



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN *TEMPERING* TERHADAP KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS MATERIAL BAJA AISI 1045 SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN PADA *AXLE SHAFT*

REZA DYAN PRATAMA
NRP. 02511440000039

Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.

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



TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR
DAN WAKTU TAHAN *TEMPERING* TERHADAP
KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS MATERIAL
BAJA AISI 1045 SEBAGAI SOLUSI KEGAGALAN
PADA *AXLE SHAFT***

REZA DYAN PRATAMA
NRP.0251144000039

Dosen Pembimbing:
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

ANALYSIS OF TEMPERING TEMPERATURE AND HOLDING TIME VARIATION EFFECT ON HARDNESS AND WEAR RESISTANCE AS A FAILURE SOLUTION OF AISI 1045 STEEL AXLE SHAFT

REZA DYAN PRATAMA
NRP.02511440000039

Advisor:
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.

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

(This page is left intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN

Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Tempering terhadap Kekerasan dan Ketahanan Aus Material Baja AISI 1045 sebagai Solusi Kegagalan pada 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:

REZA DYAN PRATAMA

02511440000039

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc..... (Pembimbing 1)
2. Dian Mughni Fellicia, S.T..... (Pembimbing 2)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Tempering terhadap Kekerasan dan Ketahanan Aus Material Baja AISI 1045 sebagai Solusi Kegagalan pada Axle Shaft

Nama mahasiswa : Reza Dyan Pratama
NRP : 02511440000039
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Dian Mughni F, S.T., M.Sc.

Abstrak

Level luffing crane merupakan salah satu alat yang digunakan di PT. PAL INDONESIA (Persero). Pada *crane* ini terdapat satu bagian yang mengalami kegagalan yaitu *axle shaft*. *Axle shaft* mengalami keausan yang menyebabkan pemakaiannya jauh berkurang dari umur pakai yang direncanakan. Setelah dilakukan uji komposisi, diketahui bahwa material *axle shaft* tidak sesuai standar ASSAB 705. Sehingga pada penelitian ini dilakukan proses *hardening* dan *tempering* untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus agar sesuai dengan standar. Proses *hardening* dilakukan pada temperatur 850°C dan kemudian di-*quench* menggunakan air. Sedangkan proses *tempering* dilakukan dengan variasi temperatur yaitu 350°C, 375°C, 400°C dan variasi waktu tahan 60 menit, 90 menit, dan 120 menit. Kemudian dilakukan uji kekerasan, metalografi, dan uji keausan untuk membandingkan pada kondisi awalnya. Didapatkan hasil berupa kekerasan dan ketahanan aus maksimal pada temperatur 350°C dengan waktu tahan 60 menit dengan kekerasan sebesar 534,6 HV serta pengurangan massa sebesar 0,042 gr, dengan struktur mikro *tempered martensit* dan bainit.

***Kata kunci:* AISI 1045, hardening, tempering, keausan, kekerasan.**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Analysis Of Tempering Temperature And Holding Time Variation Effect On Hardness And Wear Resistance As A Failure Solution Of AISI 1045 Steel Axle Shaft

Name : Reza Dyan Pratama
SRN : 02511440000039
Major : Teknik Material dan Metalurgi
Advisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Co-Advisor : Dian Mughni F, S.T., M.Sc.

Abstract

Level luffing crane is a tool that used in PT. PAL INDONESIA (Persero). Axle shaft is a part of level luffing crane which failed. Axle shaft has experienced wear problems because the use of material is reduced from the lifetime. From the composition test result, known that the material is not suitable with the ASSAB 705 standard. Hence, hardening and tempering is necessary to increase the hardness and wear resistance. Hardening process was used at temperature 850°C and then quenched with water, followed by tempering process with three variations of temperature at 350°C, 375°C, and 400°C, and three variations of holding time at 60, 90, and 120 minutes. Hardness test, metallograhy, and wear resistance test was conducted to know the properties of material. The highest hardness and wear resistance was obtained in specimen with tempering treatment at 350°C and 60 minutes of holding time. The hardness of the specimen is 534.6 HV and mass reduction 0.042 gr. From the optical microscope found the microstructure of the specimen are tempered martensit and bainit.

Keyword: AISI 1045, hardening, tempering, wear, hardness.

(This page is 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 Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Tempering terhadap Kekerasan dan Ketahanan Aus Material Baja AISI 1045 Sebagai Solusi Kegagalan Pada 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. Kedua orang tua 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.
2. Dr. Agung Purniawan S.T, M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
3. 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.
4. Dian Mughni F, S.T., M.Sc. selaku co dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.

5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material FTI ITS.
6. Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si selaku dosen wali yang telah membantu penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
8. Bapak Agus Prasetyohadi selaku pembimbing di PT. PAL INDONESIA (Persero) Tbk yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Material.
10. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan temanteman 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, 4 Juli 2018

Penulis,
Reza Dyan Pratama

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	v
Abstrak	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Level Luffing Crane	5
2.2 <i>Axle Shaft</i>	10
2.3 Baja AISI 1045.....	12
2.4 Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	14
2.5 <i>Heat Treatment</i>	16
2.5.1 <i>Hardening</i>	17
2.5.2 <i>Quench and Tempered</i>	18
2.6 Pengujian Komposisi.....	22
2.7 Pengujian Metalografi	24

2.8 Pengujian Kekerasan	24
2.9 Uji Kekerasan Vickers.....	25
2.10 Uji Abrasif.....	25
2.11 Keausan	27
2.11.1 Jenis Keausan	28
2.12 Penelitian Sebelumnya	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Diagram Alir	31
3.2 Metode Penelitian.....	33
3.3 Material yang digunakan	33
3.3.1. Material	33
3.2.2. Spesimen	34
3.4 Peralatan	35
3.5 Tahapan Penelitian	37
3.5.1 Data Operasional Lapangan	37
3.5.2 Preparasi Spesimen.....	38
3.5.3 Pengamatan Makroskopik dan Mikroskopik.....	38
3.5.4 Uji Komposisi.....	38
3.5.5 Uji Kekerasan	38
3.5.6 Uji Keausan	39
3.5.7 Perlakuan Panas.....	39
3.7 <i>Timeline</i> Penelitian	41
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Analisis Data	43

4.1.1 Analisis Data Operasional Material.....	43
4.1.2 Hasil Pengujian Kekerasan <i>Axle Shaft</i>	43
4.1.3 Hasil Pengujian Ketahanan Aus <i>Axle shaft</i>	45
4.1.4 Hasil Pengujian Makroskopik <i>Axle Shaft</i>	47
4.1.5 Hasil Uji Komposisi Kimia <i>Axle Shaft</i>	47
4.1.6 Hasil Pengujian Metalografi <i>Axle Shaft</i>	47
4.2 Pembahasan.....	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	61
LAMPIRAN	xxiv

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Level luffing crane (Rahayu, 2017)	5
Gambar 2. 2 Komponen Level luffing crane (Araya, 2004).....	7
Gambar 2. 3 Skema sistem gantry luffing crane (PT. PAL INDONESIA).....	9
Gambar 2. 4 Axle shaft (PT. PAL INDONESIA).....	10
Gambar 2. 5 Grafik hubungan temperatur tempering dengan kekerasan (ASM vol.4).....	14
Gambar 2. 6 Diagram fasa Fe-Fe ₃ C (Callister, 2010).....	16
Gambar 2. 7 Diagram continuous cooling transformation untuk baja hipoeutektoid (Callister, 2010)	18
Gambar 2. 8 Diagram IT yang telah di-super impose untuk perlakuan konvensional quench dan temper (ASM vol 4, 1991)	21
Gambar 2. 9 Struktur mikro (a) perlit dan ferrit, (b) lath martensit, (c) lower bainit, (d) upper bainit (Charre, 2004)	22
Gambar 2. 10 Skema ilustrasi uji OES (Nayan, 2009)	23
Gambar 2. 11 Skema uji abrasif (Ghufron, 2016)	26
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	32
Gambar 3. 2 Komponen axle shaft yang mengalami aus.....	34
Gambar 3. 3 Spesimen uji perlakuan panas	35
Gambar 3. 4 CNC Wire Cutting EDM	35
Gambar 3. 5 ARL™ 3460 Optical Emission Spectrometer	36
Gambar 3. 6 Universal Hardness Tester HBRV 187.5A	36
Gambar 3. 7 Olympus BX51 Optical Microscope	37
Gambar 3. 8 Kurva perlakuan panas spesimen	40
Gambar 4. 1 Indentasi pengujian kekerasan	44
Gambar 4. 2 Grafik distribusi hasil uji kekerasan dengan variasi temperatur tempering dan waktu tahan	45
Gambar 4. 3 Grafik distribusi hasil uji keausan dengan variasi temperatur tempering dan waktu tahan	46

Gambar 4. 4 Struktur mikro pada axle shaft sebelum perlakuan panas. Perbesaran 500x.48

Gambar 4. 5 Struktur mikro setelah perlakuan hardening 850°C selama 30 menit. Perbesaran 500x.48

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Perbandingan sifat mekanik pada baja	11
Tabel 2. 2	Standar ASSAB 705	11
Tabel 2. 3	Data Operasional axle shaft	12
Tabel 2. 4	Komposisi Kimia Baja AISI 1045 (ASM vol.1)	13
Tabel 2. 5	Sifat Mekanik Baja 1045 (ASM vol.1).....	13
Tabel 2. 6	Kekerasan baja AISI 1045 setelah mengalami proses hardening dan tempering (ASM vol.4).....	14
Tabel 3. 1	Tabel komposisi kimia baja AISI 1045	34
Tabel 3. 2	Nama Spesimen Uji	39
Tabel 3. 3	Rancangan Penelitian	41
Tabel 4. 1	Nilai rata-rata pengujian kekerasan	44
Tabel 4. 2	Nilai rata-rata pengurangan massa.....	46
Tabel 4. 3	Hasil pengujian komposisi material axle shaft	47
Tabel 4. 4	Hasil perhitungan volume bainit (ASTM E562).....	52

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. PAL INDONESIA (Persero) merupakan salah satu industri yang ada di Indonesia. PT. PAL INDONESIA memproduksi alat utama sistem pertahanan Indonesia khususnya bagian kelautan. Lokasi Perusahaan di Ujung, Surabaya, dengan kegiatan utama memproduksi kapal perang dan kapal niaga, memberikan jasa perbaikan dan pemeliharaan kapal, serta rekayasa umum dengan spesifikasi tertentu berdasarkan pesanan. Kemampuan rancang bangun yang menonjol dari PT. PAL Indonesia (Persero) telah memasuki pasaran internasional dan kualitasnya telah diakui dunia. Dengan peran sebagai salah satu BUMN di Indonesia, PT. PAL INDONESIA (Persero) tentu mempunyai banyak sumber daya dan sejumlah alat yang dibutuhkan untuk seluruh pekerjaannya. Salah satu alat yang digunakan disana adalah *crane* dengan jenis *Level luffing crane*.

Level luffing crane merupakan *crane* yang digunakan untuk mengangkat barang dengan beban yang sangat berat bisa mencapai hingga 30 ton. Lamanya waktu bekerja pada *crane* ini umumnya 6-9 jam tergantung dari ukuran kapal. Terkadang *crane* ini digunakan selama 24 jam penuh jika pekerjaan yang harus dilakukan sangat banyak. Terdapat empat kaki yang menopang *crane* ini yang dimana masing-masing dari kaki tersebut terdapat empat roda. Roda tersebut digunakan agar *crane* bisa bergerak sesuai dengan jalurnya. Pada setiap roda tersebut terdapat sebuah *axle shaft* sebagai tempat roda berputar. Pada bagian ini lah terjadi kerusakan pada *crane*. Maksimal penggunaan dari *axle shaft* adalah selama 3 bulan yang seharusnya bisa mencapai 2-3 tahun. PT. PAL INDONESIA (Persero) mengganti komponen tersebut dengan material lain yang biayanya lebih murah tetapi tidak melihat spesifikasinya.



Kerusakan yang terjadi merupakan keausan yang menyebabkan adanya pengurangan dimensi dari yang awalnya 120 mm menjadi 70 mm. Setelah dilakukan uji komposisi dan uji kekerasan, didapatkan material yang tidak sesuai dengan standar ASSAB 705. Gesekan yang terjadi antara *gear* dan *axle shaft* yang diduga menjadi penyebab terjadinya keausan pada *axle shaft*. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus adalah dengan melakukan *hardening* dan *tempering*. Pada penelitian kali ini, proses *hardening* dilakukan pada temperatur 850°C. Sedangkan proses *tempering* dilakukan dengan variasi temperatur yaitu 350°C, 375°C, 400°C dan variasi waktu tahan 60 menit, 90 menit, dan 120 menit. Dengan melakukan hal tersebut diharapkan material *axle shaft* dapat mencapai tingkat kekerasan yang diinginkan sesuai dengan standar yang dibutuhkan pada material tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mekanisme kegagalan *axle shaft* pada *level luffing crane*?
2. Bagaimana pengaruh temperatur *tempering* pada baja AISI 1045 yang sudah mengalami pengerasan, terhadap kekerasan, ketahanan aus, dan struktur mikro?
3. Bagaimana pengaruh waktu tahan *tempering* pada baja AISI 1045 yang sudah mengalami pengerasan, terhadap kekerasan, ketahanan aus, dan struktur mikro?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini adalah:

1. Data operasi seperti temperatur, kecepatan gerak pada *axle shaft* dianggap sudah memenuhi standar operasional.



2. Desain *axle shaft* dianggap 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 *level luffing crane*.
2. Menganalisis pengaruh temperatur *tempering* pada proses pengerasan baja AISI 1045 terhadap kekerasan, ketahanan aus, dan struktur mikro, sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *axle shaft* di *level luffing crane*.
3. Menganalisis pengaruh waktu tahan *tempering* pada proses pengerasan baja AISI 1045 terhadap kekerasan, ketahanan aus, dan struktur mikro, sebagai solusi kegagalan yang terjadi pada komponen *axle shaft* di *level 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*.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Level Luffing Crane

Level luffing crane merupakan suatu mekanisme pada *crane* dimana posisi *hook* tetap berada di ketinggian yang sama, sementara *luffing* digunakan untuk menggerakkan *jib* ke atas dan ke bawah, sehingga dapat menggerakkan *hook* maju dan mundur. *Level luffing* merupakan mekanisme yang sangat berguna untuk membawa barang yang dekat dengan permukaan dan perlu dibawa dengan sangat hati-hati, seperti contohnya dalam konstruksi dan pembuatan kapal. *Luffing crane* berbentuk seperti *crane* kapal namun terletak di dermaga. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Beberapa menggunakan rel dan roda untuk berpindah tempat secara horisontal. Alat ini dapat digunakan untuk berbagai jenis *cargo*, seperti *container*, *bag cargo*, maupun curah kering (dengan penambahan alat tertentu). Cara kerja *crane* adalah dengan mengangkat material yang akan dipindahkan, memindahkan secara horisontal, kemudian menurunkan material ditempat yang diinginkan. (Rahayu, 2017)



