.12.2 Keausan Karena Perilaku Kimia (*Chemical*)

a. *Oxidative wear*

Pada peningkatan kecepatan sliding dan beban rendah, lapisan oksida tipis, tidak lengkap, dan rapuh terbentuk. Pada percepatan yang jauh lebih tinggi, lapisan oksida menjadi berkelanjutan dan lebih tebal, mencakup seluruh permukaan. Contoh: Permukaan lancar di dalam lingkungan yang oksidatif.

b. *Corrosive wear*

Mekanisme ini ditandai oleh batas butir yang korosif dan pembentukan lubang. Misalnya, permukaan *sliding* di dalam lingkungan yang korosif.

2.12.3 Keausan Karena Perilaku Panas (*Thermal Wear*)

a. *Melt wear*

Keausan yang terjadi karena panas yang muncul akibat gesekan benda sehingga permukaan aus meleleh.

b. *Diffusive wear*

Terjadi ketika ada pancaran (*diffusion*) elemen yang melintasi bidang kontak misalnya pada perkakas baja kecepatan tinggi. Dalam banyak situasi keausan, ada banyak mekanisme yang beroperasi secara serempak, akan tetapi biasanya akan ada satu mekanisme penentu tingkat keausan yang harus diteliti dalam hal ini berhubungan dengan masalah keausan. Hubungan antara koefisien



gesek dan laju keausan belum ada penjelasan yang tepat, karena hubungan keduanya akan selalu berubah terhadap waktu. (Blau, 2001)

2.13 Penelitian Sebelumnya

Dari penelitian "*Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions*" yang diteliti oleh Woei-Shyan Lee pada tahun 1999, meneliti tentang sifat mekanik dan struktur mikro dari baja AISI 4340 setelah diberi perlakuan *hardening* dan *tempering*.

Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah temperatur tempering dan waktu tahan tempering. Pada awalnya baja di *hardening* pada temperatur 850 °C selama 30 menit. Kemudian didinginkan dengan cepat pada media oli untuk membentuk struktur mikro martensit. Setelah itu dilakukan tempering dengan variasi temperatur 100, 200, 250, 300, 400, 500, dan 650 °C dan waktu tahan selama 2 dan 48 jam.

Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa sifat mekanik setelah *quenching* naik secara signifikan, hal ini sesuai ekspektasi bahwa baja sangat sensitif hanya dengan naiknya temperatur pada saat pemanasan. Kemudian setelah di *temper* maka di dapat bahwa sifat mekanik cenderung turun seiring naiknya temperatur dan waktu tahan pada saat tempering. Namun efek dari temperatur tempering lebih menunjukkan perbedaan yang signifikan daripada efek dari waktu tahan. Kekerasan cenderung menurun setelah di tempering, namun keuletan dan ketangguhan cenderung meningkat setelah di tempering. Untuk hasil struktur mikronya, ketika di tempering pada beberapa temperatur yang berbeda didapatkan bahwa adanya presipitasi karbida dalam berbagai bentuk dan ukuran pada matrix. Distribusi karbida secara langsung dipengaruhi oleh kondisi pada saat tempering.



Tabel 2.10 *Mechanical Properties* setelah 2 jam tempering

	Tempering temperatur							
	100	200	250	300	400	500	650	Quenching
σ_y (MPa)	1828	1627	1528	1436	1300	1110	814	2015
σ_γ (MPa)	1997	1792	1696	1587	1437	1294	977	2214
Hv	617	536	497	486	460	407	356	660
A	40	41	42	35	45	50	57,4	33,7
ϵ	8,4	8,6	9,8	8,8	10	14	18,1	4,5
n	0,53	0,5	0,48	0,42	0,38	0,32	0,21	057

Sumber: Lee, 1999

Tabel 2.11 *Mechanical Properties* setelah 48 jam tempering

	Tempering temperatur							
	100	200	250	300	400	500	650	Quenching
σ_y (MPa)	1178	1557	1450	1367	1237	1037	600	2015
σ_γ (MPa)	1940	1677	1564	1497	1366	1172	699	2214
Hv	597	512	470	457	430	379	660	660
A	44	48	50	44	50	52	33,7	33,7
ϵ	9,8	9,8	11	9,7	11,5	12,5	4,5	4,5
n	0,5	0,44	0,40	0,36	0,31	0,23	0,57	057

Sumber: Lee, 1999



Dari penelitian “*Effect of quenching medium on hardness of three grades of steel – AISI 1040, 1050 and 4340*” yang diteliti oleh Saigeeta Priyadarshini, dkk pada tahun 2016, meneliti tentang pengaruh kekerasan setelah dilakukan *quenching* dengan menggunakan beberapa media pendingin.

Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis material, waktu tahan pemanasan dan media pendingin. Pada awalnya baja AISI 1040, 1050, 4340 dipanaskan hingga temperatur 850 °C selama 30, 60, dan 90 menit. Kemudian didinginkan dengan cepat pada empat media pendingin yaitu air, brine, oli, dan udara. Setelah selesai maka material diuji kekerasannya untuk melihat kenaikan kekerasan setelah pendinginan cepat.

Hasil dari penelitian ini disimpulkan bahwa untuk semua baja, nilai kekerasan tertinggi didapat ketika melakukan *quenching* dengan media brine setelah 30 menit pemanasan pada 850 °C. Kemudian nilai kekerasan terendah didapat pada pendinginan udara (*normalizing*). Dan nilai kekerasan akan menurun bila pemanasan pada furnace dilakukan dengan cukup lama.

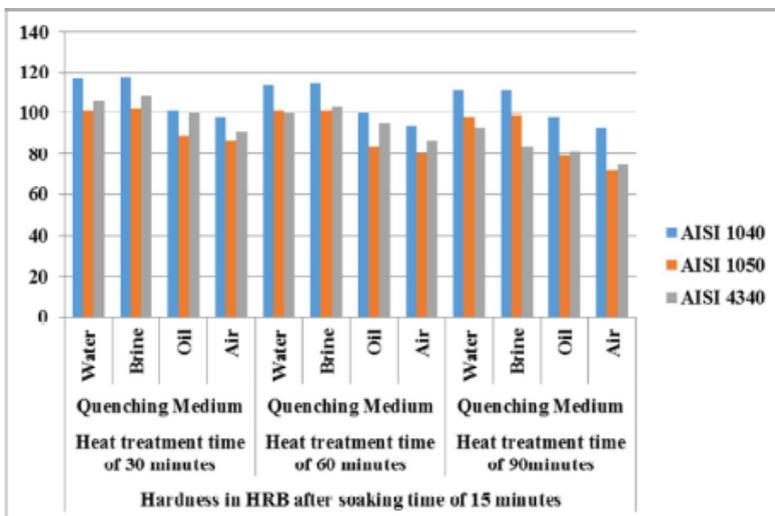
Table 2.12 Nilai kekerasan setelah pemanasan pada 850 °C dan didinginkan cepat pada beberapa media pendingin

Material	Initial Hardness (RHB)	Hardness after soaking for different time intervals (RHB)							
		30 min				60 min			
		Quenching medium				Quenching medium			
		Water	Brine	Oil	Air	Water	Brine	Oil	Air
AISI 1040	79	117	118	101	98	113	114	100	94
AISI 1050	83	101	102	89	87	101	101	84	80



AISI 4340	89	106	108	100	91	100	103	95	87
Material	Initial Hardness (RHB)	90 min							
		Quenching medium							
		Water	Brine	Oil	Air				
AISI 1040	79	111	111	98	93				
AISI 1050	83	98	99	79	72				
AISI 4340	89	93	84	81	75				

Sumber: Priyadarshini, 2016



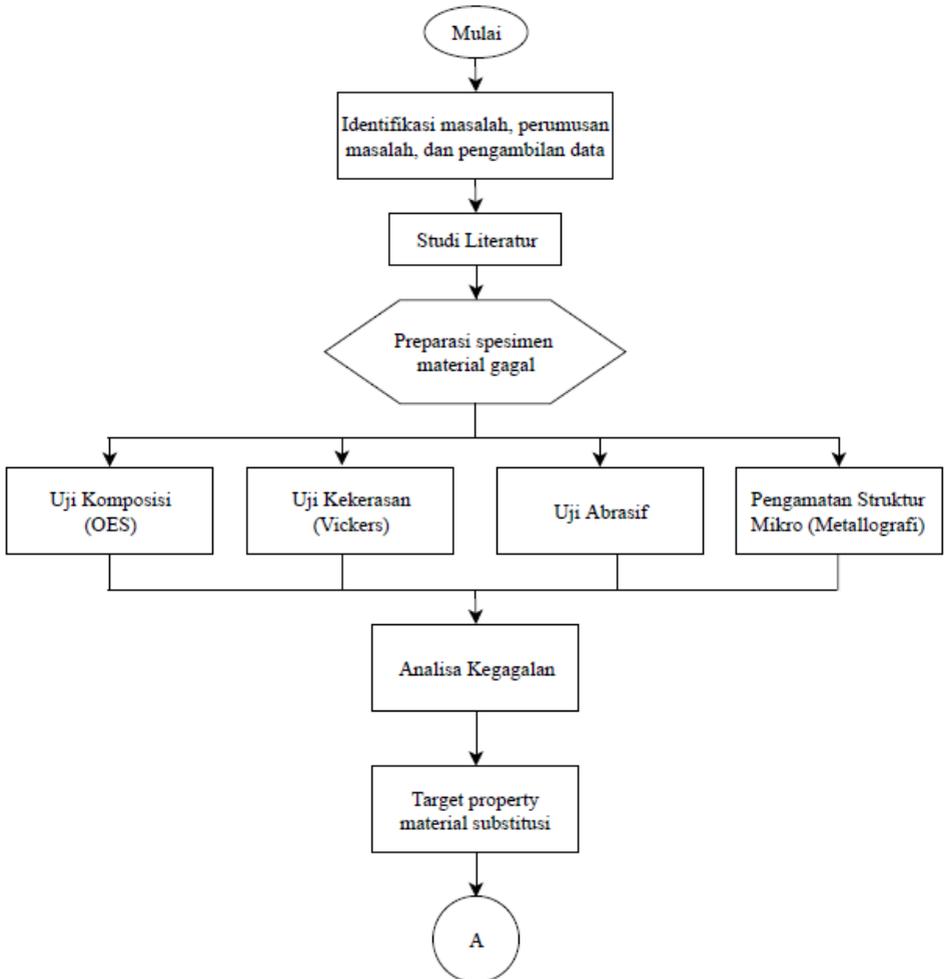
Gambar 2.26 Grafik distribusi kekerasan 3 jenis baja setelah proses quenching (Priyadarshini, 2016)

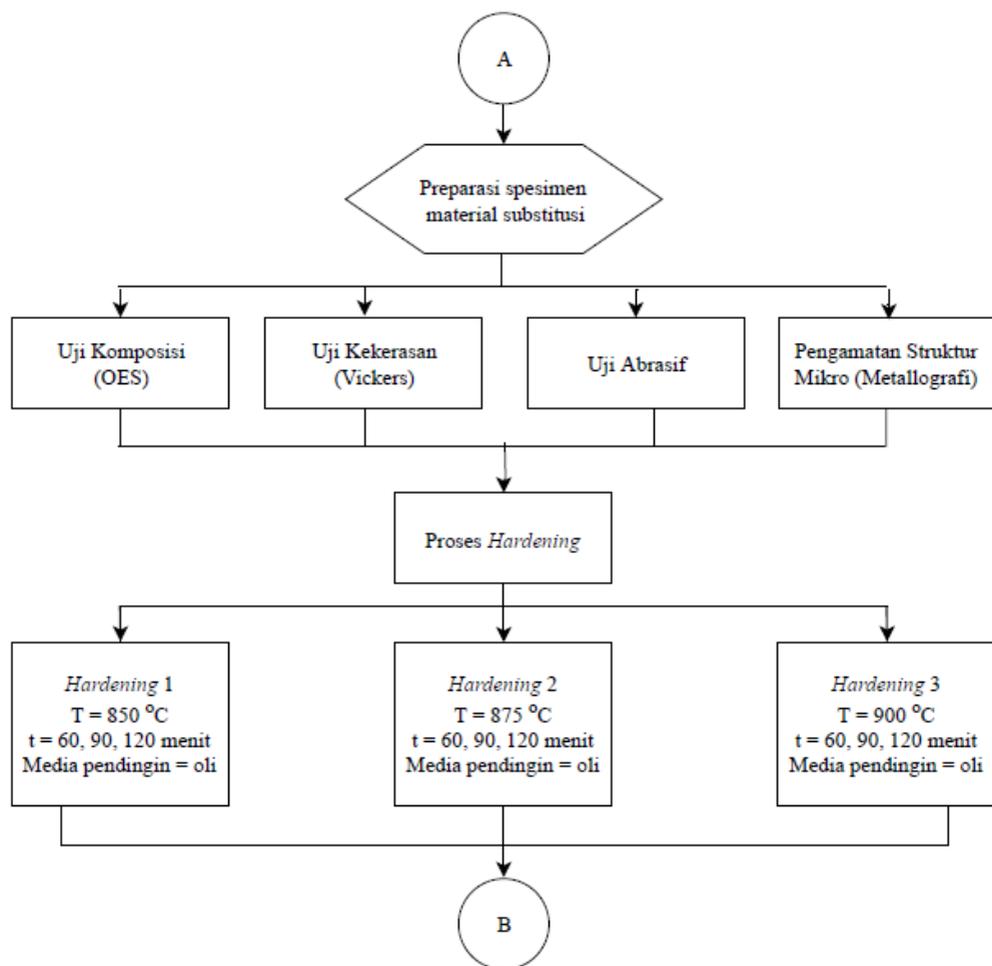


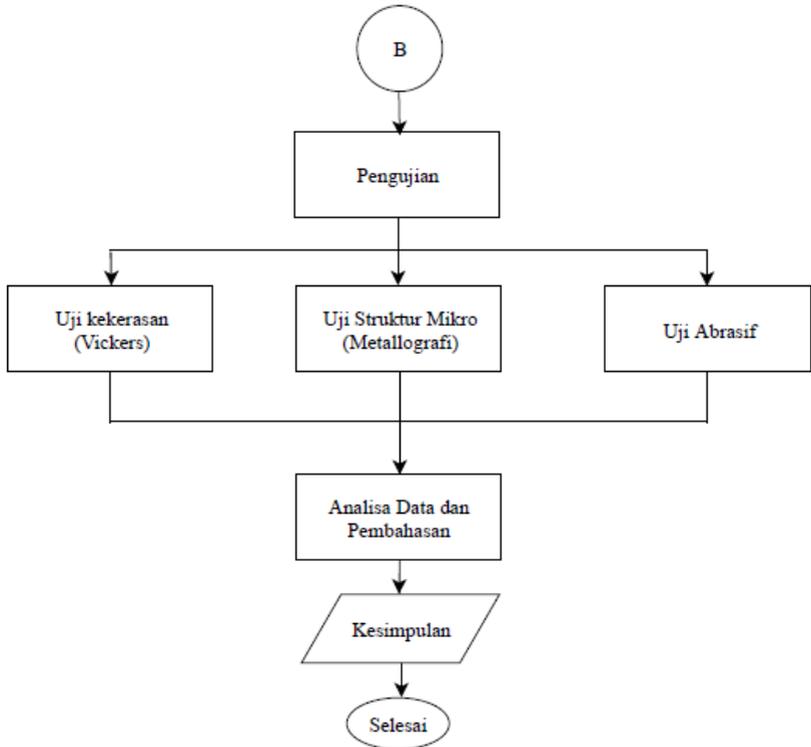
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir







Gambar 3.1 Diagram alir percobaan

3.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain adalah:

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 PT. PAL Indonesia (Persero) dan berdiskusi dengan dosen mata kuliah, dosen



pembimbing, dan PT. PAL Indonesia (Persero) yang ahli di bidangnya.

2. Studi Literatur

Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal - jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari tentang permasalahan analisa kegagalan khususnya keausan pada *axle shaft*.

3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam eksperimen ini yaitu: mengkaji *record* dari *axle shaft* yang ada pada PT. PAL Indonesia (Persero), pengamatan makro dengan menggunakan kamera, pengamatan mikro dengan mikroskopik optik, uji komposisi dengan menggunakan spektrometer, uji kekerasan dan uji keausan pada material *axle shaft*.

4. Penelitian

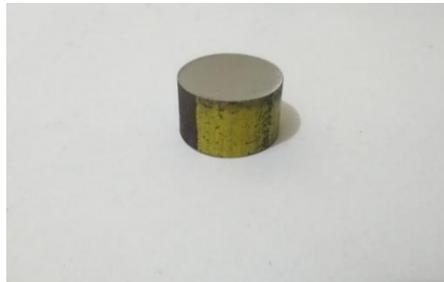
Metode ini dilakukan dengan meneliti perlakuan – perlakuan yang dapat diterapkan pada material sebagai solusi kegagalan. Metode ini meliputi eksperimen, studi literatur, dan pengujian material – material yang telah diberikan perlakuan.

3.3 Material yang Digunakan

Pada tanggal 3 Januari 2018 ditemukan *axle shaft* pada *luffing crane* PT. PAL Indonesia (Persero) mengalami keausan yang diperlihatkan pada gambar 3.2



Gambar 3.2 Material *Axle Shaft* yang mengalami keausan (AISI 1045)



Gambar 3.3 Spesimen material substitusi AISI 4340

Material standar yang digunakan oleh PT. PAL Indonesia (Persero) untuk aplikasi *luffing crane* merupakan material *axle shaft* yang memiliki komposisi kimia seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1

Table 3.1 Komposisi Kimia *Axle Shaft*

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
1045	0,43-0,50	-	0,60-0,90	0,040	0,050	-	-	-
4340	0,38-0,43	0,15-0,35	0,60-0,80	0,035	0,040	0,70-0,90	0,20-0,30	1,65-2,00



3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Penggaris
Digunakan untuk mengukur spesimen.
2. Gergaji Mesin
Digunakan untuk memotong spesimen
3. Kamera
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara makro.
4. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)
Digunakan untuk mengetahui komposisi material uji.
Mesin uji komposisi (OES) ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)

5. Mesin Uji Kekerasan
Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji
6. Amplas SiC *grade* 80 hingga 2000
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi
7. Mesin *Polishing*
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi
8. Larutan Etsa
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi. Larutan etsa yang digunakan adalah etsa nital dengan kandungan 1-5 mL HNO₃ + 100 mL ethanol (95%) atau



- methanol (95%).
9. Mikroskop Optik
Digunakan untuk mendapatkan informasi struktur mikro/fasa yang terdapat pada material uji
 10. Mesin Uji Ketahanan Aus
Digunakan untuk mendapatkan informasi laju keausan yang terdapat pada material uji

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen ini bertujuan untuk mendapatkan informasi dan data-data perusahaan yang berkaitan dengan *Axle Shaft* yang mampu mendukung hasil penelitian. Berikut data-data yang perlu diambil, yaitu:

1. Desain *Axle Shaft*
2. Data Operasi
3. Spesifikasi Material
4. *Maintenance Record*

3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap Persiapan ini diperlukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan/keausan *Axle Shaft* pada PT. PAL Indonesia (Persero). Persiapan ini berupa proses *cutting* material.

3.5.3 Pengamatan Makroskopik dan Mikroskopik

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro. Pengamatan makro dilakukan menggunakan kamera digital dan mikro dengan mikroskop optik. Adapun perlakuan terhadap sampel material sebagai berikut:

1. Melakukan pengambilan fotografi dengan kamera untuk mendapatkan informasi bentuk dari kegagalan secara makro.



2. Pengamatan melalui *optical microscope* terhadap sampel material dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan struktur mikronya.

3.5.4 Uji Komposisi

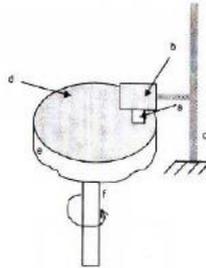
Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan. Identifikasi komposisi kimia material menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy (OES)* di Laboratorium PT. LOGAMINDO SARIMULIA Sidoarjo untuk mengetahui komposisi yang ada pada *Axle Shaft*.

3.5.5 Uji 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 indentor intan, pembebanan sebesar 100 kgf dan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Sebelumnya, sampel yang digunakan harus memiliki permukaan yang rata untuk menghindari cacat indentasi.

3.5.6 Uji Keausan

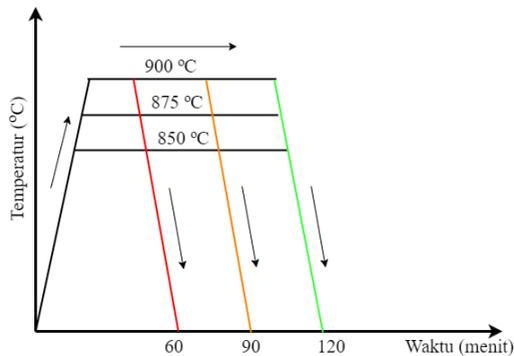
Pengujian keausan dilakukan untuk mengetahui tingkat ketahanan aus (*wearability*) dari spesimen uji. Pengujian ini dilakukan dengan metode *pin on disc*, dimana dalam pengujiannya spesimen uji yang diberi beban seberat 1 kg diletakkan pada piringan *disc* yang berputar. Pengujian ini mengacu pada ASTM G99 dengan metode *pin on disc*. Skema uji ketahanan aus dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skema uji ketahanan aus material (a) spesimen *pin*, (b) beban, (c) *holder*, (d) material abrasif, (e) *disc*, (f) penyangga. (Yuswono, 2014)

3.5.7 Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah proses *hardening* dengan tiga variasi temperatur yang berbeda yaitu 850 °C, 875 °C, 900 °C dan dengan tiga variasi waktu tahan masing-masing 60, 90, dan 120 menit. Setelah proses *hardening* setiap spesimen didinginkan dengan menggunakan media oli. Kurva perlakuan panas ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Kurva Perlakuan Panas



3.6 Rancangan Penelitian

Jenis perlakuan yang akan dilakukan selama penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.2

Table 3.2 Rancangan Penelitian

Material	Temperatur °C	Waktu Tahan (menit)	Uji Komposisi	Uji Metallografi	Uji Kekerasan	Uji Keausan
<i>Failure Axle Shaft</i>	-	-	√	√	√	√
HT850- t60	850	60	-	√	√	√
HT850- t90	850	90	-	√	√	√
HT850- t120	850	120	-	√	√	√
HT875- t60	875	60	-	√	√	√
HT875- t90	875	90	-	√	√	√
HT875- t120	875	120	-	√	√	√
HT900- t60	900	60	-	√	√	√
HT900- t90	900	90	-	√	√	√
HT900- t120	900	120	-	√	√	√



3.7 Timeline Penelitian

Rancangan waktu penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.3

Table 3.3 *Timeline Penelitian*

No	Kegiatan	Januari	Februari	Maret	April	Mei
1	Pengambilan data					
2	Preparasi spesimen					
3	Pengujian specimen (Uji komposisi, uji kekerasan, pengamatan makroskopik, pengamatan struktur mikro)					
4	Preparasi perlakuan panas					
5	Perlakuan panas					
6	Pengujian specimen (Pengamatan struktur mikro, struktur mikro, uji kekerasan, dan uji keausan)					



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 Analisis Kegagalan Axle Shaft

Pada inspeksi berkala yang telah dilakukan oleh PT. PAL Indonesia didapatkan bahwa pada salah satu unit *luffing crane* telah mengalami kegagalan pada sistem *gantry* yaitu pada bagian *axle shaft*. Pada material *axle shaft* telah terjadi keausan pada bagian yang bersinggungan dengan *gear*. Hal ini ditunjukkan dengan terdapat perubahan dimensi dari *axle shaft* yang cukup signifikan. Estimasi umur pakai material *axle shaft* yaitu 2 sampai 3 tahun. Namun realitanya setelah 3 bulan pemakaian komponen *axle shaft* telah mengalami keausan yang signifikan. Setelah dilakukan pengujian komposisi kimia diketahui bahwa material *axle shaft* yang mengalami keausan adalah material S45C atau AISI 1045. Sedangkan standar material yang digunakan oleh PT. PAL Indonesia untuk komponen *axle shaft* adalah ASSAB 705 atau AISI 4340 yang telah diberi perlakuan *hardening* dan *tempering* (ASM Handbook, 1990). Kekerasan materialnya pun hanya 169 HV yang sangat jauh dari standar. Selain itu dilakukan analisis tegangan yang terjadi pada komponen *axle shaft*. Setelah dilakukan perhitungan didapatkan bahwa *torsional stress* yang terjadi pada komponen *axle shaft* sebesar 2022,24 Mpa, sedangkan nilai *yield strength* dari material tersebut hanya sebesar 450 Mpa. Jika tegangan yang terjadi melebihi nilai *yield strength* dari material maka akan terjadi kegagalan. Ketidaksiesuaian jenis material dan tegangan yang berlebih menjadi faktor utama terjadinya kegagalan (keausan) pada material. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan upaya untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus dengan menggunakan material sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.