Gambar 2. 1 *Level luffing crane* (Rahayu, 2017)

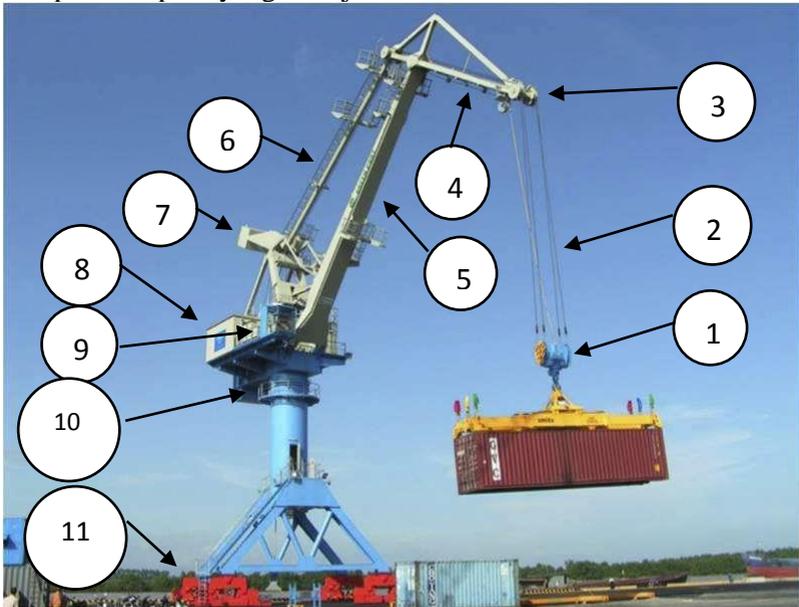


Beberapa tipe *crane* yang umum dipakai adalah:

1. *Crane Beroda Crawler*. Tipe ini mempunyai bagian atas yang dapat bergerak 360° dengan roda *crawler*, *crane* tipe ini dapat bergerak di dalam lokasi proyek saat melakukan pekerjaannya. Pada saat *crane* akan digunakan di proyek lain maka *crane* diangkut dengan menggunakan *lowbed trailer*.
2. *Truck Crane*, *crane* jenis ini dapat berpindah tempat dari satu proyek ke proyek lainnya tanpa bantuan dari alat pengangkutan. Akan tetapi bagian dari *crane* tetap harus dibongkar untuk mempermudah perpindahan. Seperti halnya *crawler crane*, *truck crane* ini dapat berputar 360 derajat. Untuk menjaga keseimbangan alat, *truck crane* memiliki kaki. Di dalam pengoperasiannya kaki tersebut harus dipasangkan dan roda diangkat dari tanah sehingga keselamatan pengoperasian dengan *boom* yang panjang akan terjaga.
3. *Crane* untuk lokasi terbatas, *crane* tipe ini diletakan di atas dua buah as tempat kedua as ban bergerak secara simultan. Dengan kelebihan ini maka *crane* jenis ini dapat bergerak dengan leluasa. Alat penggerak *crane* jenis ini adalah roda yang sangat besar yang dapat meningkatkan kemampuan alat dalam bergerak dilapangan dan dapat bergerak di jalan raya dengan kecepatan maksimum 30 mph. Letak ruang operator *crane* biasanya pada bagian-bagian *deck* yang dapat berputar.
4. *Tower Crane*, *tower crane* merupakan alat yang digunakan untuk mengangkat material secara

5. *vertical* dan *horizontal* kesuatu tempat yang tinggi pada ruang gerak yang terbatas. Tipe *crane* ini dibagi berdasarkan cara *crane* tersebut berdiri yaitu *crane* yang dapat berdiri bebas (*free standing crane*), *crane* diatas rel (*rail mounted crane*), *crane* yang ditambatkan pada bangunan (*tied-in tower crane*) dan *crane* panjat (*climbing crane*) (Diah, 2017).

Level luffing crane mempunyai berbagai macam komponen seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Komponen *Level luffing crane* (Arya, 2004)

Gambar 2.2 menunjukkan berbagai komponen *Luffing Crane* (1) *Hook/Spreader*, berfungsi bagian ini yaitu untuk mengangkat material yang dibutuhkan dengan bantuan kabel baja. (2) *Wire Rop*, berfungsi untuk mengangkat beban secara vertical.



(3) *Pulley*, digunakan untuk mempermudah arah gerak tali yang berfungsi untuk mengurangi gesekan. (4) *Main Jib*, lengan utama untuk menarik beban. (5) *Head Jib*, digunakan untuk menopang *pulley*. (6) *Tieback*, merupakan tempat untuk menopang *wire rop*. (7) *Counterweight*, bobot yang digunakan untuk menyeimbangkan beban. (8) Ruang mesin utama, tempat mesin penggerak motor *crane*. (9) *Cabin*, tempat operator mengendalikan *crane*. (10) *Slewing*, digunakan sebagai tumpuan *crane* untuk berputar. (11) *Gantry*, digunakan sebagai sistem penggerak *crane* (Araya, 2004).

Komponen penting lainnya dari *Luffing Crane* dapat dikelompokkan ke dalam beberapa sistem utama 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 menggunakan tipe roda, dengan *electric* hidrolik.

2) Sistem *Luffing*

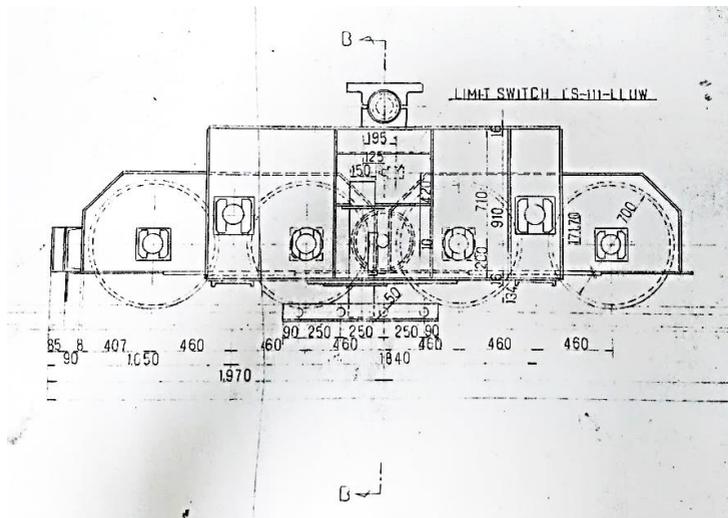
Luffing merupakan gerakan maju mundur lengan/jib GLC. Terpasang di *luffing platform* yang di tengah-tengah kolom vertikal dan terdiri dari satu motor kecepatan tinggi, kopling, *gear* dan *rack luffing*, sehingga lengan bergerak maju dan mundur. Rem menggunakan tipe roda, dengan *electric* hidrolik.

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 jenis pedal hidrolik blok, dan rem manual pengunci perangkat rotary, diterapkan untuk mengunci meja dan silinder putar *slewing*.

4) Sistem Gantry

Sistem *gantry* adalah untuk berpindah tempat dengan menggunakan media bantalan rel. Sistem *Gantry* terdiri dari dua roda dalam satu bogie, dengan setiap *bogie* di gerakkan oleh satu motor penggerak dengan kopling dan *gearbox*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Sistem pengereman menggunakan *thruster brake*, bekerja seperti mengunci/mengganjal roda. Dalam setiap satu set roda terdapat satu *thruster brake*. Motor *gantry* digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. *Thruster brake* berbentuk segitiga, apabila dilakukan pengereman, segitiga tersebut akan menekan roda dan terjadi gesekan untuk mengerem. Pada sistem gantry terdapat beberapa set roda. 1 set dirangkai dalam 1 *bogie* dimana terdapat 2 roda, 1 *gearbox* dan 1 motor listrik, dan di setiap roda terdapat 1 buah *axle shaft* sebagai poros.



Gambar 2. 3 Skema sistem gantry luffing crane (PT. PAL INDONESIA)



2.2 Axle Shaft

Semua jenis kendaraan pasti memiliki *axle shaft* yang tergabung dalam sebuah sistem. Fungsi dari *axle shaft* ini sendiri adalah untuk menghubungkan roda pada bagian ujungnya, dengan tujuan mentransmisikan tenaga dan gerakan rotasi. Bentuk dari *axle shaft* ditunjukkan pada Gambar 2.4. Pada umumnya *axle shaft* mengalami tegangan torsi dan tegangan *bending* karena bobotnya sendiri ataupun bobot komponen lain atau juga kemungkinan kesalahan susunan antara *bearing* (Osman, 2006). Fungsi selanjutnya dari sebuah *axle shaft* adalah untuk mempertahankan posisi roda secara komparatif satu sama lain ke arah badan kendaraan (Souvik Das, 2015).



Gambar 2. 4 *Axle shaft* (PT. PAL INDONESIA)

Menurut ASM Handbook vol. 1 ada beberapa material yang dapat digunakan sebagai *axle shaft* diantaranya adalah baja AISI 4340, baja AISI 4140, baja AISI 1045, dan lain sebagainya. 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 temperature 480°C dan bila digunakan melebihi temperature tersebut maka kekuatannya akan menurun. Beberapa perlakuan panas seperti *Hardening* dan *Tempering* dapat dilakukan pada baja jenis ini (ASM Handbook, 1990). Untuk baja dengan kadar karbon medium biasanya diberi perlakuan dengan di *hardening* dan



tempering. Dengan memvariasikan media *quenching* dan temperatur *tempering* maka akan didapatkan sifat mekanik dengan jarak yang luas (Avner, 1974). Baja karbon AISI 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). Perbandingan sifat mekanik dari beberapa baja tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Perbandingan sifat mekanik pada baja

Karakteristik Mekanik	AISI 4340	AISI 1045
<i>Tensile Strength</i>	745 MPa	585 MPa
<i>Yield Strength</i>	470 MPa	450 MPa
Modulus Elastisitas	190 – 210 GPa	190 – 210 GPa
<i>Hardness, Brinell</i>	217 HBN	163 HBN
<i>Hardness, Vickers</i>	240 HV	170HV

PT PAL INDONESIA (Persero) menggunakan ASSAB 705 sebagai standar untuk material *axle shaft* yang digunakan. Spesifikasinya dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Standar ASSAB 705

<i>Compositions (%)</i>	C	Mn	Cr	Ni	Mo
	0,40	0,70	0,80	1,80	0.25
<i>Delivery Condition</i>	<i>Quenched and tempered to 293-352 HB</i>				



<i>Yield Strength</i> (N/mm ²)	≥850
<i>Tensile Strength</i> (N/mm ²)	≥980
<i>Elongation</i> (%)	≥14
<i>Reduction of area</i> (%)	≥45
<i>Impact Strength</i> (J/cm ²)	≥55

Tabel 2. 3 Data Operasional *axle shaft*

Kapasitas	17 – 18 ton, <i>max</i> 22 ton
Kecepatan	36 m/menit <i>max</i>
Temperatur pemakaian	30 - 40°C
Waktu pemakaian per hari	6 – 9 jam
Usia rancangan	2 – 3 tahun
Usia actual pemakaian	2 – 3 bulan

Tabel 2.3 menunjukkan data operasional pada *axle shaft* PT. PAL INDONESIA (Persero). Dari data tersebut dapat dilihat bahwa usia actual pemakaian sangat jauh sekali dari target usia rancangan pemakaian. Material ini mengalami keausan yang sangat parah sehingga umurnya sangat pendek.

2.3 Baja AISI 1045

Spesifikasi pada baja merupakan standar yang telah dibuat oleh *American Iron and Steel Institute* (AISI) dan *Society of Automotive Engineers* (SAE) agar dapat mengidentifikasi baja sesuai dengan kebutuhan industry Amerika. Digit pertama mengindikasikan tipe dari baja tersebut. Contoh 1 mengindikasikan baja karbon, 2 mengindikasikan baja nickel, dan sebagainya. Digit kedua menunjukkan persentase perkiraan dari elemen paduan yang dominan. Digit ketiga dan keempat biasanya menunjukkan rata-rata kandungan karbon. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.



Tabel 2. 4 Komposisi Kimia Baja AISI 1045 (ASM vol.1)

UNS <i>number</i>	SAE-AISI <i>number</i>	<i>Cast or heat chemical ranges and limits, %</i>			
		C	Mn	P max	S max
G10450	1045	0,42-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050

Baja AISI 1045 merupakan baja karbon menengah yang memiliki fungsi di daerah yang memerlukan kekuatan dan kekerasan yang tinggi. Baja ini memiliki akurasi dan kelenturan yang memungkinkan untuk meminimalkan keausan dalam aplikasi kecepatan tinggi. Sehingga baja AISI 1045 mempunyai sifat mekanik seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Sifat Mekanik Baja 1045 (ASM vol.1)

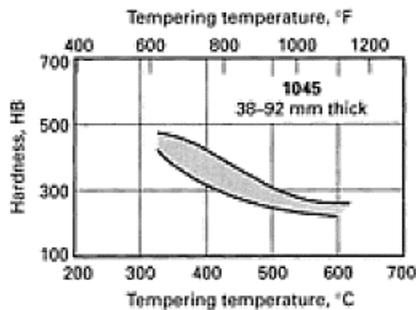
<i>Steel designati on</i>	<i>Type of processing</i>		<i>Estimated minimum values</i>							<i>Average machinability rating</i>
			<i>Tensile strength</i>		<i>Yield strength</i>		<i>Elongation in 50mm, %</i>		<i>Reduction in area, %</i>	<i>Hardness, HB</i>
SAE and/or AISI No.	UNS No.		MPa	ksi	MPa	ksi				
1045	G10450	<i>Hot rolled</i>	570	82	310	45	16	40	163	
		<i>Cold drawn</i>	630	91	530	77	12	35	179	55
		ACD	590	85	500	73	12	45	170	65

Baja karbon menengah mampu untuk dilakukan *heat treatment* dengan austenisasi, quenching yang kemudian diikuti dengan temper untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Baja karbon ini umumnya digunakan setelah melalui kondisi *temper*, yang memiliki struktur mikro berupa martensit temper. Baja karbon menengah ini memiliki kemampukerasan/*hardenability* yang rendah, karena itu untuk mendapatkan hasil *heat treatment* yang baik, maka benda atau komponen harus cukup tipis dan



diikuti dengan proses pendinginan cepat. Aplikasi baja ini banyak digunakan sebagai *gear*, *crankshaft*, *chain link*, dan komponen lainnya yang membutuhkan kombinasi antara kekuatan tinggi, ketangguhan dan ketahanan aus yang baik. (Pramudya, 2010)

Kekerasan pada baja AISI 1045 dapat ditingkatkan dengan metode *hardening*. Tetapi untuk memperoleh material yang lebih ulet dan tangguh maka dilakukan proses *tempering*. Kekerasan yang didapatkan setelah metode *tempering* pada baja AISI 1045 dapat dilihat melalui Gambar 2.5 dan Tabel 2.6.