Jenis perlakuan yang diterapkan pada material *axle shaft* (AISI 4340) merupakan pemanasan dengan temperatur 850 °C, 875



°C, 900 °C dengan waktu tahan 60, 90, 120 menit dan didinginkan dengan media oli yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Kode spesimen dan jenis perlakuan AISI 4340

Kode Spesimen	Jenis Perlakuan
HT850-t60	AISI 4340 dengan pemanasan pada temperatur 850 °C dengan waktu tahan 60 menit, <i>oil quench</i>
HT850-t90	AISI 4340 dengan pemanasan pada temperatur 850 °C dengan waktu tahan 90 menit, <i>oil quench</i>
HT850-t120	AISI 4340 dengan pemanasan pada temperatur 850 °C dengan waktu tahan 120 menit, <i>oil quench</i>
HT875-t60	AISI 4340 dengan pemanasan pada temperatur 875 °C dengan waktu tahan 60 menit, <i>oil quench</i>
HT875-t90	AISI 4340 dengan pemanasan pada temperatur 875 °C dengan waktu tahan 90 menit, <i>oil quench</i>
HT875-t120	AISI 4340 dengan pemanasan pada temperatur 875 °C dengan waktu tahan 120 menit, <i>oil quench</i>
HT900-t60	AISI 4340 dengan pemanasan pada temperatur 900 °C dengan waktu tahan 60 menit, <i>oil quench</i>
HT900-t90	AISI 4340 dengan pemanasan pada temperatur 900 °C dengan waktu tahan 90 menit, <i>oil quench</i>
HT900-t120	AISI 4340 dengan pemanasan pada temperatur 900 °C dengan waktu tahan 120 menit, <i>oil quench</i>

4.1.2 Pengamatan Makro pada Material Axle Shaft

Berdasarkan hasil pengamatan visual secara makro pada *axle shaft* yang mengalami keausan, terlihat pada Gambar 4.1 terjadi keausan (*adhesive wear*) pada bagian permukaan *axle shaft*. Hal itu dikarenakan terjadi gesekan antara *axle shaft* dengan *gear*. Keausan ini terjadi jika partikel permukaan yang lebih lunak menempel atau melekat pada lawan kontak yang lebih keras. Proses itu terjadi secara berulang – ulang, hingga pada akhirnya material mengalami keausan. Hal ini dikarenakan interaksi permukaan, dimana permukaan yang mengalami beban berulang akan mengarah kepada pembentukan – pembentukan retakan – retakan mikro. Retakan – retakan mikro tersebut pada akhirnya menyatu dan menghasilkan pengelupasan pada material (Stachowiak, 2000). Berdasarkan pengamatan visual, masih belum terjadi crack pada material *axle shaft* tersebut.

Pada komponen *axle shaft* terdapat dua buah *gear* yang menempel. Namun hanya pada salah satu bagian saja yang menempel pada *gear* yang terjadi keausan. Hal ini disebabkan oleh tidak seimbangannya pembebanan yang diberikan sehingga bentuk keausannya pun terlihat sangat dalam dan tidak melingkar.



Gambar 4.1 Material *Axle Shaft* yang mengalami keausan (AISI 1045)

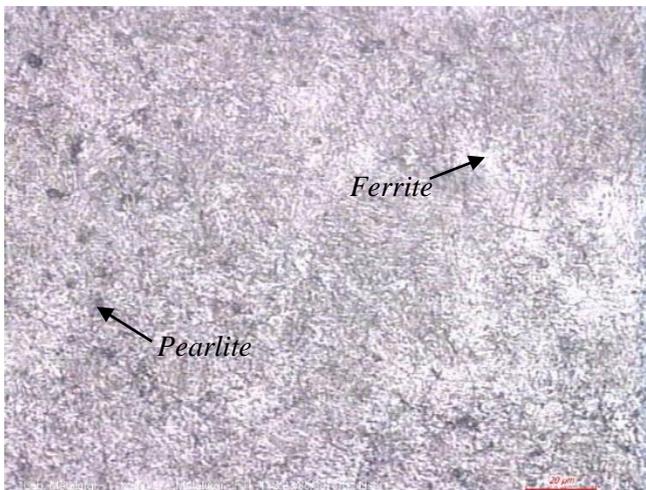


4.1.3 Hasil Uji Komposisi Kimia pada Material Axle Shaft yang Mengalami Kegagalan

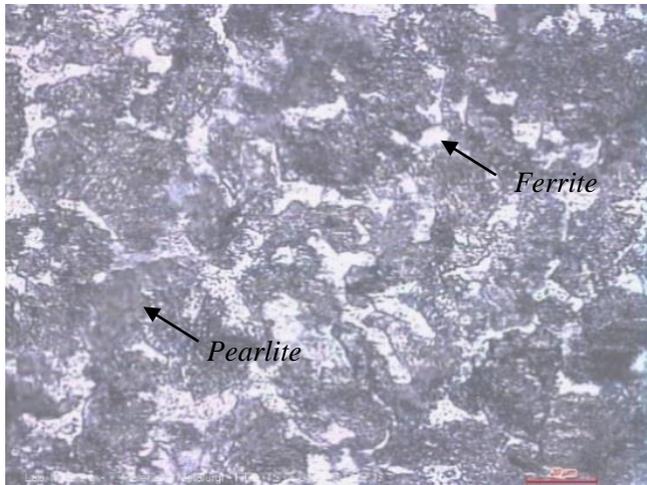
Pengujian komposisi kimia pada komponen axle shaft menggunakan alat OES (Optimical Emission Spectroscopy). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi kimia pada komponen axle shaft yang mengalami kegagalan. Hasil pengujian komposisi kimia ditunjukkan pada Tabel 3.1

4.1.4 Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Material AISI 4340

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur awal yang terbentuk pada material *axle shaft* yang mengalami kegagalan (AISI 1045) dan material *axle shaft* AISI 4340 sebelum dilakukan perlakuan panas. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 500x. Struktur mikro AISI 4340 pada Gambar 4.2 akan dibandingkan dengan struktur mikro AISI 1045 pada Gambar 4.3



Gambar 4.2 Struktur mikro material AISI 4340 sebelum perlakuan panas perbesaran 500x dengan etsa nital



Gambar 4.3 Struktur mikro material AISI 1045 yang mengalami kegagalan perbesaran 500x dengan etsa nital

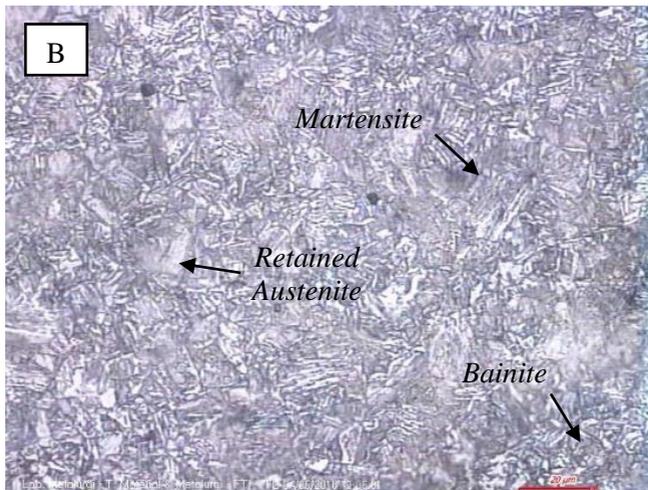
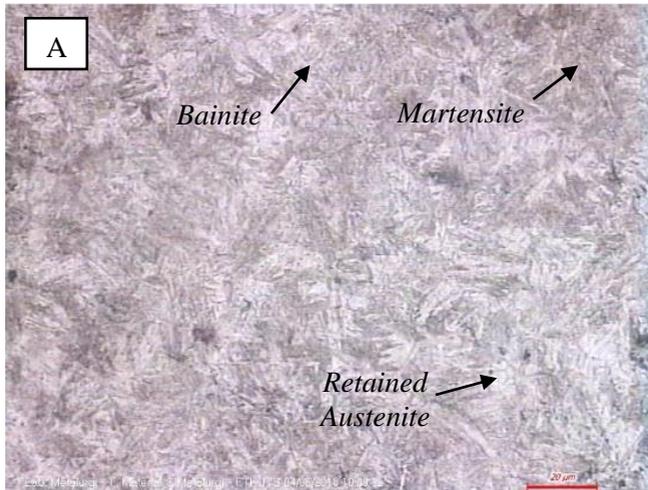
Gambar 4.2 menunjukkan struktur mikro dari material AISI 4340 yang belum diberikan perlakuan, berdasarkan pengamatan foto struktur mikro diatas dapat dilihat bahwa material AISI 4340 sebelum perlakuan panas tampak memiliki butir kecil dan halus, sehingga diasumsikan material telah mengalami perlakuan *hot working*. Material ini memiliki dua fasa yaitu *pearlite* dan *ferrite*. Dimana daerah berwarna gelap menunjukkan fasa *pearlite* dan daerah berwarna terang menunjukkan fasa *ferrite*.

Gambar 4.3 menunjukkan struktur mikro dari material AISI 1045 yang mengalami kegagalan. Pada struktur mikro ini tampak ukuran butir lebih besar dan terdapat daerah gelap yang merupakan fasa *pearlite* dan daerah terang yang merupakan fasa *ferrite*.

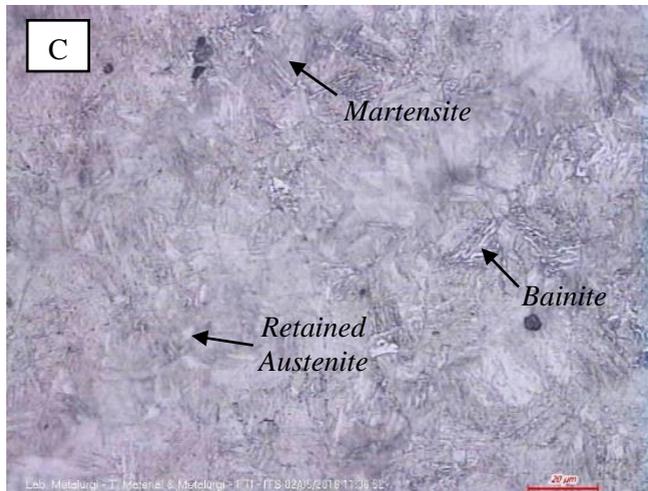
Pengujian struktur mikro dari material AISI 4340 dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk setelah material tersebut melalui proses hardening dengan variasi temperatur dan waktu tahan pemanasan. Dan selanjutnya



digunakan untuk membandingkan dan mengetahui perbedaan yang terjadi dari struktur mikro material AISI 4340 sebelum diberi perlakuan dan setelah mendapat perlakuan *hardening*. Gambar struktur mikro setelah diberi perlakuan panas disajikan pada Gambar 4.4, Gambar 4.5, dan Gambar 4.6.



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

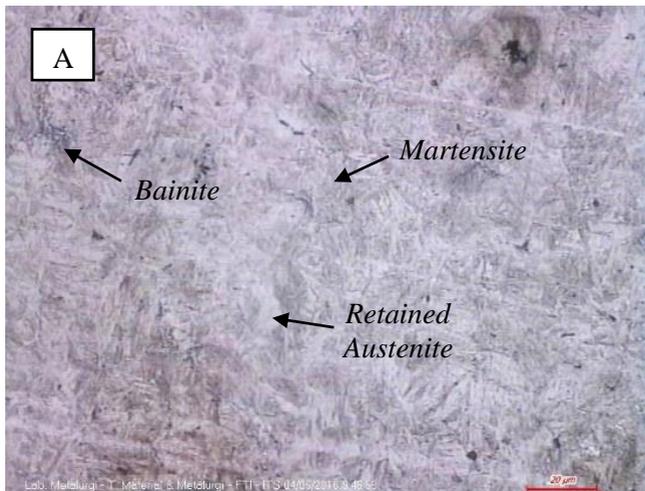


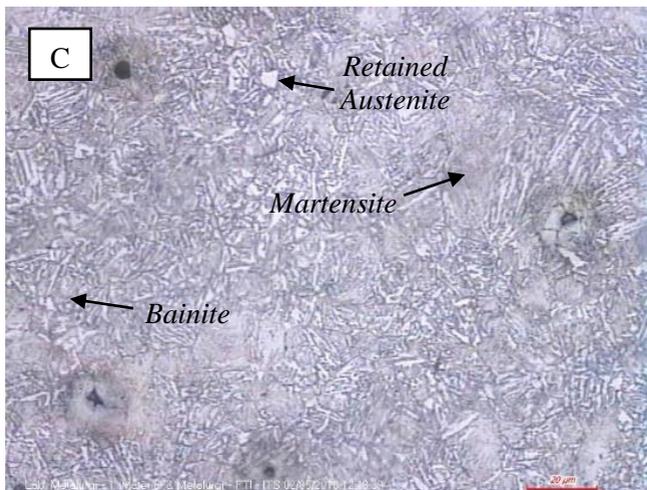
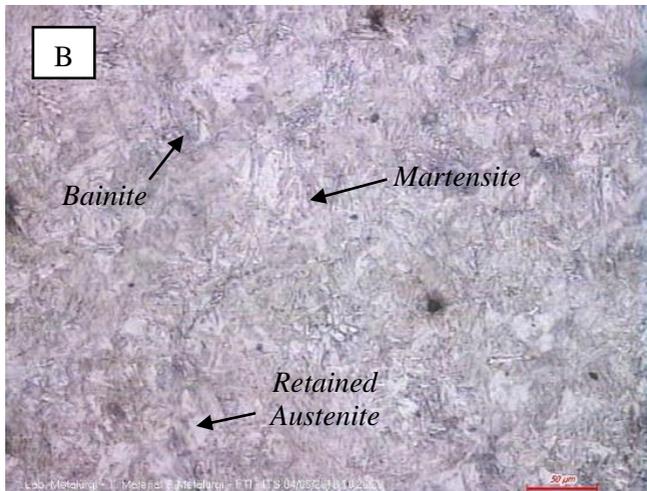
Gambar 4.4 Foto struktur mikro AISI 4340 perbesaran 500x dengan etsa nital: (a) HT850-t60, (b) HT850-t90, (c) HT850-t120