Gambar 2. 5 Grafik hubungan temperatur *tempering* dengan kekerasan (ASM vol.4)

Tabel 2. 6 Kekerasan baja AISI 1045 setelah mengalami proses *hardening* dan *tempering* (ASM vol.4)

Grade	Carbon content, %	Hardness, HRC, after tempering for 2h at									Heat treatment
		205°C	260°C	315°C	370°C	425°C	480°C	540°C	595°C	650°C	
<i>Carbon steels, water hardening</i>											
1040	0.40	51	48	46	42	37	30	27	22	94	<i>water quench</i>

2.4 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Dalam besi cair karbon dapat larut, tetapi dalam keadaan padat kelarutan karbon dalam besi akan terbatas. Selain sebagai larutan padat, besi dan karbon juga dapat membentuk senyawa



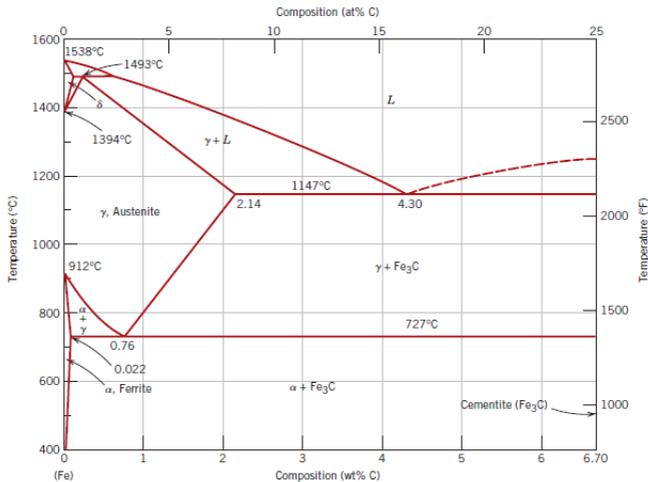
interstisial (interstitial compound), eutektik dan juga eutektoid, atau mungkin juga karbon akan terpisah (sebagai grafit). Karena itu diagram fasa besi-karbon ada 2 macam, diagram fasa besi – besi karbida dan diagram fasa besi – grafit. Diagram keseimbangan besi – besi karbida cukup kompleks, tetapi yang digunakan hanya sampai batas unsur karbon sebesar 6,67%C saja.

Pada keadaan yang ekuilibrium, karbon akan berupa karbon bebas (grafit), sehingga akan diperoleh diagram kesetimbangan besi - grafit. 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. Diagram fase besi – besi karbida dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Dari Gambar 2.6 tampak bahwa diagram fase ini memiliki tiga garis mendatar yang menandakan adanya reaksi yang berlangsung

secara *isothermal*, yaitu:

- Pada 1493°C, kadar karbon antara 0.10 – 0.50 %, berlangsung reaksi peritektik. $L + \delta \rightarrow \gamma$ (daerah ini tidak begitu penting untuk dunia teknik)
- Pada 1147°C, kadar karbon antara 2,0 – 6,67 %, berlangsung reaksi eutektik. $L \rightarrow \gamma + Fe_3C$
- Pada 727°C, kadar karbon antara 0.025 – 6.67 %, berlangsung reaksi *eutectoid*. $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$



Gambar 2. 6 Diagram fasa Fe-Fe₃C (Callister, 2010)

2.5 Heat Treatment

Perlakuan panas adalah kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat dengan waktu tertentu, dimaksudkan untuk memperoleh sifat tertentu (Callister, 2010). Secara umum *heat treatment* dibagi dalam tiga tahap, yaitu:

1. Pemanasan sampai suhu tertentu sesuai dengan proses *heat treatment* dan dengan kecepatan tertentu tergantung dari dimensi dan konduktifitas perpindahan panas benda kerja.
2. Mempertahankan suhu untuk waktu tertentu, sehingga temperturnya merata pada seluruh bagian benda kerja.
3. Pendinginan dengan media pendingin yang bergantung pada proses *heat treatment* 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. (Yani, 2008)

Proses perlakuan panas yang banyak dilakukan pada baja



karbon adalah proses pengerasan (*hardening*) dan dilanjutkan dengan penemperan, dimana hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan ketangguhan meskipun menurunkan kekerasannya (Pramudya, 2010).

2.5.1 *Hardening*

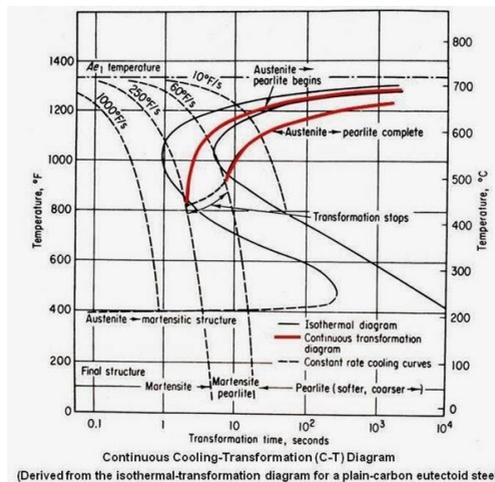
Hardening adalah proses pemanasan logam sampai temperatur di atas titik kritis (daerah austenit), ditahan sejenak sesuai dengan waktu tahan yang dibutuhkan agar seluruh benda kerja memiliki struktur austenit dan kemudian didinginkan cepat pada media pendingin. Tujuan proses ini adalah untuk mendapatkan struktur kristal martensit. Martensit adalah struktur yang harus dimiliki baja agar memperoleh kenaikan kekerasan yang sangat besar. Martensit berstruktur jarum karena jaringan atomnya berbentuk tetragonal. Kandungan karbon sangat penting terhadap kemampuan suatu baja untuk dikeraskan. Keuletan berkurang dengan meningkatnya kandungan karbon

Prosedur proses pengerasan pada baja hipoeutektoid dipanasi dari 30°C sampai 50°C di atas garis A_3 , pada baja ini struktur ferrit dan pearlit dirubah menjadi struktur austenit. Sedangkan baja hypereutektoid yang dipanasi hingga di atas titik A_1 maka struktur pearlit dan sementit juga berubah menjadi austenit. Walaupun tidak semua sementit berubah menjadi austenit, laju pendinginan yang sangat tinggi daripada kecepatan kritis akan dapat membuat austenit menjadi supercooled ke titik martensit. Baja yang dikeraskan ini dalam kondisi mengalami tegang dan sangat rapuh sekali, sehingga tidak dapat digunakan untuk pemakaian yang praktis. Untuk itu maka setelah baja mengalami pengerasan, maka baja ditemper untuk menurunkan sifat rapuh, melepaskan tegangan dalam yang terjadi saat pengerasan, dan untuk memperbaiki sifat mekanis baja tersebut. Tujuan utama proses *hardening* dan *tempering* pada baja karbon adalah untuk mendapatkan suatu kombinasi antara kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang tinggi (Abdunnaser, 2011).



Kekerasan dan kekuatan saling berhubungan. Perlu diketahui bahwa dasar pengujian kekerasan dan kekuatan tarik adalah sama yaitu sebagai indikator pembebanan agar tidak terjadi deformasi plastis. Oleh karena itu, kekerasan juga dapat dikonversikan menjadi kekuatan tarik. Material yang nilainya dapat dikonversi yaitu baja, besi tuang, dan kuningan. Cara untuk mengkonversi nilai tersebut dapat dilihat pada Persamaan 2.1 (Callister, 2000)

$$TS \text{ (MPa)} = 3.45 \times HB \quad (2.1)$$



Gambar 2.7 Diagram *continuous cooling transformation* untuk baja hipoeutektoid (Callister, 2010)

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 CCT 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).

2.5.2 Quench and Tempered

Quenching adalah proses pendinginan cepat suatu komponen logam dari temperatur austenitasi ke temperatur kamar, pada baja umumnya yang terbentuk adalah struktur martensit. *Quenching* dikatakan berhasil jika 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 efek dari pengerasan/pembentukan martensit. Media *quench* air walaupun mudah digunakan namun pada aplikasi baja karbon menengah dan tinggi sangat rentan terjadi retak dan melengkung/*warping*. Media *quench* yang paling banyak digunakan adalah oli dan lelehan garam karena sangat baik dalam mentransfer panas secara konveksi. Lelehan garam lebih banyak digunakan pada metode perlakuan panas seperti *austemper* dan *martempering*. 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 austenitasi, maka atom karbon yang seharusnya keluar dari larutan akan terperangkap dalam struktur baru, karena atom karbon sudah tidak lagi berdifusi, temperatur terlalu rendah, sehingga menyebabkan struktur baru itu terdistosi, tidak menjadi BCC tetapi

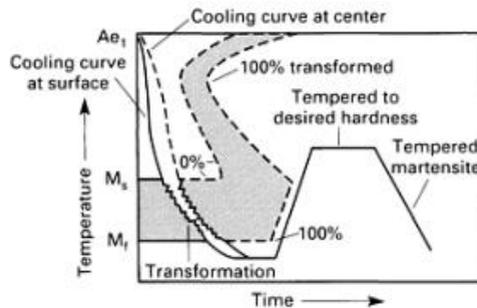


menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*), struktur ini disebut martensit (Pramudya, 2010).

Tempering merupakan perlakuan untuk menghilangkan tegangan dalam dan mencegah terjadinya *crack*. *Tempering* didefinisikan sebagai proses pemanasan logam setelah dikeraskan pada temperatur *tempering* (di bawah temperatur kritis), yang dilanjutkan dengan proses pendinginan. Baja yang telah dikeraskan bersifat rapuh dan tidak cocok untuk digunakan, melalui proses *tempering* kekerasan dan kerapuhan dapat diturunkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan. 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 makin rendah. Sebagai akibat penemperan bukan hanya penurunan kekerasan tetapi juga naiknya keuletan/ketangguhan, makin tinggi tempertatur 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).

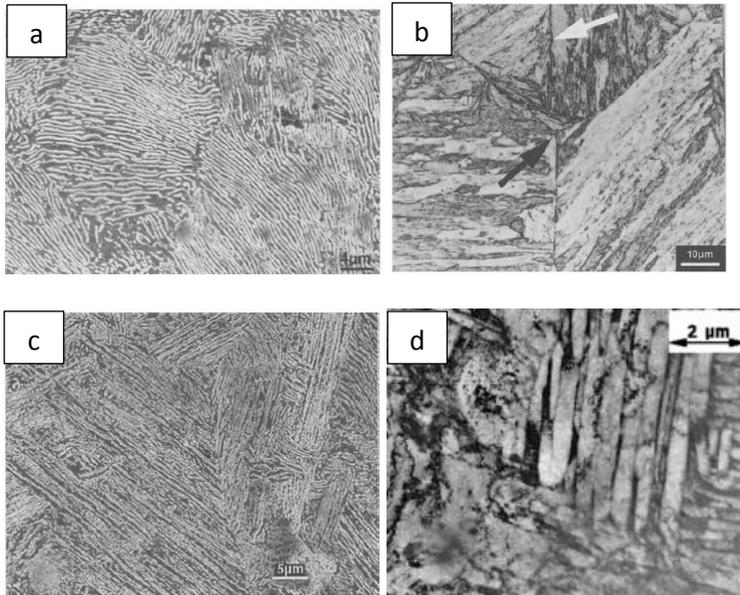
Setelah baja mengalami *quenching*, maka setelah itu baja ditemper dan dapat dianalisis dengan menggunakan diagram isothermal transformation (IT) yang telah di-superimpose seperti pada Gambar 2.8. Lamanya penemperan sesuai dengan kekuatan

bahan tersebut. Spesimen akan bersifat keras tetapi rapuh. Kerapuhan tersebut karena adanya tegangan sisa yang cukup besar sebagai distorsi saat transformasi. Beberapa hal yang menjadi tujuan penemperan antara lain adalah mengurangi tegangan sisa, meningkatkan kekerasan, meningkatkan keuletan, meningkatkan ketangguhan. Dengan melakukan *tempering* pada berbagai temperatur dan kekerasan yang terjadi ternyata bahwa kekerasan sesudah *tempering* tidak hanya dipengaruhi oleh temperatur, tetapi juga waktu *temper* (Abdunnaser, 2011).



Gambar 2. 8 Diagram IT yang telah di-super impose untuk perlakuan konvensional *quench dan temper* (ASM vol 4, 1991)

Pada gambar 2.8 proses tersebut merupakan proses pendinginan konvensional *quench dan temper*. Proses tersebut menggunakan metode *direct quenching* hingga temperatur kamar dan diikuti oleh proses *tempering*.



Gambar 2. 9 Struktur mikro (a) perlit dan ferrit, (b) lath martensit, (c) *lower* bainit, (d) *upper* bainit (Charre, 2004)

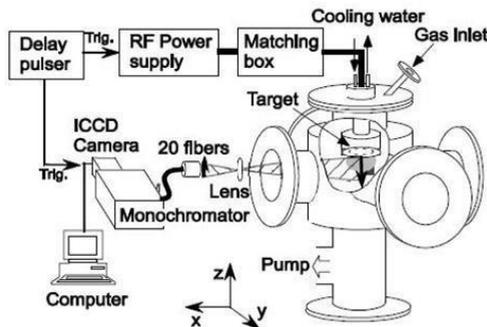
Gambar 2.9 menunjukkan struktur mikro pada baja sebelum dan sesudah mengalami proses *hardening* dan *tempering*. Gambar (a) menunjukkan struktur dari pearlite dan ferrite, dimana pearlite berbentuk lamel-lamel yang terdiri dari ferrite dan sementit. Gambar (b) menunjukkan struktur dari lath martensit, struktur ini terdapat pada baja karbon rendah. Gambar (c) merupakan struktur dari *lower* bainit. Gambar (d) merupakan struktur dari *upper* bainit.

2.6 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 2.10 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. 10 Skema ilustrasi uji OES (Nayan, 2009)



2.7 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*: Mencilupkan 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.

2.8 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 metode kekerasan, hal ini tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu:

- a. Kekerasan goresan (*scratch hardness*),
- b. Kekerasan lekukan (*indentation hardness*),
- c. 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*.

2.9 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. Rumus kekerasan terdapat pada persamaan 2.2. (Dieter, 1987).