Gambar 4.4 menunjukkan struktur mikro hasil proses hardening pada temperatur 850 °C. Struktur mikro yang terbentuk adalah *plate martensit*, *bainite*, dan *retained austenite*. Gambar 4.4 (A) menunjukkan struktur mikro material HT850-t60. Material ini adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 850 °C selama 60 menit lalu didinginkan dengan media oli (*oil quench*). *Plate martensite* yang terbentuk cukup banyak dan tampak seperti jarum-jarum berbentuk bilah berwarna gelap dan terdapat juga struktur *bainite* yang tampak seperti jarum (*acicular*). Struktur *bainite* tersusun oleh bilah-bilah *ferrite* yang didalamnya terdapat platelet *cementite*. Kemudian *retained austenite* ditunjukkan dengan bagian yang berwarna putih dan tampak seperti butir. Jumlah *retained austenite* pada material ini sedikit. Pada Gambar 4.4 (B) menunjukkan struktur mikro material HT850-t90. Material ini adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 850 °C selama 90 menit lalu didinginkan dengan media oli (*oil quench*). *Plate martensite* yang terbentuk cukup banyak dan



tampak seperti jarum-jarum berbentuk bilah berwarna gelap dan terdapat juga struktur *bainite* yang tampak seperti jarum (*acicular*). Kemudian *retained austenite* ditunjukkan dengan bagian yang berwarna putih dan tampak seperti butir. Jumlah *retained austenite* pada material ini sedikit. Pada Gambar 4.4 (C) menunjukkan struktur mikro material HT850-t120. Material ini adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 850 °C selama 120 menit lalu didinginkan dengan media oli (*oil quench*). *Plate martensite* yang terbentuk lebih sedikit dan tampak seperti jarum-jarum berbentuk bilah berwarna gelap dan terdapat juga struktur *bainite* yang tampak seperti jarum (*acicular*). Kemudian *retained austenite* ditunjukkan dengan bagian yang berwarna putih dan tampak seperti butir. Jumlah *retained austenite* pada material ini lebih banyak dibanding kedua material lainnya.



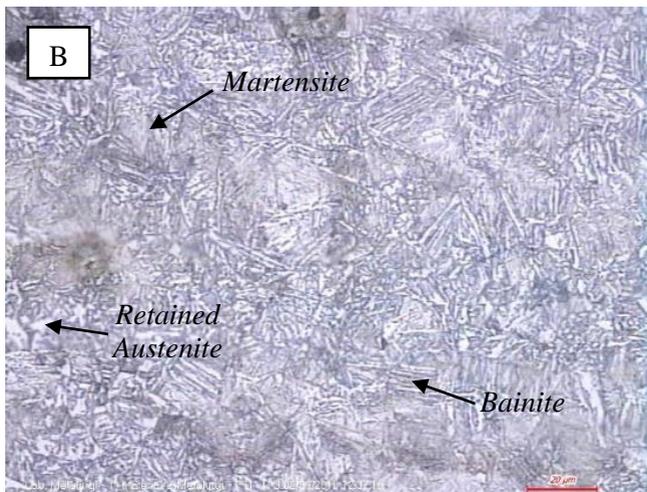
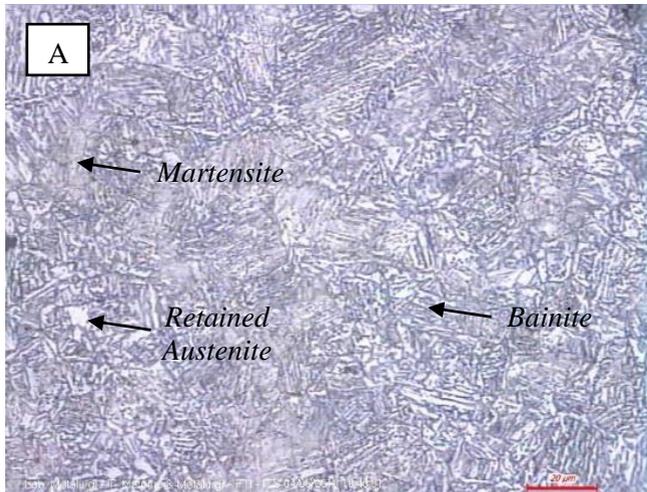


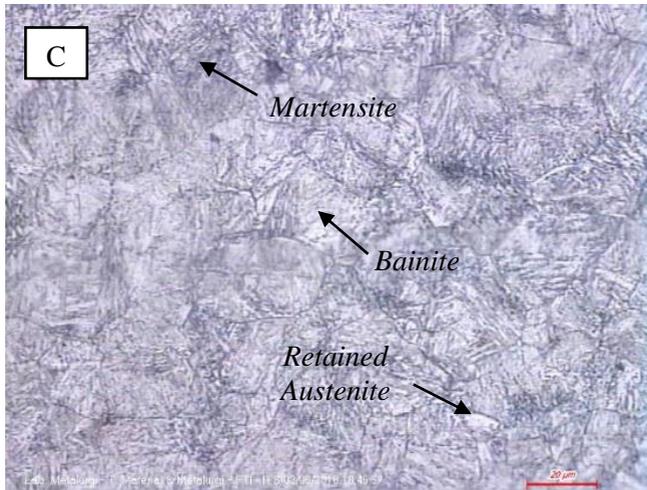
Gambar 4.5 Foto struktur mikro AISI 4340 perbesaran 500x dengan etsa nital: (a) HT875-t60, (b) HT875-t90, (c) HT875-t120

Gambar 4.5 menunjukkan struktur mikro hasil proses hardening pada temperatur 875 °C. Struktur mikro yang terbentuk



adalah *plate martensit*, *bainite*, dan *retained austenite*. Gambar 4.5 (a) menunjukkan struktur mikro material HT875-t60. Material ini adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 875 °C selama 60 menit lalu didinginkan dengan media oli (*oil quench*). *Plate martensite* yang terbentuk sangat banyak, berukuran lebih besar dan tampak seperti jarum-jarum berbentuk bilah berwarna gelap dan terdapat juga struktur *bainite* yang tampak seperti jarum (*acicular*). Struktur *bainite* tersusun oleh bilah-bilah *ferrite* yang didalamnya terdapat platelet *cementite*. Kemudian *retained austenite* ditunjukkan dengan bagian yang berwarna putih dan tampak seperti butir. Jumlah *retained austenite* pada material ini sangat sedikit. Pada Gambar 4.5 (b) menunjukkan struktur mikro material HT875-t90. Material ini adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 875 °C selama 90 menit lalu didinginkan dengan media oli (*oil quench*). *Plate martensite* yang terbentuk cukup banyak, berukuran lebih besar dan tampak seperti jarum-jarum berbentuk bilah berwarna gelap dan terdapat juga struktur *bainite* yang tampak seperti jarum (*acicular*). Kemudian *retained austenite* ditunjukkan dengan bagian yang berwarna putih dan tampak seperti butir. Jumlah *retained austenite* pada material ini cukup banyak. Pada Gambar 4.5 (c) menunjukkan struktur mikro material HT875-t120. Material ini adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 875 °C selama 120 menit lalu didinginkan dengan media oli (*oil quench*). *Plate martensite* yang terbentuk lebih sedikit, berukuran lebih besar dan tampak seperti jarum-jarum berbentuk bilah berwarna gelap dan terdapat juga struktur *bainite* yang tampak seperti jarum (*acicular*). Kemudian *retained austenite* ditunjukkan dengan bagian yang berwarna putih dan tampak seperti butir. Jumlah *retained austenite* pada material ini sangat banyak.





Gambar 4.6 Foto struktur mikro AISI 4340 perbesaran 500x dengan etsa nital: (a) HT900-t60, (b) HT900-t90, (c) HT900-t120

Gambar 4.6 menunjukkan struktur mikro hasil proses hardening pada temperatur 900 °C. Struktur mikro yang terbentuk adalah *plate martensit*, *bainite*, dan *retained austenite*. Gambar 4.6 (a) menunjukkan struktur mikro material HT900-t60. Material ini adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 900 °C selama 60 menit lalu didinginkan dengan media oli (*oil quench*). *Plate martensite* yang terbentuk sedikit, berukuran lebih besar, dan tampak seperti jarum-jarum berbentuk bilah berwarna gelap dan terdapat juga struktur *bainite* yang tampak seperti jarum (*acicular*). Struktur *bainite* tersusun oleh bilah-bilah *ferrite* yang didalamnya terdapat platelet *cementite*. Kemudian *retained austenite* ditunjukkan dengan bagian yang berwarna putih dan tampak seperti butir. Jumlah *retained austenite* pada material ini banyak. Pada Gambar 4.6 (b) menunjukkan struktur mikro material HT900-t90. Material ini adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 900 °C selama 90 menit lalu didinginkan dengan media oli (*oil quench*). *Plate martensite* yang terbentuk agak banyak,



berukuran lebih besar, dan tampak seperti jarum-jarum berbentuk bilah berwarna gelap dan terdapat juga struktur *bainite* yang tampak seperti jarum (*acicular*). Kemudian *retained austenite* ditunjukkan dengan bagian yang berwarna putih dan tampak seperti butir. Jumlah *retained austenite* pada material ini lebih sedikit. Pada Gambar 4.6 (c) menunjukkan struktur mikro material HT900-t120. Material ini adalah material yang mengalami pemanasan pada temperatur 900 °C selama 120 menit lalu didinginkan dengan media oli (*oil quench*). *Plate martensite* yang terbentuk sangat sedikit, berukuran lebih besar, dan tampak seperti jarum-jarum berbentuk bilah berwarna gelap dan terdapat juga struktur *bainite* yang tampak seperti jarum (*acicular*). Kemudian *retained austenite* ditunjukkan dengan bagian yang berwarna putih dan tampak seperti butir. Jumlah *retained austenite* pada material ini sangat banyak.

4.1.5 Hasil Pengujian Kekerasan pada Material AISI 4340

Pengujian kekerasan digunakan untuk mendapatkan nilai kekerasan dari material AISI 4340 yang merupakan standar material untuk komponen *axle shaft* yang digunakan oleh PT.PAL Indonesia. Pengujian kekerasan ini menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A*, dengan metode pengujian *Vickers*. Beban yang digunakan sebesar 100 kgf dengan waktu indentasi 10 detik. Pengujian ini berdasarkan ASTM E92 tentang pengujian kekerasan *Vickers*. Pengujian dilakukan di 5 titik pada setiap variasi temperatur dan waktu tahan.

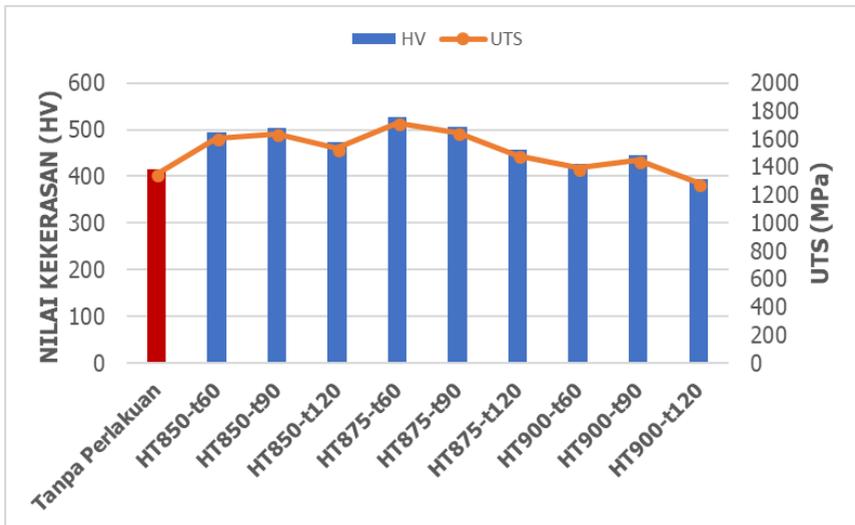
Hasil pengujian kekerasan material AISI 4340 sebelum perlakuan dan setelah perlakuan dapat dilihat pada Tabel 4.2 serta grafik distribusi kekerasan dan *Ultimate Tensile Strength (UTS)* ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Tabel 4.2 Hasil pengujian kekerasan spesimen uji

Material	Temperatur (°C)	Waktu Tahan (menit)	Kekerasan (HV)	Kekerasan (HB)	UTS (MPa)
Tanpa Perlakuan	-	-	415	392	1352,4
HT850-t60	850	60	494	466	1607,7
HT850-t90	850	90	504	475	1638,75
HT850-t120	850	120	472	445	1535,25
HT875-t60	875	60	528	497	1714,65
HT875-t90	875	90	506	477	1645,65
HT875-t120	875	120	456	430	1483,5
HT900-t60	900	60	428	404	1393,8
HT900-t90	900	90	445	420	1449
HT900-t120	900	120	393	372	1283,4

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.7 Grafik distribusi kekerasan spesimen uji

Dari Tabel 4.3 didapatkan hasil uji kekerasan pada permukaan setiap sampel uji sebelum dan setelah di *heat treatment*. Pada spesimen uji AISI 4340 tanpa perlakuan nilai kekerasan sebesar 415 HV. Setelah diberikan perlakuan *hardening* pada tiga temperatur dan 3 waktu tahan berbeda didapat bahwa spesimen yang memiliki kekerasan paling tinggi adalah spesimen HT875-t60 yaitu spesimen yang dipanaskan pada temperatur 875 °C dengan waktu tahan 60 menit. Sedangkan spesimen yang memiliki kekerasan paling rendah adalah spesimen HT900-t120 yaitu spesimen yang dipanaskan pada temperatur 900 °C dengan waktu tahan 120 menit. Berdasarkan Gambar 4.7 nilai kekerasan cenderung berubah bergantung pada temperatur dan waktu tahan.

4.1.6 Hasil Pengujian Keausan pada Material AISI 4340

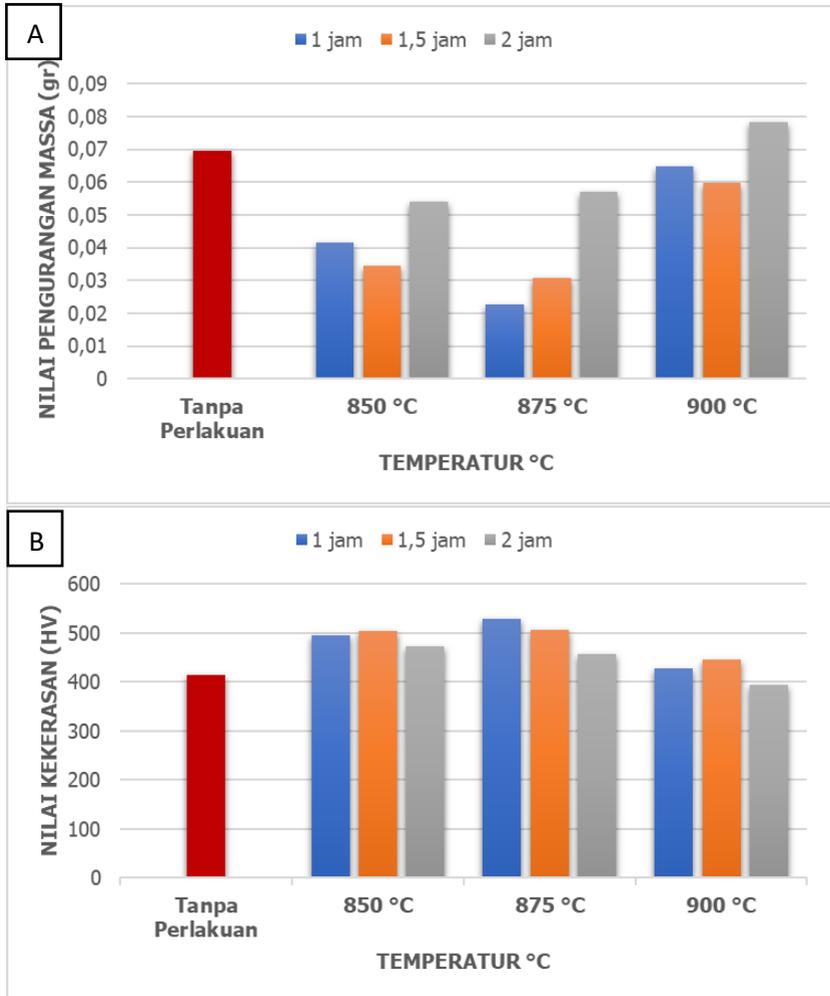
Pengujian ketahanan aus dilakukan pada permukaan spesimen material AISI 4340 tanpa perlakuan dan setelah perlakuan *heat treatment*. Pengujian keausan menggunakan



metode *pin on disc* dimana spesimen uji diberikan beban 1 kg, kemudian diletakkan pada *disc* piringan berputar yang beralaskan kertas *abrasive grade* 240. Pengujian dilakukan selama 3,5 menit (ASTM G99, 2000). Data yang diperoleh dari pengujian keausan ini berupa selisih pengurangan massa spesimen. Data hasil pengujian ketahanan aus disajikan pada Tabel 4.3 dan grafik distribusi keausan ditunjukkan pada Gambar 4.8.

Tabel 4.3 Hasil pengujian keausan spesimen uji

Material	Temperatur (°C)	Waktu Tahan (menit)	Nilai Selisih Pengurangan Massa (gr)	Kekerasan (HV)
Tanpa Perlakuan	-	-	0,0697	415
HT850-t60	850	60	0,0417	494
HT850-t90	850	90	0,0346	504
HT850-t120	850	120	0,0539	472
HT875-t60	875	60	0,0227	528
HT875-t90	875	90	0,0308	506
HT875-t120	875	120	0,0570	456
HT900-t60	900	60	0,0649	428
HT900-t90	900	90	0,0598	445
HT900-t120	900	120	0,0782	393



Gambar 4.8 (a) Grafik distribusi pengurangan massa dibandingkan dengan (b) Grafik distribusi kekerasan

Dari Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pada spesimen yang telah diberikan perlakuan, spesimen uji pada pemanasan temperatur 875 °C dengan waktu tahan 60 menit memiliki nilai



pengurangan massa paling rendah, sedangkan spesimen uji pada pemanasan 900 °C dengan waktu tahan 120 menit memiliki nilai pengurangan massa paling tinggi.

4.2 Pembahasan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, faktor penyebab kegagalan suatu material dapat dibagi menjadi beberapa hal, salah satunya adalah penggunaan material yang tidak sesuai dengan komposisi dan nilai kekerasan material lebih rendah daripada standar yang telah ditetapkan. Pada sub bab 4.1.1 telah dibahas mengenai analisis kegagalan *axle shaft*. Maka menurut standar yang tertera pada ASSAB, material yang dipakai untuk dijadikan komponen *axle shaft* memiliki kekerasan minimal sebesar 293-352 HB atau sama dengan 291-361 HV. Namun nilai kekerasan tersebut belum cukup keras bila dibandingkan dengan nilai kekerasan *gear* yang mencapai 40-60 HRC atau sama dengan 392-698 HV. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan peningkatan kekerasan menggunakan material standar AISI 4340 agar dapat meningkatkan *lifetime* dari komponen *axle shaft* dengan cara *heat treatment* dengan variasi temperatur dan waktu tahan pemanasan.

Pada pengamatan hasil struktur mikro diketahui bahwa struktur awal yang terbentuk pada material AISI 4340 terdiri dari fasa *ferrite* yang ditunjukkan dengan daerah putih dan fasa *pearlite* yang ditunjukkan dengan daerah gelap (Avner, 1987). Struktur ini memiliki butir berukuran kecil dan sangat halus sehingga menjadikan kekerasannya agak tinggi. Sedangkan menurut Navarro struktur awal AISI 4340 terdiri dari fasa *ferrite* dan *pearlite* dengan butir yang tidak terlalu kecil. Diasumsikan material AISI 4340 telah melalui proses *hot working* sebelumnya. Unsur paduan yang terdapat pada baja pun mempengaruhi ukuran butir pada material tersebut. Fasa pada struktur awal sudah sesuai dengan struktur pada baja *hypoeutectoid* dimana pada AISI 4340



memiliki kadar karbon 0,4%C. Namun kehadiran kedua fasa ini belum menjadikan material tersebut cukup keras untuk digunakan sebagai komponen *axle shaft*. Untuk menjadikan material AISI 4340 cukup keras maka harus terdapat struktur *martensite*.

Setelah mengetahui fasa yang terbentuk pada struktur awal maka material AISI 4340 diberi perlakuan panas dengan tujuan mendapatkan kekerasan yang sesuai dengan standar yang digunakan untuk komponen *axle shaft*. Perlakuan panas yang diberikan berupa *hardening* dengan tujuan untuk mendapatkan struktur *martensite* yang keras dan memiliki ketahanan aus yang baik (Prarono, 2011). Perlakuan panas dilakukan dengan menggunakan 2 variasi berbeda yaitu temperatur dan waktu tahan pemanasan. Material AISI 4340 dipanaskan pada temperatur 850 °C, 875 °C, dan 900 °C dengan waktu tahan 60 menit, 90 menit, dan 120 menit kemudian di *quench* pada media oli agar mendapat struktur *martensite* karena pendinginan cepat. Penggunaan oli sebagai media pendingin sangat cocok digunakan pada baja paduan rendah seperti AISI 4340 yang memiliki *hardenability* yang tinggi. Selain itu pendinginan menggunakan oli lebih lambat daripada dengan air sehingga tidak menimbulkan distorsi atau retak yang dikarenakan oleh tegangan akibat transformasi dan selisih thermal. Pada umumnya minyak mempunyai kapasitas pendinginan tertinggi pada temperatur 600 °C dan agak rendah pada daerah temperatur pembentukan *martensite* (Thelning, 1984).

Analisa struktur mikro kembali dilakukan pada material AISI 4340 setelah diberi perlakuan panas. Hasil struktur mikro setelah dilakukan proses *hardening* dengan variasi temperatur dan waktu tahan pemanasan serta dilanjutkan *quenching* pada media oli adalah *plate martensite*, *bainite*, dan *retained austenite*. Fasa *martensite* terbentuk dari hasil transformasi fasa *austenite* yang didinginkan cepat dan dapat mencapai temperatur M_s . Pada temperatur yang sangat rendah *austenite* mengalami *driving force* yang sangat besar untuk berubah dari FCC menjadi BCC, yang



menimbulkan *shear force* terhadap atom-atom. Pada pendinginan normal seharusnya karbon yang terdapat pada *austenite* dapat berdifusi keluar, namun dikarenakan pendinginan yang sangat cepat maka karbon yang tadinya larut dalam *austenite* sudah tidak sempat berdifusi keluar karena temperatur sudah terlalu rendah untuk dapat berdifusi. Maka dari itu struktur BCC tidak tercapai dan mengakibatkan salah satu rusuk sel satuannya lebih Panjang daripada yang lain sehingga struktur ini disebut BCT (*Body Centered Tetragonal*). BCT merupakan struktur yang memiliki *internal stress* yang tinggi sehingga menjadikan *martensite* menjadi sangat keras dan getas. Pada pengamatan struktur mikro pada perbesaran 500x maka *martensite* tampak seperti jarum-jarum atau bilah yang berwarna gelap (Suherman, 2003).

Banyaknya *austenite* yang bertransformasi menjadi *martensite* tidak tergantung pada waktu, tetapi pada temperatur dimana semakin rendah temperaturnya makin banyak martensit yang terbentuk pada M_f (Suherman, 2003). Sehingga ketika proses pendinginan terganggu diantara temperatur M_s dan M_f , *retained austenite* dapat terbentuk dikarenakan transformasi dari *austenite* menjadi *martensite* belum selesai sepenuhnya (Charre, 2003). Pada proses pendinginan *austenite*, pada saat mulai terbentuk *martensite* maka laju pembentukan *martensite* ini mula-mula lambat, lalu cepat dan menjadi sangat lambat lagi bila *austenite* hampir habis, sehingga dapat dikatakan *austenite* tidak akan habis, selalu ada *austenite* sisa (*retained austenite*) yang tidak berubah menjadi *martensite*. Perlu diketahui baja AISI 4340 merupakan baja paduan rendah, dimana paduan dalam *austenite* akan menurunkan temperatur M_s dan M_f . Ketika temperatur M_f terlalu rendah maka pada saat pendinginan cepat kemungkinan terbentuknya *retained austenite* sangat banyak. Adanya *retained austenite* yang bersifat lunak menyebabkan kekerasan yang terbentuk tidak maksimum (Thelning, 1984).