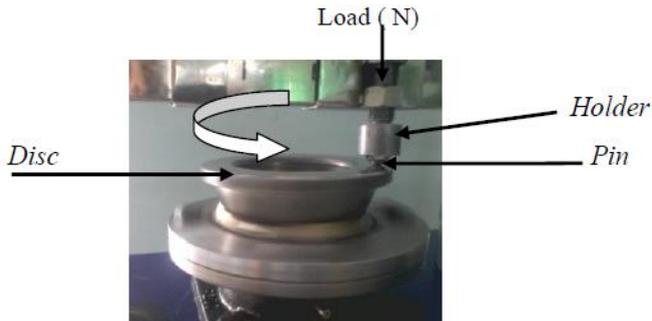
$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = \frac{1,845P}{L^2} \quad (2.2)$$

2.10 Uji Abrasif

Pengujian ini mengacu pada ASTM G99 mengenai metode pengujian standar untuk keausan dengan peralatan *pin on disk*. Pengujian ini mencakup prosedur laboratorium untuk menentukan



dan memperkirakan keausan material akibat gesekan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. 11 Skema uji abrasif (Ghufron, 2016)

Gambar 2.11 menunjukkan gambar skema dari pengujian ketahanan aus menggunakan sistem *pin-on-disc*. Ada beberapa sistem yang biasa digunakan untuk sistem *pin-on-disc*, antara lain sistem terdiri dari poros yang bergerak dan penjepit untuk menahan *disk* yang berputar, tuas untuk menahan pin dan alat tambahan untuk menempatkan beban yang diberikan pada pin.

Pengujian ini dapat diaplikasikan pada berbagai jenis material, salah satu ketentuan yang dibutuhkan adalah spesimen memiliki dimensi tertentu yang dapat di persiapkan 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 *disk* antara 30-100 mm, serta memiliki ketebalan dari 2-10 mm.

Dalam melakukan pengujian, ada beberapa prosedur yang harus dilakukan. Di antaranya yaitu pertama, mempersiapkan spesimen dan membersihkannya dari berbagai pengotor yang ada pada permukaan. Setelah itu, melakukan pengukuran dimensi dan menimbang berat. Selanjutnya memasukkan *disk* ke *holding device* dan *pin* ke *holder*. Lalu memberikan pembebanan yang sesuai



untuk *pin* terhadap *disk* dan menetapkan rpm yang dibutuhkan. Setelah persiapan selesai, maka pengujian dapat dilakukan.

Setelah melakukan pengujian dapat langsung dilakukan perhitungan. Pertama adalah dengan menghitung perubahan massa yang terjadi dengan cara menimbang massa awal dikurang dengan massa akhir, dan didapatkanlah Δm . Seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.2.

$$\Delta m = \text{massa awal (gram)} - \text{massa akhir (gram)} \quad (2.2)$$

2.11 Keausan

Secara umum keausan (*wear*) didefinisikan sebagai kerusakan pada permukaan padat yang disebabkan oleh hilangnya atau perpindahan material akibat gaya mekanik dari sebuah hubungan padat, cair, atau gas. Sampai saat ini belum ada kepastian definisi standar dari keausan, tetapi dapat diterima secara luas bahwa terdapat tiga jenis keausan yaitu keausan adhesi (*adhesive wear*), keausan abrasif (*abrasive wear*), dan keausan erosi (*erosive wear*). Selain itu terdapat beberapa jenis keausan lagi yang terpisah tidak tergabung ke dalam jenis utama yaitu kelelahan permukaan (*surface fatigue*), keadaan teriritasi (*fretting*), dan erosi kavitasi (*cavitation erosion*) (Hamzah, 2008). Keausan terjadi apabila dua buah benda yang saling menekan dan bergesekan. Keausan yang lebih besar terjadi pada bahan yang lunak. Faktor-faktor yang mempengaruhi keausan adalah kecepatan, tekanan, kekasaran permukaan, dan kekerasan bahan. Semakin besar kecepatan relatif benda yang bergesekan, maka material semakin mudah aus. Demikian juga semakin besar tekanan pada permukaan benda yang berkontak, material akan cepat aus. Keausan yang mengakibatkan berkurangnya material pada benda menyebabkan kerusakan pada benda tersebut. Untuk mengatasi adanya keausan biasanya diberikan pelumas. Secara prinsip, pelumasan berfungsi untuk mencegah keausan yang disebabkan oleh gesekan antar benda yang bergerak relatif. Kegunaan lainnya adalah untuk mengurangi gesekan, sebagai seal kompresi, mengurangi *noise*, sebagai media



pendingin komponen mesin, mengurangi karat, serta menjaga agar benda tetap bersih (Rif'an, 2017).

2.11.1 Jenis Keausan

1. Adhesive wear

Terjadi bila suatu partikel keras dari material tertentu meluncur pada permukaan material lain yang lebih lunak sehingga terjadi penetrasi atau pemotongan material yang lebih lunak.

2. Abrasive wear

Terjadi bila kontak permukaan dari dua material atau lebih mengakibatkan adanya perekatan satu sama lain dan pada akhirnya terjadi pelepasan/pengoyakan salah satu material.

3. Flow wear

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

4. Fatigue wear

Merupakan mekanisme yang relatif berbeda dibandingkan mekanisme yang lain, yaitu dalam hal interaksi permukaan. Baik keausan adesif maupun abrasif melibatkan hanya satu interaksi sementara pada keausan Lelah dibutuhkan interaksi yang banyak. (Setiyanto, 2009)

2.12 Penelitian Sebelumnya

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Samad Taghizadeh tentang membuat model prediksi kekerasan yang akan didapatkan menggunakan *Artificial Neural Network* (ANN). Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja AISI 1045. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kekerasan material setelah diberikan perlakuan *hardening* dan *tempering* secara langsung, dengan kekerasan material dengan permodelan



menggunakan ANN. Variasi temperatur *tempering* yang digunakan dalam penelitian ini antara lain 200°C, 350°C, dan 500°C. Sedangkan variasi waktu tahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain 10, 20, 40, 60, 80, dan 100 menit. Hasil dari penelitian ini, didapatkan kekerasan yang paling tinggi berada pada material dengan temperatur *tempering* sebesar 200°C dan dengan waktu tahan 10 menit, yaitu mencapai 52.5 HRC (Taghizadeh, 2013).

Indra Gamawan melakukan penelitian tentang pengaruh waktu tahan *tempering* terhadap kekuatan tarik dan kekerasan baja karbon menengah. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian kekerasan, dan uji kekuatan tarik. Bahan uji baja karbon menengah divariasikan dengan perlakuan *tempering* 30, 60, dan 90 menit. Dengan perlakuan panas 850°C kemudian di *quenching* di air. Bahan yang telah di *quenching* dipanaskan lagi pada suhu 400°C dengan variasi penahanan panas selama 30 menit, 60 menit dan 90 menit, kemudian didinginkan pada suhu ruangan. Didapat hasil penelitian kekuatan tarik baja karbon menengah yang paling tinggi sebesar 632,98 x 106 N/m², dan kekerasan baja karbon menengah yang paling tinggi sebesar 551,75 HV. Kesimpulan yang didapatkan adalah proses *quenching* meningkatkan besarnya kekuatan tarik dan kekerasan baja karbon menengah. Sedangkan proses *tempering* menurunkan besarnya kekuatan tarik dan kekerasan baja karbon menengah, dan variasi waktu penahanan panas pada proses *tempering* juga mempengaruhi besarnya penurunan kekuatan tarik dan kekerasan baja tersebut (Gunawan, 2015)

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Yopi Handoyo tentang pengaruh *quenching dan tempering* pada baja jis grade s45c terhadap sifat mekanis dan struktur mikro *crankshaft*. Penelitian ini dilakukan pemanasan sampai temperatur 880°C kemudian di tahan selama 50 menit. Setelah itu dilakukan *quenching* pada media oli dan air. Kemudian dilanjutkan dengan proses *tempering* dengan temperatur pemanasan sampai 560°C selama 40 menit. Hasil yang didapatkan adalah spesimen dengan



perlakuan *quenching* dengan media pendingin oli menghasilkan kekerasan sebesar 35,3 HRC dan dengan struktur mikro bainit dan martensit. Spesimen dengan perlakuan *quenching* dengan media pendingin air menghasilkan kekerasan sebesar 43,5 HRC dan dengan struktur mikro bainit dan martensit, kemudian di *tempering* menghasilkan kekerasan sebesar 27,8 HRC dengan struktur mikro bainit dan martensit (Handoyo, 2015).

Purnomo melakukan penelitian tentang pengaruh perlakuan tempering terhadap kekerasan dan kekuatan impact baja JIS G 4051 S15C sebagai bahan konstruksi. Pada penelitian ini baja JIS G 4051 S15C diberikan perlakuan *hardening* pada temperatur 900°C dengan *holding time* 30 menit. Kemudian dilakukan pendinginan dengan tiga media pendingin yaitu oli, air, dan udara. Setelah itu diberikan perlakuan *tempering* pada temperatur 500°C dengan *holding time* 30 menit. Hasil yang didapatkan dari proses *hardening* adalah meningkatnya kekerasan dengan struktur mikro martensit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. Hasil dari penelitian ini adalah ketangguhan maksimum didapatkan pada pendinginan udara bebas dengan energi impact sebesar 36 J.

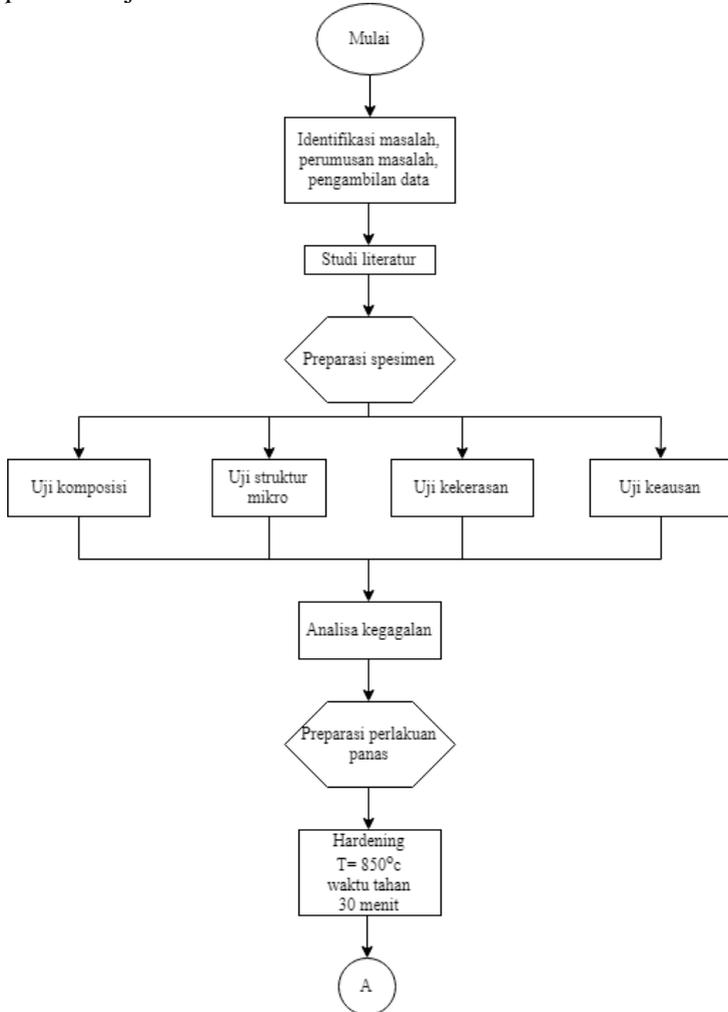


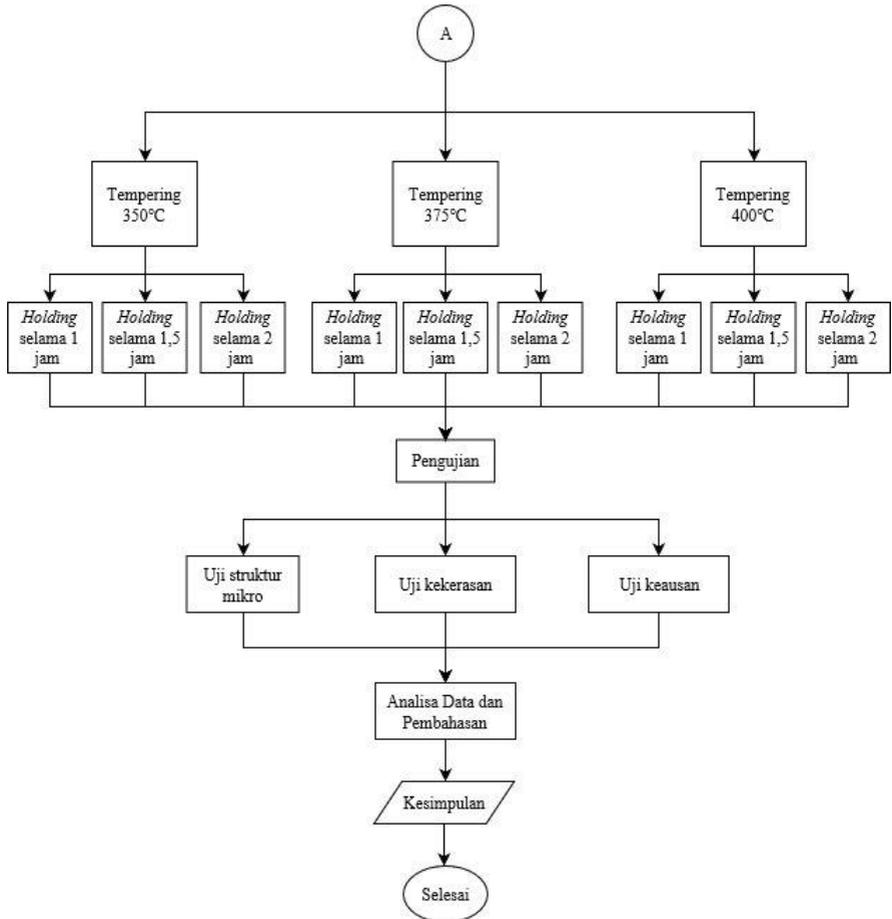
Gambar 2.12 Struktur mikro baja karbon rendah perlakuan hardening perbesaran 500x (Purnomo, 2010)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan beberapa pengujian seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.1 dibawah ini



**Gambar 3. 1** Diagram alir penelitian



3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, pengujian dan studi literatur. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan

Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang telah diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponennya dengan cara datang langsung ke PT. PAL INDONESIA (Persero), kemudian berdiskusi dengan dosen mata kuliah yang bersangkutan, dosen pembimbing, dan pihak PT.PAL Indonesia yang ahli dibidangnya.

2. Studi Literatur

Metode studi literatur mengacu pada buku, jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari tentang *axle shaft*.