Selain terbentuk *martensite* dan *retained austenite*, terdapat fasa lain yaitu *bainite*. Pada temperatur di bawah hidung ($550\text{ }^{\circ}\text{C}$) *austenite* sudah berada jauh di bawah temperatur stabilnya dan akan mengalami *driving force* yang besar untuk berubah dari FCC menjadi BCC. Karena *driving force* itu atom-atomnya akan tergeser sehingga menjadi BCC, terbentuk *ferrite*. Karena tadinya disitu terdapat banyak karbon sedang *ferrite* tidak mampu melarutkan karbon maka karbon akan berdifusi keluar dari *ferrite* sebagai karbida. Sementara itu *austenite* disekitar *ferrite* tadi juga menjadi *ferrite* dan karbonnya berdifusi keluar, sehingga akhirnya akan diperoleh suatu struktur berupa bilah-bilah *ferrite* yang didalamnya terdapat platelet sementit, struktur ini dinamakan *bainite* (Suherman, 2003).

Berdasarkan diagram CCT pada Gambar 2.14 maka hasil pendinginan cepat baja AISI 4340 dengan menggunakan media oli sudah sesuai dengan struktur akhir yang akan terbentuk yaitu *martensite*, *bainite*, dan *retained austenite*. Hasil struktur mikro yang didapat linier dengan kekerasan pada tiap materialnya. Semakin tinggi kekerasan suatu material maka semakin banyak *martensite* yang terbentuk, sedangkan semakin rendah kekerasan suatu material maka semakin banyak *retained austenite* yang terbentuk. Bila Gambar 4.4, Gambar 4.5, dan Gambar 4.6 dibandingkan maka dapat dilihat bahwa bentuk struktur *martensite* memiliki perubahan seiring bertambahnya temperatur pemanasan. Pada awalnya struktur *martensite* berbentuk jarum-jarum yang halus, namun dengan meningkatnya temperatur maka jarum-jarum *martensite* menjadi cukup besar, menunjukkan bahwa telah terjadi pertumbuhan butir yang cukup banyak.

Hasil mikrostruktur yang didapatkan mendukung nilai kekerasan yang didapatkan dari spesimen setelah diberi perlakuan panas. Kekerasan yang terjadi setelah *quenching* banyak bergantung pada besarnya kadar karbon dan unsur paduan dalam *austenite*, besar butir *austenite* dan laju pendinginan dari *austenite*



(Thelning, 1984). Kekerasan tertinggi diperoleh pada material HT875-t60 dengan nilai 528 HV. Material ini dipanaskan pada temperatur 875 °C dengan waktu tahan pemanasan 60 menit kemudian di *quench* pada media oli. Banyaknya fasa *martensite* dan sedikitnya *retained austenite* menyebabkan material ini memiliki kekerasan yang paling tinggi. Sedangkan kekerasan terendah diperoleh pada material HT900-t120 dengan nilai 393 HV. Material ini dipanaskan pada temperatur 900 °C dengan waktu tahan pemanasan 120 menit kemudian di *quench* pada media oli. Banyaknya *retained austenite* dan sedikitnya fasa *martensite* menyebabkan material ini memiliki kekerasan yang paling rendah. Berdasarkan Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa *trend* kekerasan pada temperatur 850 °C dan 900 °C akan meningkat pada waktu tahan pemanasan 90 menit dan akan menurun pada waktu tahan pemanasan 120 menit kecuali pada temperatur 875 °C dimana kekerasan terus menurun pada waktu tahan pemanasan 90 menit sampai 120 menit. Sedangkan berdasarkan temperaturnya akan diraih kekerasan maksimum pada temperatur 875 °C dan kekerasan minimum pada temperatur 900 °C.

Pada temperatur austenisasi yang tepat kekerasan maksimum dapat tercapai dan butir kristal cukup halus, tidak getas. Pengambilan temperatur austenisasi yang terlalu tinggi pada baja *hypoeutectoid* akan mengakibatkan tidak tercapainya kekerasan maksimum karena dapat memicu pertumbuhan butir yang hebat, sehingga menimbulkan banyak *austenite* sisa, butir yang besar menyebabkan material semakin getas. Sedangkan pada temperatur austenisasi yang terlalu rendah kekerasan maksimum masih belum dapat tercapai dikarenakan masih adanya struktur lain yang bersifat lunak, misalnya *ferrite* yang belum bertransformasi menjadi *austenite*. Sehingga ketika dilakukan *quenching* struktur yang diperoleh tidak seluruhnya *martensite*. Kalaupun struktur lain itu sudah cukup keras, misalnya karbida mungkin kekerasan maksimum belum dapat tercapai. Bila masih terdapat karbida maka

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



belum seluruh karbon larut dalam *austenite*, padahal kekerasan *martensite* sangat bergantung pada kadar karbon dalam *austenite*. Meskipun sudah mendapat temperatur pemanasan yang tepat untuk suatu proses pengerasan, masih akan saling tergantung juga pada beberapa faktor lain, antara lain waktu tahan pemanasan. Pada saat tercapainya temperatur austenisasi memang struktur sudah (hampir) seluruhnya *austenite*. Tetapi pada saat itu *austenite* masih berbutir halus dan kadar karbon dan unsur paduannya masih rendah/belum homogen, dan biasanya ada sisa-sisa karbida yang belum larut (ini terjadi karena pemanasan yang tidak ekuilibrium). Untuk itu baja perlu ditahan pada temperatur austenisasi ini beberapa saat untuk memberi kesempatan larutnya karbida dan lebih homogenya *austenite*. Bila waktu tahan pemanasan yang diberikan kurang lama maka homogenitas *austenite* tidak akan tercapai sehingga kekerasan maksimum pun tidak tercapai. Namun bila waktu tahan pemanasan yang diberikan terlalu lama maka akan memicu pertumbuhan butir yang hebat sehingga akan didapatkan struktur akhir dengan butir yang besar. Hal ini menyebabkan struktur jarum pada *martensite* akan menjadi lebih besar dan akan menimbulkan banyak *austenite* sisa (*retained austenite*). Pada akhirnya kekerasan maksimum tidak dapat tercapai (Thelning, 1984). Nilai kekerasan yang didapat sudah memenuhi standar dari material dan sudah cukup keras untuk menyaingi kekerasan *gear*.

Hasil pengujian ketahanan aus linier dengan hasil pengujian kekerasan yang mana menunjukkan bahwa peningkatan kekerasan meningkatkan sifat ketahanan aus dari material tersebut. Spesimen HT875-t60 dengan kekerasan 528 HV memiliki pengurangan massa terendah yaitu sebesar 0,0346 gr, sedangkan spesimen HT900-t120 dengan kekerasan 393 HV memiliki pengurangan massa terbesar yaitu sebesar 0,0782. Pada *abrasive wear*, kekerasan adalah sifat yang paling penting untuk meningkatkan kemampuan suatu baja dalam ketahanan aus dikarenakan goresan (Ratia, 2015). Semakin keras material



tersebut, maka semakin sulit media *abrasive* untuk melakukan penetrasi dan menggores material. Karena itulah, material HT875-t60 memiliki nilai ketahanan aus yang paling tinggi dikarenakan nilai kekerasannya paling tinggi dan dibuktikan dengan pengurangan massa yang sangat rendah. Sifat ketahanan aus juga dipengaruhi oleh austenite sisa (*retained austenite*). *Austenite* sisa bersifat lunak, sedangkan *martensite* bersifat keras. Keberadaan keduanya dalam struktur mikro memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap nilai *wear rates* dari material uji (Nurjaman, 2012). Karena itulah material HT900-t120 memiliki nilai ketahanan aus yang paling rendah dikarenakan banyaknya kandungan austenit sisa yang dibuktikan dengan pengurangan massa yang sangat besar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penyebab kegagalan komponen *axle shaft* dikarenakan tegangan yang terjadi memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai *yiel strength* dari material *axle shaft*. Ketidaksihesuaian material yang digunakan dengan standar pun menjadi penyebab kegagalan karena jenis, komposisi, dan nilai kekerasan material memiliki perbedaan yang signifikan sehingga mengakibatkan terjadinya *adhesive wear*.
2. Temperatur austenisasi yang paling optimal terdapat pada temperatur 875 °C, dimana pada temperatur ini nilai kekerasan dan ketahanan aus meningkat dan dibuktikan dengan terdapat fasa *plate martensite*, *bainite*, dan sedikit *retained austenite*.
3. Pengaruh waktu tahan pemanasan pada proses hardening adalah pada temperatur 850 °C dan 900 °C akan menaikkan nilai kekerasan dan ketahanan aus terlebih dahulu pada waktu tahan 90 menit kemudian pada waktu tahan 120 menit akan menurunkan nilai kekerasan dan ketahanan aus.

5.2 Saran

1. Pada saat melakukan pembelian komponen *axle shaft* harus disertai dengan sertifikat komposisi kimia dan sifat mekanik yang sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.
2. Pada proses *heat treatment* yang dilakukan sebaiknya tidak memilih temperatur austenisasi yang terlalu tinggi dan waktu tahan yang terlalu lama untuk mendapat hasil optimal



-
3. Menggunakan media oli dengan agitasi untuk meningkatkan kapasitas pendinginan.

DAFTAR PUSTAKA

- Asi, Osman. 2006. *Fatigue failure of a rear axle shaft of an automobile*. Turkey: Afyon Kocatepe University.
- ASM Handbook. 1991. *ASM Handbook Volume 4 Heat Treatment*. USA: ASM International.
- ASTM A29. 1999. *Standard Specification for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought and ColdFinished*. USA: ASM International.
- ASTM E3. 2001. *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimen*. USA: ASM International
- ASTM G99. 2003. *Standard Test Method for Wear testing with Pin-on-Disk Apparatus*. USA: ASM International.
- Avner, Sidney H. 1987. *Introduction to Physical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- AZoM. 2012. *AISI 4340 Alloy Steel*. <[URL: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6772](https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6772)>
- Blau, P. J. 2001. *The Significance and The Use of Friction Coefficient*. Amsterdam: Tribology International
- Brooks, Charlie and Choudhury, Ashok. 2002. *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York: McGraw-Hill.
- Callister, William D. 2010. *Materials Science and Engineering an Introduction*. USA: World Color USA/Versailles.
- Campbell, F.C. 2008. *Elements of Metallurgy and Engineering*. New York: ASM International.
- Charre, Madeleine D. 2004. *Microstructure of Steels and Cast Irons*. Jerman: Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Darmanto. 2014. *Analisis Keausan Aluminium Menggunakan Triboster Pin-on-Disc dengan Variasi Kondisi Pelumas*. Semarang: Universitas Wahid Hasyim.
- Das, Souvik. 2015. *Failure analysis of axle shaft of a fork lift*. India: R&D and Scientific Services.
- Dieter, George E. 1987. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: Erlangga.

- Hokkirigawa, K. And Kato, K. 1989. **Theoretical Estimation of Abrasive Wear Resistance Based on Microscopic Wear Mechanism**. New York: Wear of Materials.
- Karl Georg. 2010. **Crane Wheels**. Belanda: Stahlherstellungs- und Verarbeitungs GmbH
- Lee, Woei-Shyan. 1997. **Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions**. Taiwan: National Cheng Kung University
- Maalekian, Mehran. 2007. **The Effects of Alloying Elements on Steels (I)**. Spanyol: Institut für Werkstoffkunde, Schweißtechnik und Spanlose Formgebungsverfahren
- Makela, Weldon. 2012. **Heat Treating Basics**. Singapura: Materials Testing & Analysis Group, Element St. Paul
- Nurjaman, Fajar. 2012. **Pembuatan Grinding Ball dari Material White Cast Iron dengan Penambahan Chromium, Molybdenum, Vanadium, dan Boron Sebagai Unsur Paduan Pembentuk Karbida**. Lampung: UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung, LIPI.
- Pampania, Jagdish. 2015. **Heat Treatment Process**. <URL: <https://www.slideshare.net/pampaniajagdish/heat-treatment-process-for-steel>>
- Phule, Pradeep. 2003. **The Science and Engineering of Materials, 4th**. Australia : Thomson/Brooks-Cole
- Pramono, Agus. 2011. **Karakteristik Mekanik Proses Hardening Baja Aisi 1045 Media Quenching Untuk Aplikasi Sprochet Rantai** .Cilegon: Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
- Priyadarshini1, Saigeeta. 2016. **Effect of quenching medium on hardness of three grades of steel - AISI 1040, 1050 and 4340**: Sharda University
- Rahayu, Diah p. 2017. **STRATEGI MEMINIMASI BIAYA PERAWATAN UNIT LUFFING CRANE 01 DI PT**

**PELABUHAN INDONESIA III (persero) CABANG
TANJUNG EMAS SEMARANG.** Semarang:
Universitas Dian Nuswantoro.

- Ratia, V. 2015. **Behavior of Martensitic Wear Resistant Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions.** Tampere: Tampere University of Technology
- Stachowiak, G.W. 2005. **Wear–Materials, Mechanisms And Practice.** England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Suherman, Wahid. 1999. **Ilmu Logam II.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Suherman, Wahid. 2003. **Ilmu Logam I.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Suherman, Wahid. 2011. **Perlakuan Panas.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tarjudin, Raden M. 2017. **Sistem dan Jenis Crane.** Malang: Universitas Muhammadiyah Malang
- Thelning. 1984. **Steel and Its Heat Treatment.** Delhi: Replika Press
- Zhen, Song. 2007. **Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Steel.** Beijing: University of Science and Technology
- Zum Gahr, K.H. 1987. **Microstructure and Wear of Materials.** Amsterdam: Tribology Series.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

2. Lampiran ASTM A291

TABLE 1 Chemical Requirements

Element	Composition, %						
	Grade 1	Grade 2	Grade 3	Grade 3A	Grades 4 to 7 Classes E, F, G, and H	Grade 8	Grade 9
	Class A	Class B	Class C	Class D		Class I	Class J
Carbon	0.55 max	0.50 max	0.45 max	0.45 max	0.35-0.50	0.38-0.45	0.25-0.39
Manganese	0.60-0.90	0.40-0.90	0.40-0.90	0.40-0.90	0.40-0.90	0.40-0.70	0.20-0.60
Phosphorus, max	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.015
Sulfur, max	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.015
Silicon ^A , max	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.40	0.35
Nickel	0.30 max	^B	0.50 max	1.00-3.00	1.65 min	0.30 max	3.25-4.00
Chromium	0.25 max	^B	1.25 max	1.50 max	0.60 min	1.40-1.80	1.25-1.75
Molybdenum	0.10 max	^B	0.15 min	0.15 min	0.20-0.60	0.30-0.45	0.30-0.70
Vanadium, max	0.06	0.10	0.05	0.10	0.10	0.03	0.05-0.15
Copper, max	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Aluminum	0.85-1.30	...

^A When vacuum carbon deoxidation is used, silicon maximum shall be 0.10 %.

^B Optional with manufacturer and purchaser.

TABLE 2 Mechanical Properties

Grade	Class	Size, Solid Diameter or Thickness, in. ^A		Tensile Strength, min		Yield Strength, 0.2% Offset, min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %		Reduction of Area, min, %		Charpy V-notch	Brinell Hardness Number Range
		Over	Not Over	psi	MPa	psi	MPa	Longi-tudinal	Transverse (Tangential)	Longi-tudinal	Transverse (Tangential)		
1	A	...	10	85 000	585	50 000	345	22	...	45	170 to 223
		10	...	80 000	550	45 000	310	20	16	37	30		
2	B	...	10	95 000	655	70 000	485	20	...	45	201 to 241
		10	20	95 000	655	70 000	485	20	18	45	34		
3, 3A	C, D	95 000	655	70 000	485	18	16	38	30	...	223 to 262
		...	10	105 000	725	80 000	550	19	...	45	...		
		10	20	105 000	725	80 000	550	19	16	45	32		
4	E	105 000	725	80 000	550	18	14	38	30	...	248 to 293
		...	10	120 000	825	95 000	655	16	...	40	...		
		10	20	120 000	825	95 000	655	14	12	35	30		
5	F	115 000	795	90 000	620	13	10	33	25	...	285 to 331
		...	10	140 000	965	115 000	795	16	...	40	...		
		10	20	135 000	930	110 000	760	14	12	35	30		
6	G	130 000	905	105 000	725	12	10	30	25	...	302 to 352
		...	10	145 000	1000	120 000	825	15	...	40	...		
		10	20	140 000	965	115 000	795	14	12	35	30		
7	H	135 000	930	110 000	760	12	10	30	25	...	341 to 415
		...	10	170 000	1375	140 000	960	14	...	35	...		
		10	20	165 000	1140	135 000	930	12	10	30	25		
8	I	160 000	1105	130 000	905	10	10	25	25	...	255 to 302
		...	10	120 000	825	85 000	585	15	...	40	...		
9	J	...	20	...	170 000	1175	140 000	960	10	10	30	25	352 to 401

^A 10 in. = 250 mm. 20 in. = 500 mm.

3. Lampiran Pengujian Kekerasan

Material	Pengujian Ke-					HV	HB	UTS(Mpa)
	1	2	3	4	5			
Tanpa Perlakuan	412	414	413	419	417	415	392	1352,4
HT850-t60	502	500	485	482	502	494	466	1607,7
HT850-t90	492	507	510	497	515	504	475	1638,75
HT850-t120	481	482	461	463	475	472	445	1535,25
HT875-t60	525	522	508	540	545	528	497	1714,65
HT875-t90	490	510	508	515	505	506	477	1645,65
HT875-t120	461	455	453	455	458	456	430	1483,5
HT900-t60	461	453	413	402	409	428	404	1393,8
HT900-t90	417	443	446	473	447	445	420	1449
HT900-t120	408	408	386	376	387	393	372	1283,4

4. Lampiran Pengujian Abrasif

	m0	m1	m2	m3	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	Rata-rata
Tanpa Perlakuan	56,5462	56,4787	56,4004	56,3372	0,0675	0,0783	0,0632	0,0697
HT850-t60	57,5751	57,549	57,4948	57,45	0,0261	0,0542	0,0448	0,0417
HT850-t90	52,7892	52,768	52,7319	52,7212	0,0212	0,0361	0,0107	0,0227
HT850-t120	53,5218	53,4744	53,402	53,327	0,0474	0,0724	0,075	0,0649
HT875-t60	53,5136	53,4773	53,443	53,4099	0,0363	0,0343	0,0331	0,0346
HT875-t90	54,5198	54,5094	54,4673	54,4274	0,0104	0,0421	0,0399	0,0308
HT875-t120	59,9827	59,9352	59,8739	59,8034	0,0475	0,0613	0,0705	0,0598
HT900-t60	54,8245	54,748	54,7368	54,6629	0,0765	0,0112	0,0739	0,0539
HT900-t90	52,3729	52,3255	52,268	52,202	0,0474	0,0575	0,066	0,0570
HT900-t120	54,8156	54,6944	54,6313	54,581	0,1212	0,0631	0,0503	0,0782

Note:

- $\Delta 1$ adalah selisih antara m0 dan m1
- $\Delta 2$ adalah selisih antara m1 dan m2
- $\Delta 3$ adalah selisih antara m2 dan m3

5. Lampiran Pengujian Komposisi

	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 1/29/2018 10:58:52 AM

Comment: Low alloy Steel Element concentration

Sample Name: TTES S45C Quality:

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.436	0.270	0.710	0.0183	0.0227	0.147	0.0222	0.0695
2	0.428	0.268	0.700	0.0172	0.0225	0.145	0.0213	0.0698
3	0.442	0.273	0.719	0.0185	0.0277	0.149	0.0222	0.0624
< x > (3)	0.435	0.270	0.710	0.0180	0.0243	0.147	0.0219	0.0672
sd	0.0069	0.0028	0.0095	0.00067	0.0030	0.0017	0.00053	0.0042
rsd	1.6	1.0	1.3	3.7	12.2	1.1	2.4	6.2

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0227	0.0141	0.174	< 0.0010	0.0010	0.0012	< 0.0100	< 0.0030
2	0.0211	0.0145	0.171	< 0.0010	< 0.0010	0.0011	< 0.0100	< 0.0030
3	0.0212	0.0140	0.177	< 0.0010	0.0012	0.0012	< 0.0100	< 0.0030
< x > (3)	0.0216	0.0142	0.174	< 0.0010	0.0011	0.0012	< 0.0100	< 0.0030
sd	0.00093	0.00027	0.0026	0.00000	0.00009	0.00008	0.00000	0.00000
rsd	4.3	1.9	1.5	0.0	8.6	6.7	0.0	0.0

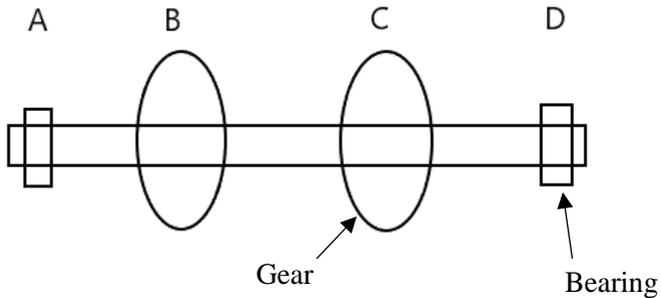
	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	B	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0315	0.0415	< 0.0015	< 0.0040	0.0011	< 0.0030	< 0.0020	< 0.0020
2	0.0314	0.0423	< 0.0015	< 0.0040	0.00060	< 0.0030	< 0.0020	< 0.0020
3	0.0303	0.0388	< 0.0015	< 0.0040	0.00077	< 0.0030	< 0.0020	< 0.0020
< x > (3)	0.0311	0.0409	< 0.0015	< 0.0040	0.00081	< 0.0030	< 0.0020	< 0.0020
sd	0.00068	0.0018	0.00000	0.00000	0.00024	0.00000	0.00000	0.00000
rsd	2.2	4.4	0.0	0.0	28.9	0.0	0.0	0.0

	La	Fe	Sb	Te				
	%	%	%	%				
1	0.0021	98.0	0.0046	0.0015				
2	0.0021	98.0	0.0040	0.0011				
3	0.0020	98.0	0.0011	< 0.0010				
< x > (3)	0.0021	98.0	0.0033	0.0012				
sd	0.00003	0.0204	0.0019	0.00026				
rsd	1.6	0.0	57.8	21.3				

Tanda tangan



6. Lampiran Analisa tegangan



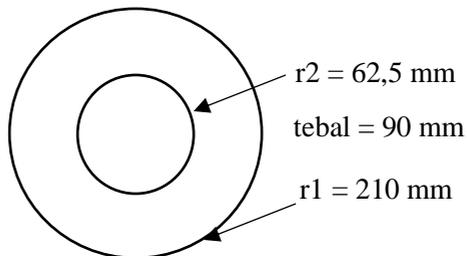
Diketahui:

$$n = 510 \text{ rpm}$$

$$P = 50 \text{ kw} = 67,0511 \text{ hp}$$

$$\rho_{1045} = 7,87 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{4340} = 7,85 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$



$$\text{Massa Gear} = \rho \times V$$

$$= 7,85 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \pi \{ (210 \times 10^{-1} \text{ cm})^2 - (62,5 \times 10^{-1} \text{ cm})^2 \} \times (90 \times 10^{-1}) \text{ cm}$$

$$= 89,4 \text{ kg}$$

$$r = 62,5 \text{ mm}$$



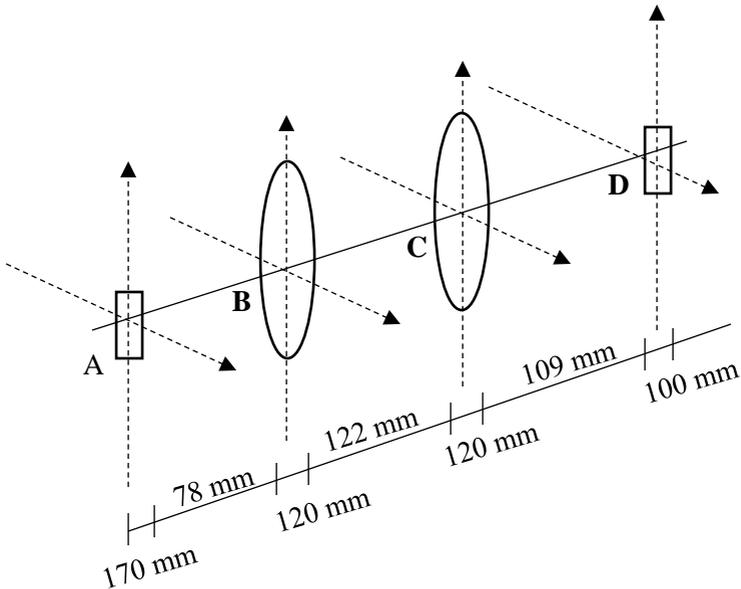
$$l = 810 \text{ mm}$$

$$\text{Massa Poros} = \rho \times V$$

$$= 7,87 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \pi(62,5 \times 10^{-1} \text{ cm})^2 \times (180 \times 10^{-1}) \text{ cm}$$

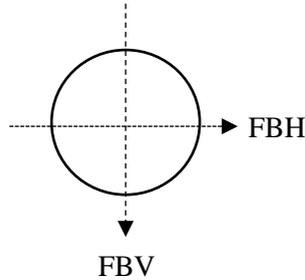
$$= 78,2 \text{ kg}$$

Free Body Diagram



Pada setiap gear dan bearing memiliki 2 buah gaya yaitu gaya vertikal dan horizontal

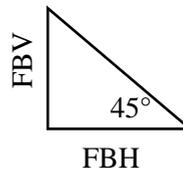
Diasumsikan gaya vertikal pada gear dinamakan FBV (gear B) dan gaya horizontal pada gear dinamakan FBH (gear C). Gear B dan gear C memiliki nilai yang sama