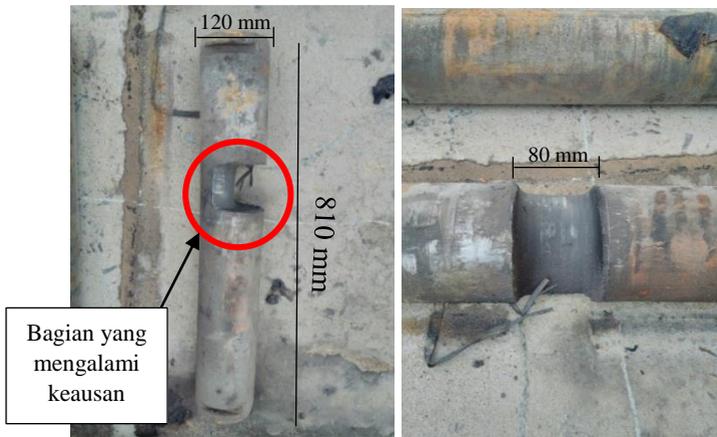
3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam eksperimen ini yaitu: uji komposisi dengan menggunakan spectrometer, uji kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material *axle shaft*, pengamatan mikrostruktur material dengan menggunakan mikroskop optik dan uji keausan.

3.3 Material yang digunakan

3.3.1. Material

Pada tanggal 3 Januari 2018 ditemukan *axle shaft* yang mengalami keausan seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Komponen *axle shaft* yang mengalami aus

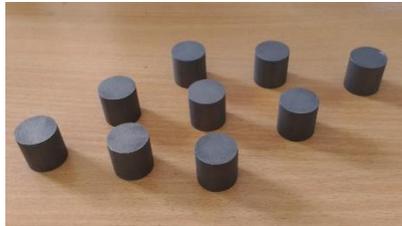
Tabel 3. 1 Tabel komposisi kimia baja AISI 1045

%C	%Mn	%P max	%S max
0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050

Tabel 3.1 menunjukkan komposisi kimia dari baja AISI 1045 berdasarkan ASTM A29.

3.2.2. Spesimen

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu potongan pada komponen *axle shaft* yang mengalami aus, satu spesimen digunakan untuk pengujian kekerasan jauh dari daerah yang mengalami aus, spesimen digunakan untuk pengujian kekerasan dari daerah yang dekat dengan daerah yang mengalami aus dan 9 spesimen digunakan untuk proses perlakuan panas yang ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3. 3 Spesimen uji perlakuan panas

3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Mesin *Wire Cut*

Digunakan untuk memotong spesimen. Ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 CNC Wire Cutting EDM

2. Kamera

Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara makro.

3. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)



Digunakan untuk mengetahui komposisi material.
Ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 ARL™ 3460 Optical Emission Spectrometer

4. Uji Kekerasan

Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Universal Hardness Tester HBRV 187.5A

5. Amplas SiC grade 80 hingga 2000

Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi

6. Mesin Polish

Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi

7. Larutan Etsa 74a

Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi terdiri dari 1-5 mL HNO₃ + 100 mL ethanol (95%) atau methanol (95%).

8. Mikroskop Optik

Digunakan untuk mendapatkan informasi struktur mikro/fasa yang terdapat pada material uji. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Olympus BX51 Optical Microscope

9. Mesin Uji Abrasif

Digunakan untuk mendapatkan informasi laju keausan yang terdapat pada material uji. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Data Operasional Lapangan

Review dokumen dari perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data yang mendukung penelitian. Data yang diambil antara lain:

1. Desain *axle shaft*
2. Data operasi
3. Spesifikasi material



3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap Persiapan ini diperlukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan/keausan *axle shaft* pada PT. PAL Indonesia. Persiapan ini berupa proses *cutting*.

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 adalah untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan. Identifikasi komposisi kimia material menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy (OES)* di PT. Logamindo Sarimulia untuk mengetahui komposisi yang ada pada material *axle shaft*.

3.5.5 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada material. Metode yang digunakan adalah *Vickers* dimana dalam pengujiannya menggunakan indenter intan serta pembebanan 100 kgf dengan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Seperti pada Gambar 3.6.



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 diberikan beban seberat 1 kg diletakkan pada piringan *disc* yang berputar. Pengujian ini mengacu pada ASTM G99 dengan metode *pin on disc*. Pengujian ini menggunakan alat yang ada di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.

3.5.7 Perlakuan Panas

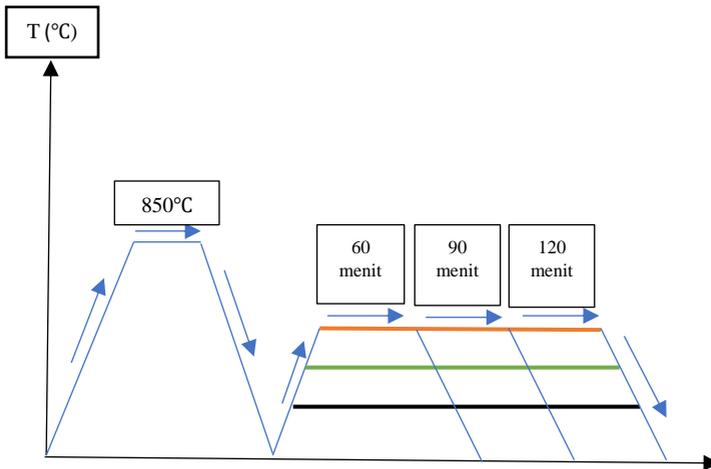
Perlakuan panas yang akan dilakukan pada material *axle shaft* adalah dengan proses *hardening* dan *tempering*. Proses *hardening* dilakukan dengan temperatur 850°C dan waktu tahan selama 30 menit. Setelah melakukan *hardening*, kemudian spesimen diberikan perlakuan *tempering* yang berbeda. Variabel yang digunakan adalah waktu tahan selama 60, 90, dan 120 menit. Kemudian masing-masing waktu tahan yang berbeda akan diberikan variabel temperatur yang berbeda yaitu 350°C, 375°C, dan 400°C. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8.

Tabel 3. 2 Nama Spesimen Uji

Kode Spesimen	Jenis Perlakuan
AQ	<i>Hardening</i> pada temperatur 850°C dengan waktu tahan 30 menit + <i>quench</i> dengan air
HT350t60	<i>Tempering</i> pada temperatur 350°C dengan waktu tahan 60 menit
HT350t90	<i>Tempering</i> pada temperatur 350°C dengan waktu tahan 90 menit
HT350t120	<i>Tempering</i> pada temperatur 350°C dengan waktu tahan 120 menit



HT375t60	<i>Tempering</i> pada temperatur 375°C dengan waktu tahan 60 menit
HT375t90	<i>Tempering</i> pada temperatur 375°C dengan waktu tahan 90 menit
HT375t120	<i>Tempering</i> pada temperatur 375°C dengan waktu tahan 120 menit
HT400t60	<i>Tempering</i> pada temperatur 400°C dengan waktu tahan 60 menit
HT400t90	<i>Tempering</i> pada temperatur 400°C dengan waktu tahan 90 menit
HT400t120	<i>Tempering</i> pada temperatur 400°C dengan waktu tahan 120 menit



Gambar 3. 8 Kurva perlakuan panas spesimen



3.6 Rancangan Penelitian

Jenis perlakuan yang akan dilakukan selama penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Rancangan Penelitian

Material	Temperatur (°C)	Waktu Tahan (menit)	Uji Komposisi	Uji Metalografi	Uji Kekerasan	Uji Keausan
N	-	-	V	V	V	V
AQ	850	30	-	V	V	V
HT350t60	350	60	-	V	V	V
HT350t90	350	90	-	V	V	V
HT350t120	350	120	-	V	V	V
HT375t60	375	60	-	V	V	V
HT375t90	375	90	-	V	V	V
HT375t120	375	120	-	V	V	V
HT400t60	400	60	-	V	V	V
HT400t90	400	90	-	V	V	V
HT400t120	400	120	-	V	V	V

3.7 Timeline Penelitian

Rancangan waktu penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Timeline Penelitian

No	Kegiatan	Januari	Februari	Maret	April	Mei
1.	Pengambilan data					
2.	Preparasi spesimen					



3.	Pengujian spesimen (Uji komposisi, uji kekerasan, pengamatan makroskopik, pengamatan struktur mikro)					
4.	Preparasi perlakuan panas					
5	Perlakuan panas					
6	Pengujian spesimen (Pengamatan struktur mikro, uji kekerasan, dan uji keausan)					

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 Analisis Data Operasional Material

Pada *maintenance* yang dilakukan oleh PT. PAL INDOENSIA (Persero) yang dilakukan pada Desember 2017, ditemukan bahwa *axle shaft* pada salah satu *level luffing crane* mengalami keausan (*wear*) yang tidak sesuai dengan umur desainnya. Hal ini ditunjukkan dengan adanya perubahan dimensi dari *axle shaft* yang cukup signifikan. Menurut *engineer* dan operator dari PT PAL INDONESIA (Persero), umur pakai dari komponen *axle shaft* ini selama 2-3 tahun. Namun realitanya setelah 3 bulan pemakaian, komponen telah mengalami kerusakan.

Data operasional dari *axle shaft* mencakup penggunaan dan kondisi lingkungan kerja yang ditunjukkan pada Tabel 2.2. Terdapat pula gambar teknik yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Berdasarkan data operasional yang didapat, maka analisis tegangan pada komponen dapat dilakukan. Perhitungan analisis tegangan menggunakan metode pada buku Machine Design (Deutschman, 1975). Didapatkan hasil yaitu salah satu penyebab dari kegagalan adalah tegangan yang terjadi memiliki nilai yang lebih besar dibanding dengan nilai *yield strength* dari komponen *axle shaft*. Nilai tegangan yang terjadi sebesar 2022,24 MPa, sedangkan *yield strength* dari komponen *axle shaft* sebesar 450 MPa.

4.1.2 Hasil Pengujian Kekerasan Axle Shaft

Pengujian dilakukan pada 5 titik yang hasilnya dapat dilihat seperti Gambar 4.1.

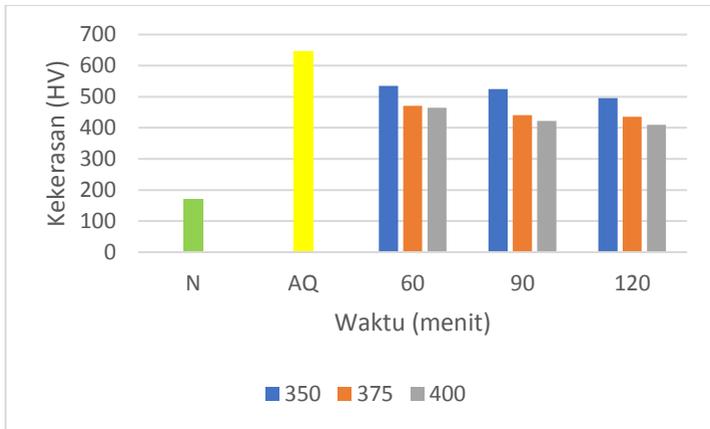


Gambar 4. 1 Indentasi pengujian kekerasan

Hasil pengujian kekerasan dapat dilihat pada Tabel 4.1 serta grafik distribusi kekerasan ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Tabel 4. 1 Nilai rata-rata pengujian kekerasan

Kode Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu Tahan (menit)	Kekerasan (HV)
N	-	-	170,6 ± 4,39
AQ	850	30	644 ± 36,5
HT350t60	350	60	534,6 ± 9,8
HT350t90	350	90	525 ± 12,2
HT350t120	350	120	495,4 ± 14,2
HT375t60	375	60	470,6 ± 24,2
HT375t90	375	90	441 ± 11,9
HT375t120	375	120	435,2 ± 18,2
HT400t60	400	60	464,6 ± 8,5
HT400t90	400	90	422,4 ± 0,5
HT400t120	400	120	409,4 ± 5,4



Gambar 4. 2 Grafik distribusi hasil uji kekerasan dengan variasi temperatur *tempering* dan waktu tahan

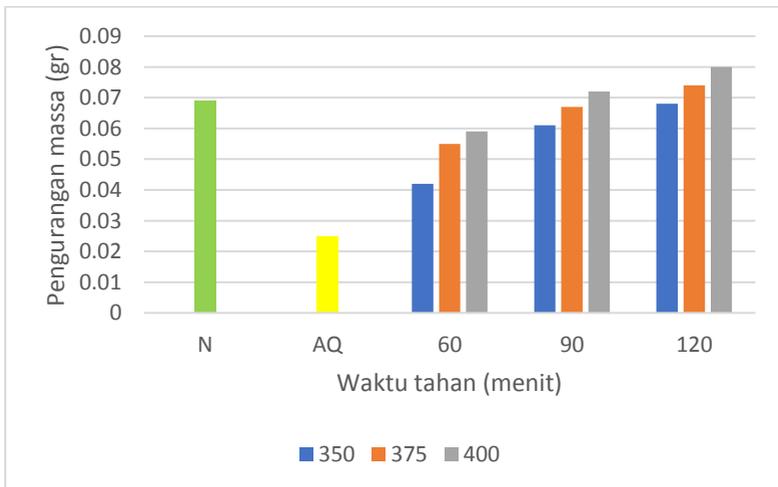
Dari Tabel 4.1 dan Grafik 4.2 dapat dilihat bahwa spesimen dengan temperatur *tempering* paling rendah yaitu 350°C dan dengan waktu tahan yang paling cepat yaitu 60 menit, menghasilkan kekerasan yang paling tinggi yaitu 534,6 HV. Sedangkan spesimen dengan temperatur *tempering* paling tinggi yaitu 400°C dan dengan waktu tahan yang paling lama yaitu 120 menit, menghasilkan kekerasan yang paling rendah yaitu 409,4 HV.

4.1.3 Hasil Pengujian Ketahanan Aus *Axle shaft*

Pengujian ketahanan aus dilakukan pada spesimen as cast dan semua spesimen dengan variasi temperatur *tempering* dan waktu tahan. Data yang diperoleh dari pengujian keausan ini berupa selisih massa sebelum dan sesudah pengujian. Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.2 serta grafik distribusi pengurangan massa ditunjukkan pada Gambar 4.3.

**Tabel 4. 2** Nilai rata-rata pengurangan massa

Kode Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu Tahan (menit)	Pengurangan Massa (gr)
N	-	-	0,069 ± 0,005
AQ	850	30	0,025 ± 0,009
HT350t60	350	60	0,042 ± 0,013
HT350t90	350	90	0,061 ± 0,006
HT350t120	350	120	0,068 ± 0,022
HT375t60	375	60	0,055 ± 0,016
HT375t90	375	90	0,067 ± 0,005
HT375t120	375	120	0,074 ± 0,026
HT400t60	400	60	0,059 ± 0,013
HT400t90	400	90	0,072 ± 0,009
HT400t120	400	120	0,080 ± 0,015

**Gambar 4. 3** Grafik distribusi hasil uji keausan dengan variasi temperatur *tempering* dan waktu tahan



Dari Tabel 4.2 dan Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa spesimen dengan temperatur *tempering* paling rendah yaitu 350°C dan dengan waktu tahan yang paling lambat yaitu 120 menit, menghasilkan pengurangan massa yang paling rendah yaitu 0,042 gr. Sedangkan spesimen dengan temperatur *tempering* 375°C dengan waktu tahan yang paling lambat yaitu 120 menit, menghasilkan pengurangan massa yang paling tinggi yaitu 0,080 gr.

4.1.4 Hasil Pengujian Makroskopik Axle Shaft

Berdasarkan pengamatan visual yang dilakukan pada komponen *axle shaft* yang mengalami keausan, dapat dilihat pada Gambar 3.2 terjadi keausan pada *axle shaft* yang ditandai dengan adanya perubahan dimensi pada diameter yang seharusnya berukuran 120 mm, berkurang hampir separuhnya menjadi 70 mm.

4.1.5 Hasil Uji Komposisi Kimia Axle Shaft

Pengujian komposisi kimia pada komponen *axle shaft* menggunakan alat OES (*Optical Emission Spectroscopy*). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada komponen *axle shaft*. Hasil pengujian komposisi kimia ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil pengujian komposisi material axle shaft

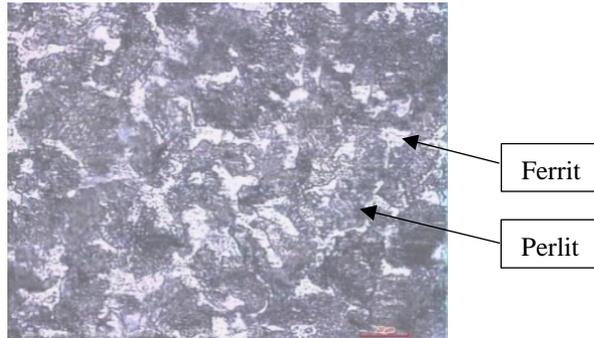
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,435	0,270	0,710	0,0180	0,0243	0,147	0,0219	0,672

4.1.6 Hasil Pengujian Metalografi Axle Shaft

Pengujian metalografi dilakukan pada material *axle shaft* yang mengalami keausan bertujuan untuk mengetahui struktur awal dari material sebelum diberikan perlakuan panas. Pengamatan dilakukan dengan mikroskop optik dengan perbesaran 500x. Struktur mikro material *axle shaft* sebelum diberikan perlakuan

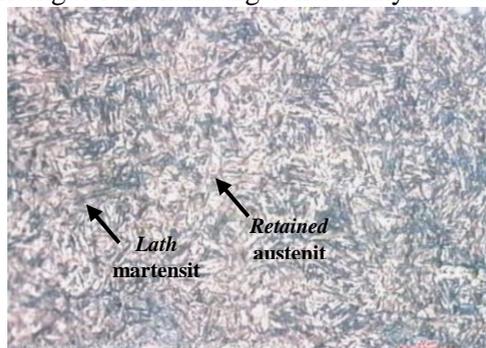


panas seperti pada Gambar 4.4, akan dibandingkan dengan setelah diberikan perlakuan panas.

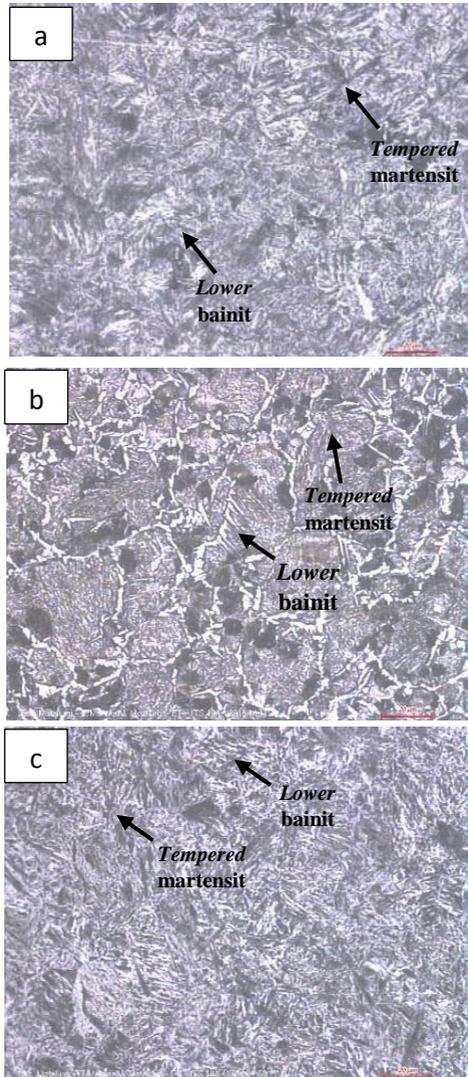


Gambar 4. 4 Struktur mikro pada axle shaft sebelum perlakuan panas. Perbesaran 500x.

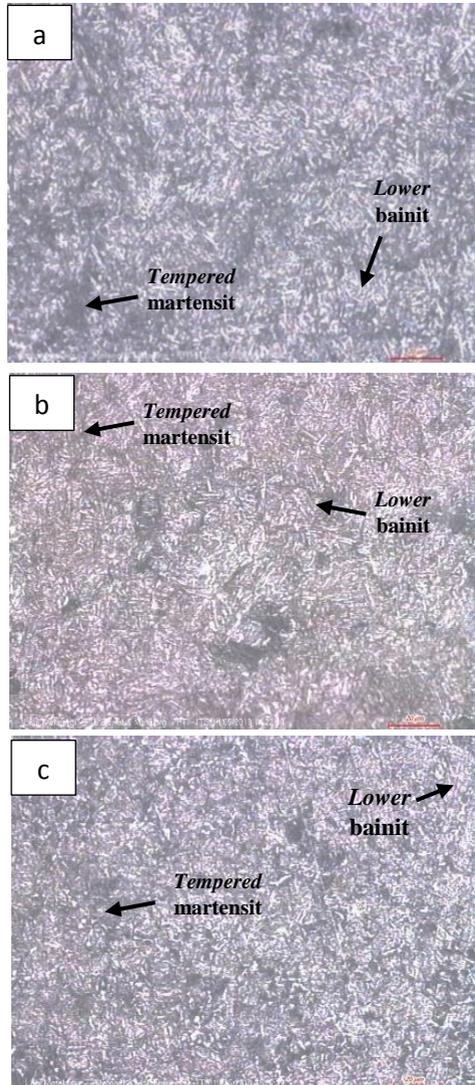
Pada pengujian struktur mikro dari material *axle shaft* sebelum diberikan perlakuan panas, didapatkan fasa yang terbentuk adalah ferrit dan perlit. Fasa ferrit dapat ditunjukkan dengan daerah putih. Fasa perlit dapat ditunjukkan dengan daerah gelap yang memiliki luas permukaan yang hampir sebanding dengan fasa ferrit. Fasa perlit memiliki luas permukaan yang hampir sebanding karena kandungan karbonnya sebanyak 0,45%.



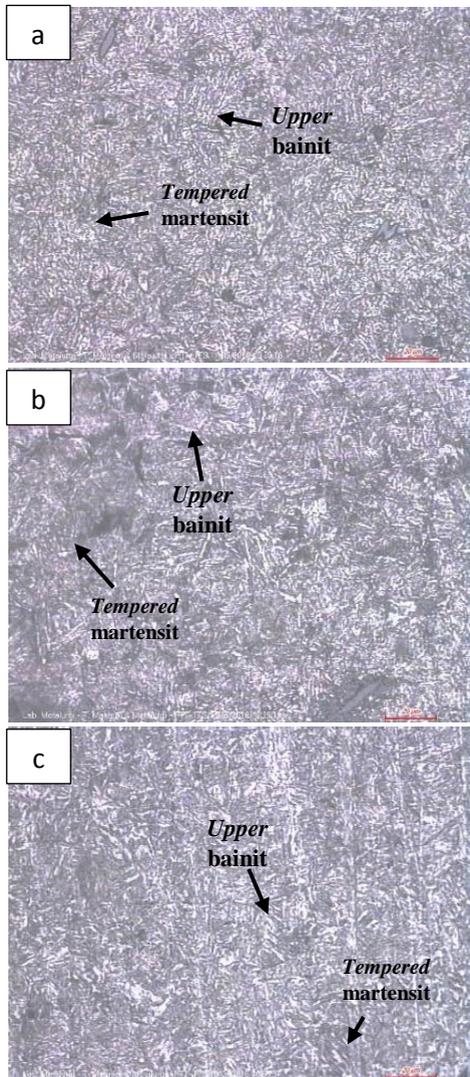
Gambar 4. 5 Struktur mikro setelah perlakuan hardening 850°C selama 30 menit. Perbesaran 500x.



Gambar 4. 6 Struktur mikro setelah perlakuan tempering pada temperatur 350°C selama (a) 60, (b) 90, (c) 120. Perbesaran 500x.



Gambar 4. 7 Struktur mikro setelah perlakuan *tempering* pada temperatur 375°C selama (a) 60, (b) 90, (c) 120 menit. Perbesaran 500x.



Gambar 4. 8 Struktur mikro setelah perlakuan *tempering* pada temperatur 400°C selama (a) 60, (b) 90, (c) 120 menit. Perbesaran 500x.



Pada Gambar 4.5 dapat dilihat struktur martensit berupa *lath* martensit, pada daerah yang berwarna gelap dan berbentuk seperti jarum-jarum panjang. Kemudian dapat dilihat *retained austenite* pada daerah yang berwarna abu-abu terang. Pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 dapat dilihat struktur *lower bainit*, pada daerah seperti platelet sementit dengan arah yang tidak sejajar dengan sumbu pertumbuhannya. Pada Gambar 4.8 dapat dilihat struktur *upper bainit*, pada daerah seperti platelet sementit dengan arah hampir sejajar dengan sumbu pertumbuhannya.

Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Purnomo (2010), menunjukkan struktur mikro yang terbentuk setelah melakukan *hardening* pada baja karbon menengah adalah martensit yang tersebar merata, seperti pada Gambar 2.12.

Untuk menghitung volume bainit yang terdapat pada hasil mikrostruktur yang telah didapatkan, digunakan *grid method* yang sesuai dengan ASTM E562. Hasilnya terdapat pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4. 4 Hasil perhitungan volume bainit (ASTM E562)

Spesimen	Volume bainit (%)
HT350t60	9,64 ± 1,36
HT350t90	11,02 ± 1,97
HT350t120	12,49 ± 1,36
HT375t60	13,12 ± 3,63
HT375t90	17,49 ± 2,94
HT375t120	19,99 ± 5,08
HT400t60	25,35 ± 4,71
HT400t90	23,56 ± 3,59
HT400t120	26,78 ± 3,57



4.2 Pembahasan

Komponen *axle shaft* yang berada di PT PAL INDOENSIA (Persero) seharusnya dapat digunakan selama 2-3 tahun. Tetapi pada kasus kali ini, komponen *axle shaft* mengalami kegagalan pada bulan ke-3 pemakaian. Kegagalan ini berupa pengurangan dimensi yang seharusnya berukuran 120 mm, berkurang hampir separuhnya menjadi 70 mm. Jika dilihat dari kondisinya, komponen *axle shaft* mengalami keausan, seperti yang dapat dilihat di Gambar 3.2.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa faktor yang menyebabkan komponen *axle shaft* mengalami kegagalan. Pada komponen *axle shaft* terdapat dua buah *gear* yang menempel. *Gear* tersebut bertujuan untuk menggerakkan *gear* lainnya yang kemudian dapat menggerakkan roda *crane*. Berdasarkan data operasional yang didapat, maka analisis tegangan pada komponen dapat dilakukan. Pada awalnya hitung massa dari *axle shaft* dan *gear*. Setelah itu hitung gaya berat vertikal dan horizontal dan didapatkan nilai terbesar berada pada *gear c*. Setelah itu hitung resultan momen terbesar vertikal dan horizontal. Terakhir adalah menghitung tegangan yang terjadi pada *axle shaft*. Nilai tegangan yang terjadi sebesar 2022,24 MPa. Nilai ini melebihi *yield strength* dari komponen *axle shaft* yaitu 450 MPa. Hal ini menyebabkan komponen mengalami kegagalan. Perhitungan secara lengkap ada pada lampiran 5.

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen HT350t60 dengan nilai yang didapatkan adalah 534,6 HV. Pada temperatur 350°C kekerasan yang didapatkan menurun cukup signifikan, hal ini disebabkan struktur martensit yang berubah ketika dipanaskan kembali menjadi *tempered martensit*, sehingga membuat tegangan di dalam struktur BCT berkurang sehingga kekerasan mulai menurun dan keuletan mulai naik. Karbida epsilon mulai berubah menjadi sementit dan terdapat sedikit ferrit. Pada temperatur 350°C dengan



waktu tahan 60 menit seluruh martensit sudah berubah secara keseluruhan menjadi *tempered* martensit. Pada temperatur 350°C dengan waktu tahan 90 dan 120 menit struktur yang didapatkan adalah *tempered* martensit, *lower* bainit, dan ferrit. Pada temperatur di bawah 550°C austenit sudah berada jauh di bawah temperatur stabilnya, ia akan mengalami *driving force* yang besar untuk berubah dari FCC menjadi BCC. Karena *driving force* itu atom-atomnya bergeser untuk menjadi BCC, terbentuk ferrit. Karena tadinya disitu terdapat banyak karbon sedangkan ferrit tidak mampu melarutkan karbon maka karbon berdifusi keluar, sehingga akhirnya akan diperoleh struktur berupa bilah-bilah ferrit yang didalamnya terdapat platelet sementit dengan arah yang tidak sejajar dengan sumbu pertumbuhannya, dinamakan *lower* bainit. Yang membedakan dari hasil ketiga variasi ini adalah volume dari *lower* bainit yang terbentuk.

Pada waktu tahan 60 menit mempunyai volume bainit sebanyak 9,64%, sedangkan pada waktu tahan 90 dan 120 menit adalah 11,02% dan 12,49%. Semakin lama waktu tahan maka bainit yang terbentuk semakin banyak. Hal ini dikarenakan dengan penambahan waktu tahan maka austenit sisa mempunyai waktu lebih untuk bertransformasi menjadi bainit. Peningkatan temperatur dan waktu tahan *tempering* membuat kekerasan dan kekuatan semakin menurun, namun telah meningkatkan keuletan dan ketangguhan.

Pada temperatur 375°C dengan waktu tahan 60 menit, 90 menit, dan 120 menit, secara berturut-turut kekerasan yang didapatkan adalah 470,6 HV, 441 HV, dan 435,2 HV. Nilai kekerasan ini menurun jika dibandingkan dengan temperatur sebelumnya. Sebenarnya struktur mikro yang terbentuk hampir sama pada temperatur sebelumnya, tetapi struktur martensit yang sudah berubah semua menjadi *tempered* martensit. *Lower* bainit yang terbentuk juga semakin banyak, ditandai dengan volumenya yang semakin bertambah menjadi 13,12%, 17,49%, dan 19,99%.