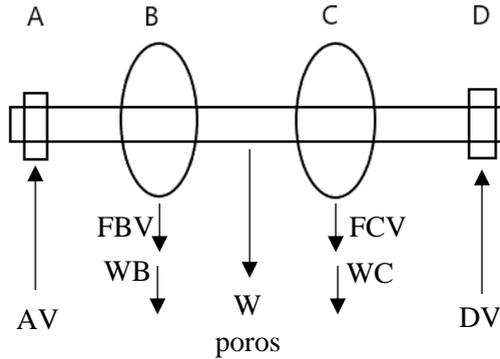
$$\begin{aligned}
 \mathbf{FBH} &= \frac{\text{Torsi}}{\text{jari}^2} = \frac{\frac{63000\text{hp}}{\text{rpm}}}{\text{jari}^2} \\
 &= \frac{63000 \times 67,0511}{\frac{510}{210 \times 10^{-2} \text{ m}}} \\
 &= \frac{8282,7 \text{ lb in}}{0,21 \text{ m}} = \frac{95,427 \text{ kg m}}{0,21 \text{ m}} \\
 &= \mathbf{454,41 \text{ kg}}
 \end{aligned}$$

Diasumsikan letak gear dari motor penggerak terhadap gear B dan C membentuk sudut $\theta = 45^\circ$. Sehingga nilai FBV adalah

$$\begin{aligned}
 \mathbf{FBV} &= \mathbf{FBH} \times \tan\theta \\
 &= 454,41 \text{ kg} \times \tan 45^\circ \\
 &= \mathbf{388,1 \text{ kg}}
 \end{aligned}$$



Analisa Gaya Vertikal



Untuk mencari nilai AV maka diasumsikan nilai momen pada D
 $= 0$

$$\Sigma M_D = 0$$

$$AV(649) - FBV(451) - WB(451) - WP(405) - WC(209) - FCV(209) = 0$$

AV

$$= \frac{FBV(451) + WB(451) + WP(405) + WC(209) + FCV(209)}{649}$$

$$= \frac{388,1(451) + 89,4(451) + 78,2(405) + 89,4(209) + 388,1(209)}{649}$$

$$= \mathbf{530,71 \text{ kg}}$$

Untuk mencari DV maka resultan gaya vertikal harus $= 0$ (Gaya ke atas = positif)

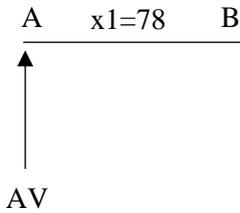
$$+\uparrow \Sigma F_y = 0$$

$$AV - FBV - WB - WP - FCV - WC + DV = 0$$

$$\begin{aligned}
 DV &= FBV + WB + WP + FCV + WC - AV \\
 &= 388,1 + 89,4 + 78,2 + 388,1 + 89,4 - 530,71 \\
 &= \mathbf{502,09 \text{ kg}}
 \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan nilai dari masing-masing gaya vertical maka dilakukan Analisa momen untuk mengetahui momen mana yang paling besar. Perhitungan ini dibagi menjadi 3 potongan

Potongan (1) – (1)



$$0 \leq x_1 \leq 78$$

$$\Sigma M_1 = 0$$

$$M_1 + AV \times x_1 = 0$$

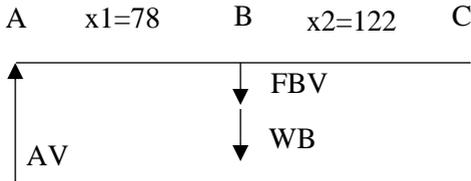
$$M_1 = -AV \times x_1$$

$$\text{Jika } X_1 = 0 \rightarrow \mathbf{M_A = 0}$$

$$\text{Jika } X_1 = 78 \rightarrow \mathbf{M_B = -AV \times x_1}$$

$$= -570,71 \times 78 = \mathbf{-41,39 \text{ kgm}}$$

Potongan (2) – (2)



$$0 \leq x_2 \leq 320$$

$$\Sigma M_2 = 0$$

$$M_2 + AV \times (x_1 + x_2) - FBV \times x_2 - WB \times x_2 = 0$$

$$M_2 = -AV \times (x_1 + x_2) + FBV \times x_2 + WB \times x_2$$

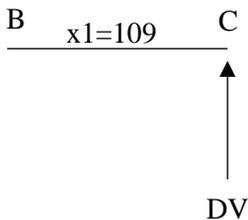
$$\text{Jika } x_2 = 0 \rightarrow \mathbf{M_B} = -AV \times x_1 = -41,39 \text{ kgm}$$

$$\text{Jika } x_1 = 320 \rightarrow \mathbf{M_C} = -AV(320) + FBV(122) + WB(122)$$

$$= -570,71 \times 320 + 388,1 \times 122 + 89,4 \times 122$$

$$= \mathbf{111,57 \text{ kgm}}$$

Potongan (3) – (3)



$$0 \leq x_3 \leq 109$$

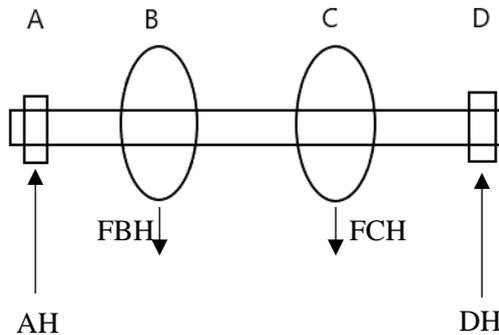
$$\Sigma M_3 = 0$$

$$M_3 + DV \times x_3 = 0$$

$$\text{Jika } x_3 = 0 \rightarrow M_D = 0$$

$$\begin{aligned} \text{Jika } x_3 = 109 \rightarrow M_D &= -DV \times x_3 \\ &= 502,09 \times 109 = \mathbf{54,727 \text{ kgm}} \end{aligned}$$

Analisa Gaya Horizontal



Untuk mencari nilai AH maka diasumsikan nilai momen pada D = 0

$$\Sigma M_D = 0$$

$$AH (649) - FBH (451) - FCH (209) = 0$$

$$AH = \frac{FBH (451) + FCH (209)}{649}$$

$$= \frac{454,41 (451) + 454,41 (209)}{649}$$

$$= \mathbf{462,11 \text{ kg}}$$

Untuk mencari DH maka resultan gaya horizontal harus = 0
(Gaya ke atas = positif)

$$+\uparrow \Sigma F_y = 0$$

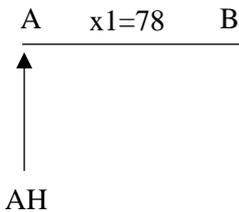
$$AH - FBH - FCH + DH = 0$$

$$\mathbf{DH} = -AH + FBH + FCH$$

$$= -462,11 + 454,41 + 454,41$$

$$= \mathbf{446,71 \text{ kg}}$$

Potongan (1) – (1)



$$0 \leq x_1 \leq 78$$

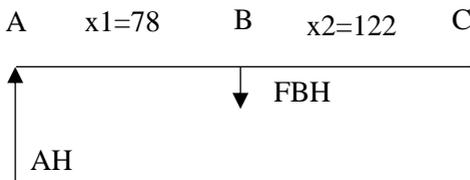
$$\Sigma M_1 = 0$$

$$M_1 + AH \times x_1 = 0$$

$$\text{Jika } x_1 = 0 \rightarrow \mathbf{M_A} = 0$$

$$\text{Jika } x_1 = 78 \rightarrow \mathbf{M_B} = -462,11 \times 78 = \mathbf{-36 \text{ kgm}}$$

Potongan (2) – (2)



$$0 \leq x_2 \leq 320$$

$$\Sigma M_2 = 0$$

$$M_2 + AH \times (x_1 + x_2) - (FBV \times x_2) - (w_B \times x_2) = 0$$

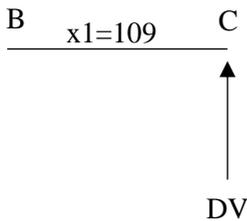
$$\text{Jika } x_2 = 0 \rightarrow M_B = AH \times x_1 = -36 \text{ kgm}$$

$$\text{Jika } x_2 = 320 \rightarrow M_C = -AH(x_1 + x_2) + (FBH \times x_2) + (w_B \times x_2)$$

$$= -AH(320) + (454,41 \times 122) + (89,4 \times 122)$$

$$= -147875,2 + 55438,02 + 10906,8 = \mathbf{81,5 \text{ kgm}}$$

Potongan (3) – (3)



$$0 \leq x_2 \leq 320$$

$$\Sigma M_3 = 0$$

$$M_3 + DH \times x_3 = 0$$

$$\text{jika } x_3 = 0 \rightarrow M_D = 0$$

$$\text{jika } x_3 = 109 \rightarrow M_D = -446,71 \times 109 = \mathbf{-48,6 \text{ kgm}}$$

Maka resultan antara momen terbesar vertikal dan horizontal adalah

$$\begin{aligned} M &= \sqrt{M_{CV}^2 + M_{CH}^2} \\ &= \sqrt{111,57^2 + 81,5^2} \\ &= \mathbf{138,16 \text{ kgm}} \end{aligned}$$

Momen inersia poros adalah

$$I = \frac{1}{12} \times 78,2 \times 810^2 = 4,27 \text{ kgm}^2$$

Maka tegangan yang terjadi pada poros adalah

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{M \times C}{I} \\ &= \frac{138,16 \times 62,5}{4,27} \\ &= \mathbf{2022,24 \text{ MPa}}\end{aligned}$$

Diketahui nilai σ (yield strength) dari material poros yaitu 1045 adalah 450 MPa

Dapat disimpulkan bahwa nilai $\sigma > \sigma_{yield}$, maka material poros 1045 akan mengalami kegagalan

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT berkat pertolongan dan bimbingan-Nya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua dan adik penulis yang telah menjadi sumber motivasi dalam pembuatan laporan ini, serta telah mendukung secara moril maupun materiil, dan doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan, keselamatan, dan kelancaran dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
3. Dr. Agung Purniawan S.T, M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
4. Ir. Rochman Rochiem M.Sc selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
5. Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T selaku co dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
6. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material FTI ITS.
7. Rindang Fajarin S.Si, M.Si selaku dosen wali yang telah membantu penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
8. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
9. Bapak Agus dan Bapak Muslics selaku pembimbing di PT. PAL Indonesia (Persero) yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.

10. Teman – teman seperkontrakan penulis, Adnan, Angga, Treshna, Reza, Redha, Redy, Fadhli dan Icod yang telah menemani dan mewarnai hari – hari penulis selama di jenjang perkuliahan ini.
11. Teman – teman seperjuangan Tugas Akhir Analisa Kegagalan, Reza dan Annisa serta teman-teman Lab Metallurgi yang telah membantu dan menyemangati penulis selama penulisan Laporan Tugas Akhir.
12. Septian Dyah Faristi yang telah memberi bantuan, dukungan moril, semangat, motivasi dan canda tawa serta cinta kasih kepada penulis dalam mengerjakan TA ini
13. Teman – teman kabinet dan staff BEM FTI sebagai tempat penulis untuk belajar dan mengisi hari-hari penulis sehingga mendapatkan pengalaman yang sangat berkesan.
14. Keluarga MT 16 yang penulis sayangi, yang telah menemani dan memberikan banyak pengalaman berharga selama jenjang perkuliahan ini.
15. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman - teman sekalian.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Lhoksemawe, 12 September 1996, dan merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Insan Kamil, SMP Negeri 4 Bogor, dan SMA Negeri 1 Bogor. Setelah lulus dari SMA penulis melanjutkan studinya di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2014. Saat menempuh pendidikan di Teknik Material penulis memilih bidang Korosi dan Analisa Kegagalan.

Sejak kuliah penulis aktif mengikuti organisasi di Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri (BEM FTI) selama dua tahun kepengurusan dan pernah menjabat sebagai Kepala Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa. Penulis juga aktif dalam dunia pelatihan sebagai pemandu LKMM FTI. Penulis aktif dalam mengikuti berbagai kegiatan pelatihan seperti LKMM Pra TD, LKMM TD, LKMM TM, PP LKMM PJTD , dan PKTI.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT. Dirgantara Indonesia (Persero) pada Divisi Detail Part Manufacturing pada bulan Juli 2017 – Agustus 2017. Selama kerja praktek, penulis mendalami topik terkait “Analisis Proses Pengelasan TIG Welding pada Part Upper Strut Pesawat NC-212 Vietnam”.

Tugas akhir yang diambil penulis adalah dalam bidang Korosi dan Analisa Kegagalan dengan judul “Analisis Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan pada Proses *Hardening* Material 4340 Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro untuk Komponen *Axle Shaft* PT PAL Indonesia (Persero)”.

Email: jourdypraditya@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)