Dengan begitu keuletan yang didapatkan pada spesimen ini akan memiliki keuletan dan ketangguhan lebih tinggi dibanding spesimen sebelumnya.

Kekerasan yang paling rendah didapatkan pada spesimen dengan temperatur *tempering* 400°C. Pada waktu tahan 60 menit, 90 menit, dan 120 menit kekerasan yang didapatkan adalah 464,2 HV, 422,4 HV, 409,4 HV. Kekerasan yang didapatkan berkurang sangat banyak tetapi terjadi kenaikan keuletan. Hal ini disebabkan martensit yang dibentuk sudah tidak tajam dan tidak kontinu dan austenit sisa bertransformasi menjadi *upper* bainit. Ditandai dengan penambahan jumlah volume dari bainit yang semakin bertambah yaitu 25,35%, 23,56%, dan 26,78%.

Demikian juga dengan penelitian yang dilakukan oleh Anggono (2006), bahwa struktur mikro yang didapatkan setelah *tempering* pada temperatur 400 adalah *tempered* martensit, dan bainit. Sebenarnya *upper* dan *lower* bainit terdiri dari ferrit dan sementit, tetapi tidak sama dengan susunan lamellar seperti pada perlit. Bainit terdiri dari jarum-jarum ferrit dengan platelet sementit tersebar di dalamnya, pada bainit atas platelet ini sejajar dengan arah memanjang dari jarum ferrit, sedangkan pada bainit bawah membentuk sudut kira-kira 60° terhadap sumbu jarum ferrit. Pada mikroskop, *upper* bainit terlihat seperti bulu ayam, karena itu dinamakan juga *feathery* bainit. Sedangkan *lower* bainit tampak seperti jarum-jarum (*acicular*) berwarna kehitaman. Ferrit bersifat lunak dan ulet, sehingga meskipun austenit sisa sudah bertransformasi menjadi bainit dan mulai terjadi pembentukan perlit dan sementit, tetapi ferrit lebih dominan sehingga kekerasan pada spesimen dapat menurun.

Pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.8 menunjukkan hasil dari uji ketahanan aus. Bentuk pengujian yang dipakai merupakan pin on *disk*, dengan cara menaruh spesimen di atas *disk* yang diberi kertas amplas grade 240 dengan jarak 5 cm dari pusat *disk*. Kemudian spesimen diberi beban seberat 1 kg. Pengujian dilakukan dengan



cara menghitung pengurangan massa yang terjadi pada spesimen, dan tiap spesimen memiliki hasil yang berbeda. Nilai pengurangan massa yang paling rendah berada pada spesimen HT350t60 dengan hanya berkurang 0,042 kg. Hal ini dikarenakan spesimen tersebut memiliki kekerasan yang paling tinggi yaitu 534,6 HV. Kekerasan yang tinggi membuat material memiliki sifat tahan aus yang tinggi. Hal ini pun dikarenakan struktur mikro dari material tersebut adalah *tempered* martensit dengan hanya sedikit terdapat ferrit dan sementit.

Kemudian ketika temperatur ditingkatkan pada 375°C, pengurangan massa yang terjadi semakin naik karena kekerasan yang dimiliki oleh spesimen semakin menurun. Sedangkan nilai pengurangan massa yang paling tinggi berada pada spesimen HT400t120 dengan pengurangan massa sebanyak 0,080 kg. Hal ini disebabkan karena spesimen tersebut memiliki nilai kekerasan yang paling rendah juga yaitu 409,4 HV. Hal ini dikarenakan martensit seluruhnya sudah bertransformasi. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa ferrit yang cukup banyak membuat kekerasan dan sifat tahan aus menurun karena sifat ferrit yang lunak dan ulet. Hal ini sesuai dengan teori yang ada yaitu ketahanan aus berkaitan erat dengan kekerasan. Semakin tinggi nilai kekerasan suatu material, maka semakin tinggi sifat tahan aus material tersebut. Karena makin sulit media penggores untuk melakukan penetrasi dan menggores material tersebut. Juga sebaliknya, semakin rendah kekerasan suatu material, maka semakin rendah sifat tahan ausnya.

Menurut standar ASSAB 705 kekerasan yang dibutuhkan sebesar 310-370 HV sedangkan komponen *axle shaft* yang mengalami kegagalan hanya memiliki nilai kekerasan sebesar 169 HV. Oleh karena itu perlu dilakukan peningkatan kekerasan dengan cara memberikan perlakuan panas. Sebenarnya material 1045 bisa digunakan juga sebagai material *axle shaft*, tetapi dalam kasus ini terdapat satu kendala, yaitu komponen lain yang kontak



langsung dengan *axle shaft* adalah komponen *gear*. Komponen *gear* menggunakan material baja AISI 4340 dengan kekerasan 400-700 HV (PT PAL INDONESIA, 2017). Hal ini menyebabkan komponen *axle shaft* terdeformasi akibat bergesekan dengan komponen *gear* yang memiliki kekerasan lebih tinggi.

Dari hasil pengujian struktur mikro yang dilakukan pada komponen yang mengalami kegagalan, dapat dilihat fasa α ferrit dan perlit. Fasa ferrit dan perlit dapat terlihat karena adanya beda potensial. Sehingga menyebabkan terjadinya korosi ketika di etsa pada fasa yang memiliki potensial lebih rendah yaitu perlit. Hal ini menyebabkan permukaan tidak rata, sehingga tidak dapat memantulkan cahaya yang diberikan oleh mikroskop yang menyebabkan perlit terlihat lebih gelap.

Proses *hardening* dilakukan pada temperatur 850°C dengan waktu tahan selama 30 menit. Temperatur ini digunakan karena untuk dapat memperoleh fasa austenit. Temperatur austenisasi dapat dicapai dengan pemanasan 30-50°C di atas temperatur kritis A_3 . Jika temperatur lebih tinggi lagi maka diperoleh butir austenit terlalu kasar, sehingga jika di-*quench* struktur menjadi terlalu getas, dan juga tegangan yang terlalu besar dapat menimbulkan distorsi bahkan juga retak. Kemudian digunakan waktu tahan selama 30 menit karena laju pemanasan dalam dapur yang cukup lama sehingga waktu tahan yang digunakan tidak terlalu lama agar seluruh perlit bertransformasi menjadi austenit. Selanjutnya material di-*quench* pada media pendingin air, karena air mempunyai kapasitas pendinginan yang tinggi sehingga struktur martensit akan didapat.

Setelah dilakukan proses *hardening*, kemudian dilanjutkan dengan pengamatan struktur mikro dan uji kekerasan. Struktur mikro yang didapatkan adalah *lath* martensit dan austenit sisa. Demikian juga dengan penelitian yang dilakukan oleh Bhosale (2016), yang menyebutkan bahwa hasil dari proses *hardening* pada temperatur 850°C adalah martensit dan austenit sisa. *Lath* martensit



terbentuk pada proses *hardening* untuk baja dengan kadar karbon di bawah 0,6%. Nilai kekerasan yang didapatkan adalah sebesar 644 HV. Tingginya nilai kekerasan karena struktur mikro yang didapatkan adalah martensit. Menurut perhitungan *grossman*, kekerasan maksimal yang didapatkan adalah 700 HV, tetapi spesimen yang sudah di-*hardening* hanya mencapai 644 HV. Ini dikarenakan pada proses pendinginan belum mencapai M_f sehingga masih terdapat austenit sisa, dan austenit sisa menyebabkan kekerasan tidak dapat mencapai maksimum. Banyaknya austenit yang bertransformasi menjadi martensit tidak bergantung pada waktu, tetapi bergantung pada temperatur, main rendah makin banyak martensit yang terbentuk pada temperatur M_f . Martensit terbentuk karena pendinginan yang terjadi sangat cepat yang disebabkan oleh pendinginan yang tidak equilibrium. Pendinginan tidak equilibrium memakai acuan yaitu diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*) yang terdapat pada Gambar 2.7. Jika pendinginan berlangsung sangat cepat sehingga berada pada temperatur dibawah M_s , maka atom karbon yang seharusnya keluar dari larutan akan terperangkap dalam struktur baru, karena atom karbon sudah tidak lagi berdifusi, temperatur terlalu rendah, sehingga menyebabkan struktur baru itu terdistosi, tidak menjadi BCC tetapi menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*). Struktur BCT membuat baja menjadi keras namun getas.

Kemudian diberikan perlakuan *tempering* dengan berbagai variasi temperatur dan waktu tahan seperti yang terdapat di Tabel 4.2. *Tempering* dilakukan dengan memanaskan kembali baja yang telah di-*hardening* pada temperatur *temper*, di bawah temperatur kritis A_1 , membiarkannya beberapa saat pada temperatur tersebut, lalu didinginkan kembali dengan lambat. Martensit bukanlah suatu struktur yang stabil (metastabil), ia merupakan suatu struktur transisi antara austenit yang tidak stabil pada temperatur kamar dengan campuran ferrit dan sementit yang stabil. Karena itu jika martensit dipanaskan kembali, sedikit demi sedikit akan menjadi



struktur yang lebih stabil, dengan diikuti berkurangnya kekerasan dan bertambahnya keuletan dan ketangguhan. Demikian juga dengan penelitian yang telah dilakukan oleh penelitian yang dilakukan oleh Handoyo (2015), bahwa hasil struktur mikro yang didapatkan setelah proses *tempering* adalah *tempered* martensit dan bainit. Baja yang di-*hardening* dengan pembentukan martensit pada kondisi *as-quenched*, biasanya sangat getas sehingga tidak cukup baik untuk pemakaian. Pembentukan martensit juga meninggalkan tegangan sisa yang sangat tinggi, dan ini sangat tidak diharapkan. Karena itu biasanya, setelah *hardening* kemudian dilanjutkan dengan *tempering*. Dengan diberi perlakuan *tempering*, maka sedikit demi sedikit karbon yang terperangkap dalam BCT keluar dan menjadi karbida. Dengan keluarnya karbon dari BCT akan mengurangi tegangan dalam BCT, dan bila seluruh karbon akhirnya keluar dari BCT, yaitu bila pemanasan kembali, maka BCT sudah menjadi BCC, martensit sudah menjadi ferrit. Karena ferrit memiliki kekerasan yang lebih rendah dari martensit, maka nilai kekerasan pada baja akan menurun.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh waktu tahan *tempering* terhadap kekerasan dan struktur mikro adalah semakin lama waktu tahan maka kekerasan semakin menurun. Kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen dengan waktu tahan 60 menit yaitu 534,6 HV, dengan struktur mikro *tempered* martensit dan *lower* bainit.
2. Pengaruh temperatur *tempering* terhadap kekerasan dan struktur mikro adalah semakin tinggi temperatur maka kekerasan semakin menurun. Kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen dengan temperatur 350°C yaitu 534,6 HV, dengan struktur mikro *tempered* martensit dan *lower* bainit.

5.2 Saran

1. Menggunakan material yang sesuai dengan standar ASSAB 705.
2. Jika material yang digunakan tidak memungkinkan untuk diganti, maka komponen *axle shaft* harus diberikan perlakuan panas terlebih dahulu agar memenuhi standar yang dibutuhkan.
3. Pada proses perlakuan panas, sebaiknya menggunakan temperatur *tempering* 350°C dengan waktu tahan 60 menit karena memiliki kekerasan paling tinggi sehingga memiliki *lifetime* yang lebih lama.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 1993. *ASM Handbook Volume 1 Properties and selection: Iron, Steels, and High-Performance Alloys*. USA: ASM International.
- _____. 1993. *ASM Handbook Volume 4 Heat Treatment*. USA: ASM International.
- _____. 1999. *ASTM A29 Standard Specification for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought and ColdFinished*. USA: ASM International.
- _____. 2001. *ASTM E3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimen*. USA: ASM International
- _____. 2000. *ASTM E562 Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*. USA: ASM International
- _____. 2003. *ASTM G99 Standard Test Method for Wear testing with Pin-on-Disk Apparatus*. USA: ASM International.
- _____. 2012. *AZoM AISI 4340 Alloy Steel*. <URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6772>>
- _____. 2013. *AZoM AISI 1045 Carbon Steel*. <URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9153>>
- Avner, Sidney H. 1987. *Introduction to Physical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Bhosale, Ajinkya. 2016. *To Study the Heat Transfer Characteristics of AISI 1045 Steel Component for Quenching Process: International Engineering Research Journal*.
- 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.

- Das, Souvik. 2015. *Failure analysis of axle shaft of a fork lift*. India: R&D and Scientific Services.
- Deutschman, dkk. 1975. *Machine Design*. New York.: Macmillan Publishing Co., Inc.
- Dieter, George E. 1987. *Metallurgi Mekanik*. Jakarta: Erlangga.
- Gunawan, dkk. 2015. *Pengaruh waktu tahan pad aproses tempering terhadap kekuatan tarik dan kekerasan baja karbon menengah*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Hamzah, Muhammad. 2008. *Peningkatan Ketahanan Aus Baja Karbon Rendah dengan Metode Carburizing*. Palu: Universitas Tadulako.
- Handoyo, Yopi. 2015. *Pengaruh Quenching dan Tempering pada Baja Jis S45c Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Crankshaft*. Bekasi: Universitas Islam 45 Bekasi.
- Nayan, dkk. 2009. *An Introduction to Optical Emission Spectroscopy and Laser-Aided Spectroscopy Techniques for Low-Temperature Plasma Analyses*. Malaysia: MUCEET.
- Purnomo. 2010. *Pengaruh Perlakuan Tempering terhadap Kekerasan dan Kekuatan Impak Baja JIS G 4051 S15C sebagai Bahan Konstruksi*. Semarang: Universitas Muhammadiyah Semarang
- 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.
- Rif'an, dkk. 2017. *Pengaruh Pelumasan terhadap Keausan Aluminium Menggunakan Mesin Two Disk Tribometer pada 1000 RPM*. Kudus: Universitas Muria Kudus.

- Setiyanto, Imam. 2009. Pengaruh Variasi Temperatur Sintering terhadap Ketahanan Aus Bahan Rem Sepatu Gesek. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.*
- Taghizadeh, dkk. 2013. Developing a model for hardness prediction in water-quenched and tempered AISI 1045 steel through an artificial neural network. Iran: Islamic Azad University.*
- Theining, Karl-Erik. 2000. Steel and Its Heat Treatment 2nd Edition. India: Butterworth – Heinemann.*
- Yogantoro, Anom. 2010. Pengaruh Variasi Temperatur Pemanasan Low Tempering, Medium Tempering, dan High Tempering pada Medium Carbon Steel Produksi Pengecoran Batur-Klaten terhadap Struktur Mikro, Kekerasan, dan Ketangguhan. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.*

LAMPIRAN

1. Lampiran Pengujian Kekerasan

Kode Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu tahan (menit)	Kekerasan (HV)					Rata-rata (HV)	Standar deviasi
			655	649	581	660	675		
AQ	850	30	655	649	581	660	675	644	36.51027
HT350t60	350	60	522	545	529	533	544	534.6	9.864076
HT350t90	350	90	542	524	529	522	508	525.0	12.28821
HT350t120	350	120	513	484	500	478	502	495.4	14.20563
HT375t60	375	60	497	451	451	457	497	470.6	24.22396
HT375t90	375	90	440	460	428	442	435	441.0	11.91638
HT375t120	375	120	439	403	448	443	443	435.2	18.28114
HT400t60	400	60	463	458	467	457	478	464.6	8.502941
HT400t90	400	90	422	423	423	422	422	422.4	0.547723
HT400t120	400	120	408	403	406	415	415	409.4	5.412947

2. Lampiran Pengujian Abrasif

Kode Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu tahan (menit)	Pengurangan massa (gr)			Rata-rata (gr)	Standar deviasi
			0.026	0.016	0.034		
AQ	850	30	0.026	0.016	0.034	0.025	0.009018
HT350t60	350	60	0.050	0.026	0.049	0.042	0.013577
HT350t90	350	90	0.066	0.064	0.054	0.061	0.006429
HT350t120	350	120	0.093	0.050	0.061	0.068	0.022338
HT375t60	375	60	0.049	0.074	0.043	0.055	0.016442
HT375t90	375	90	0.062	0.073	0.066	0.067	0.005568
HT375t120	375	120	0.052	0.103	0.067	0.074	0.026211
HT400t60	400	60	0.072	0.060	0.046	0.059	0.013013
HT400t90	400	90	0.081	0.073	0.062	0.072	0.009539
HT400t120	400	120	0.086	0.092	0.062	0.080	0.015875

3. Lampiran Data Luas Permukaan

Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu tahan (menit)	Volume bairit (%)				Rata-rata (%)	Standar deviasi
HT350t60	350	60	8.57	10	11.42	8.57	9.64	1.364771
HT350t90	350	90	8.75	12.5	10	12.85	11.025	1.977583
HT350t120	350	120	11.42	14.28	11.42	12.85	12.4925	1.369121
HT375t60	375	60	11.25	11.25	11.42	18.57	13.1225	3.632551
HT375t90	375	90	17.14	21.42	14.28	17.14	17.495	2.943575
HT375t120	375	120	20	17.14	27.14	15.71	19.9975	5.084725
HT400t60	400	60	28.57	25.71	18.57	28.57	25.355	4.719982
HT400t90	400	90	20	28.57	22.85	22.85	23.5675	3.595445
HT400t120	400	120	21.42	28.57	28.57	28.57	26.7825	3.575

4. Lampiran Pengujian Komposisi

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

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

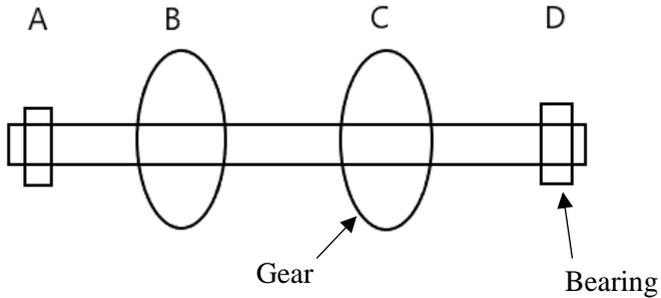
	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	B	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0315	0.0415	< 0.0015	< 0.0040	0.0011	< 0.0030	< 0.0020	< 0.0020
2	0.0314	0.0423	< 0.0015	< 0.0040	0.00060	< 0.0030	< 0.0020	< 0.0020
3	0.0303	0.0388	< 0.0015	< 0.0040	0.00077	< 0.0030	< 0.0020	< 0.0020
< x > (3)	0.0311	0.0409	< 0.0015	< 0.0040	0.00081	< 0.0030	< 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



5. Lampiran Perhitungan Analisa Tegangan



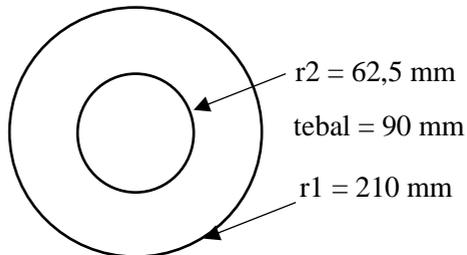
Diketahui:

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

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

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

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

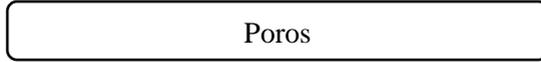


$$\text{Massa Gear} = \rho \times V$$

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

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

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



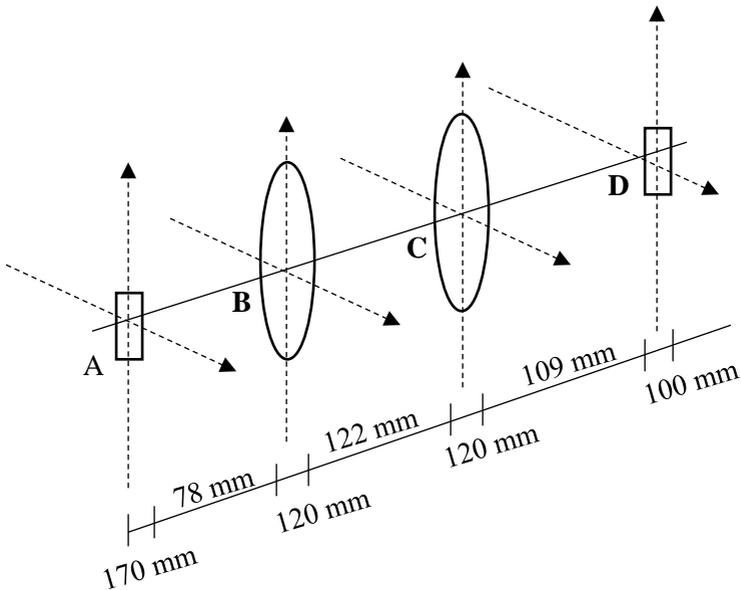
$$l = 810 \text{ mm}$$

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

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

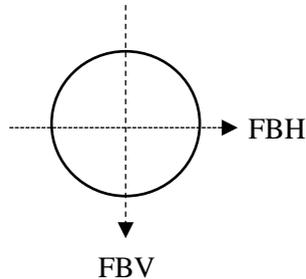
$$= 78,2 \text{ kg}$$

Free Body Diagram



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

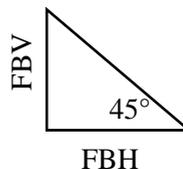
Diasumsikan gaya vertikal pada gear dinamakan FBV (gear B) dan gaya horizontal pada gear dinamakan FBH (gear C). Gear B dan gear C memiliki nilai yang sama



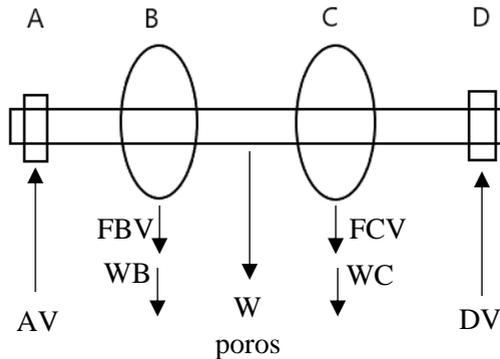
$$\begin{aligned}
 \mathbf{FBH} &= \frac{\mathbf{Torsi}}{\mathbf{jari^2}} = \frac{\mathbf{63000hp}}{\mathbf{rpm}} \\
 &= \frac{\mathbf{63000 \times 67,0511}}{\mathbf{510}} \\
 &= \frac{\mathbf{8282,7 \text{ lb in}}}{\mathbf{0,21 \text{ m}}} = \frac{\mathbf{95,427 \text{ kg m}}}{\mathbf{0,21 \text{ m}}}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

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

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



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)

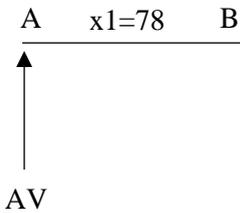
$$+\uparrow \Sigma F_y = 0$$

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

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

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)



$$0 \leq x_1 \leq 78$$

$$\Sigma M_1 = 0$$

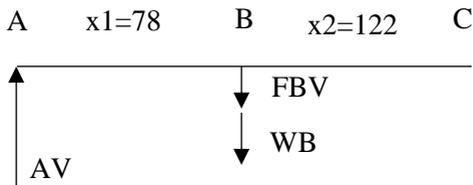
$$M_1 + AV \times x_1 = 0$$

$$M_1 = -AV \times x_1$$

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

$$\begin{aligned}
 \text{Jika } X_1 = 78 \rightarrow \mathbf{M_B} &= -AV \times x_1 \\
 &= -570,71 \times 78 = \mathbf{-41,39 \text{ kgm}}
 \end{aligned}$$

Potongan (2) – (2)



$$0 \leq x_2 \leq 320$$

$$\Sigma M_2 = 0$$

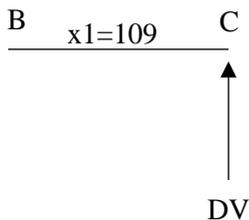
$$M_2 + AV \times (x_1 + x_2) - FBV \times x_2 - WB \times x_2 = 0$$

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

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

$$\begin{aligned} \text{Jika } x_1 = 320 \rightarrow \mathbf{M_C} &= -AV(320) + FBV(122) + WB(122) \\ &= -570,71 \times 320 + 388,1 \times 122 \\ &\quad + 89,4 \times 122 \\ &= \mathbf{111,57 \text{ kgm}} \end{aligned}$$

Potongan (3) – (3)



$$0 \leq x_3 \leq 109$$

$$\Sigma M_3 = 0$$

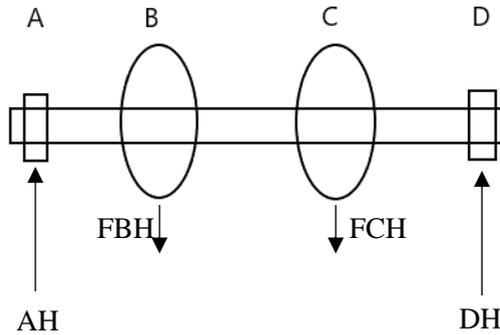
$$M_3 + DV \times x_3 = 0$$

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

$$\text{Jika } x_3 = 109 \rightarrow \mathbf{M_D} = -DV \times x_3$$

$$= 502,09 \times 109 = \mathbf{54,727 \text{ kgm}}$$

Analisa Gaya Horizontal



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

$$\Sigma M_D = 0$$

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

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

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

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

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

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

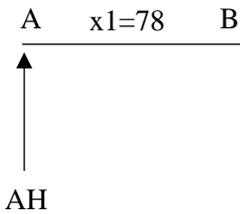
$$AH - FBH - FCH + DH = 0$$

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

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

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

Potongan (1) – (1)



$$0 \leq x_1 \leq 78$$

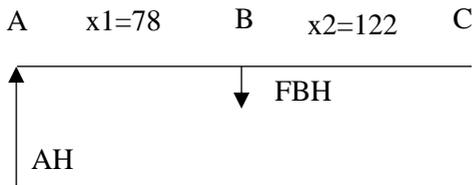
$$\Sigma M_1 = 0$$

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

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

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

Potongan (2) – (2)



$$0 \leq x_2 \leq 320$$

$$\Sigma M_2 = 0$$

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

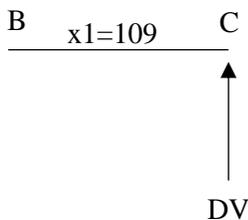
$$\text{Jika } x_2 = 0 \rightarrow M_B = AH \times x_1 = -36 \text{ kgm}$$

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

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

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

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 $> \sigma_{yield}$, 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. Kedua orang tua 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.
2. Dr. Agung Purniawan S.T, M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
3. 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.
4. Dian Mughni F, S.T., M.Sc. selaku co dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material FTI ITS.
6. Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si selaku dosen wali yang telah membantu penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material FTI-ITS.
8. Bapak Agus Prasetyohadi selaku pembimbing di PT. PAL INDONESIA (Persero) Tbk yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Teman – teman rumahkedua dan rumahketiga penulis, Odi, Treshna, Adnan, Redha, Redy, Fadhli dan Icod yang telah menemani kemana pun dan kapanpun segaka hal yang telah dilakukan di Surabaya ini.

10. Teman-teman Lab Metallurgy Ninur, Odi, Sinung, Vigita, Surya, HN, Bolex, Bobsin, Chang, Leo, Bram, Rully, Faykel, Tara, Ferdi, Ojan, Rendi, Eja, Ogi, Herald yang telah membantu dan menyemangati penulis selama penulisan Laporan Tugas Akhir.
11. Ilham Ashariansyah, Angeline Claudia, Ganis Mustika, Riviana Dwi Agustina, Kinanti Patria.
12. Teman – teman MT16 DotA player dan PUBG yang selalu senantiasa meluangkan waktu untuk bermain.
13. Keluarga besar MT 16 yang penulis sayangi, yang telah menemani dan memberikan banyak pengalaman berharga selama jenjang perkuliahan ini.
14. 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 Bogor, 6 September 1996, dan merupakan anak semata wayang. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK PLN Banjbaru, SDN Semplak 2 Bogor, SMPN 7 Bogor, dan SMAN 3 Bogor. Setelah lulus dari SMA penulis melanjutkan studinya melalui jalur SNMPTN di Jurusan Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2014 terdaftar dengan NRP 02511440000039. Pada Teknik Material penulis memilih bidang Korosi dan Analisa Kegagalan.

Sejak kuliah penulis aktif mengikuti organisasi di Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri (BEM-FTI) dan pernah menjabat sebagai Kepala Biro Pelatihan dan Kepemanduan. Penulis juga aktif pada Badan Koordinasi Pemandu FTI dan pernah menjabat sebagai Ketua. Penulis aktif dalam mengikuti berbagai kegiatan pelatihan seperti LKMM Pra TD, LKMM TD, PPLKMM.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT. Dirgantara Indonesia (Persero) Tbk Bagian Quality Assurance pada bulan Juli 2017 – Agustus 2017. Selama kerja praktek, penulis mendalami topik terkait “Analisis Proses Pengelasan TIG *Welding* pada *Part Upper Strut* Pesawat CN-212”.

Tugas akhir yang diambil penulis adalah dalam bidang Korosi dan Analisa Kegagalan dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan *Tempering* terhadap Kekerasan Material Baja AISI 1045 sebagai Solusi Kekegagalan Pada *Axle Shaft*”.