



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 184834

ANALISIS PENGARUH VARIASI MEDIA PENDINGIN PADA HARDENING DAN TEMPERATUR TEMPERING TERHADAP KEKERASAN BAJA AISI 4340 UNTUK APLIKASI POROS POMPA MULTISTAGE

ROSA AMALIA DWI ANDIKA
0251154000026

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

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



TUGAS AKHIR - TL 184834

**ANALISIS PENGARUH VARIASI MEDIA
PENDINGIN PADA HARDENING DAN
TEMPERATUR TEMPERING TERHADAP
KEKERASAN BAJA AISI 4340 UNTUK APLIKASI
POROS POMPA MULTISTAGE**

ROSA AMALIA DWI ANDIKA
NRP. 0251154000026

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

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 184834

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF VARIATION IN
COOLING MEDIA ON HARDENING AND
TEMPERING TEMPERATURE TO HARDENED
AISI 4340 STEEL FOR MULTISTAGE PUMP
SHAFT COMPONENTS**

ROSA AMALIA DWI ANDIKA
NRP. 0251154000026

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

MATERIALS ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institut of Technology
Surabaya2019

(This page left intentionally blank)

**ANALISIS PENGARUH VARIASI MEDIA PENDINGIN
PADA HARDENING DAN TEMPERATUR TEMPERING
TERHADAP KEKERASAN BAJA AISI 4340 UNTUK
APLIKASI POROS POMPA MULTISTAGE**

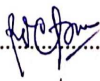

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ROSA AMALIA DWI ANDIKA
0251154000026

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH VARIASI MEDIA PENDINGIN
PADA HARDENING DAN TEMPERATUR TEMPERING
TERHADAP KEKERASAN BAJA AISI 4340 UNTUK
APLIKASI POROS POMPA MULTISTAGE**

Nama : Rosa Amalia Dwi Andika
NRP : 0251154000026
Jurusan : Departemen Teknik Material
Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.

Abstrak

Pompa merupakan suatu mesin fluida yang berguna untuk memindahkan suatu zat cair dari satu tempat ke tempat lain. Pompa beroperasi dengan membuat perbedaan tekanan antara bagian masuk (suction) dan bagian keluar (discharge). Dengan kata lain, pompa berfungsi mengubah energi mekanis dari suatu penggerak (motor) menjadi energi kinetik (kecepatan). Dimana energi ini digunakan untuk mengalirkan cairan ke tempat yang diinginkan. Putaran dari motor listrik menggerakkan poros utama pompa dimana terpasang beberapa impeller yang berfungsi untuk memompa secara bertahap fluida tersebut. Normalnya, rata-rata umur pakai poros pompa multistage yang digunakan oleh Pabrik Gula Gending, Probolinggo adalah empat tahun. Akan tetapi setelah poros pompa tersebut dipasok oleh pabrik lokal, umur pakainya hanya mencapai beberapa bulan saja. Kegagalan pada poros tersebut adalah patah dan aus pada ulir tempat pemasangan impeller. Material poros pompa multistage yang gagal tersebut adalah ASSAB 705. Ketika dilakukan uji komposisi, komposisi pompa multistage ini tidak sesuai dengan standart yang ada. Untuk mengoptimalisasi sifat mekanik pompa multistage tersebut, maka dilakukan proses perlakuan panas menggunakan material substitusi yaitu baja AISI 4340. Perlakuan panas yang dimaksudkan adalah berupa hardening pada temperatur 830°C, holding time 30 menit dan diquench dengan media air dan oli.

Kemudian dilakukan tempering dengan menggunakan equation dari Spies pada temperatur 511°C, 538°C, 565°C, dan 592°C dengan holding time 60 menit. Uji kekerasan menunjukkan spesimen dengan media pendingin air memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada menggunakan oli, yaitu 565,67 HV dan 499,67 HV. Dan dengan temperatur tempering semakin tinggi mengakibatkan kekerasan semakin turun. Kekerasan sebanding dengan keausan dari material tersebut. Uji Metalografi menunjukkan spesimen hasil hardening memiliki struktur mikro martensit. Sedangkan untuk hasil tempering adalah martensit tempered, bainit, dan ferrit. Hasil XRD menunjukkan kesesuaian tegangan sisa antara spesimen hardening dengan hasil tempering yang berpengaruh pada kekerasannya.

Kata kunci : Poros pompa multistage, AISI 4340, Spies, Perlakuan panas, Kekerasan

ANALYSIS OF THE EFFECT OF VARIATION IN COOLING MEDIA ON HARDENING AND TEMPERING TEMPERATURE TO HARDENED AISI 4340 STEEL FOR MULTISTAGE PUMP SHAFT COMPONENTS

Name : Rosa Amalia Dwi Andika
NRP : 0251154000026
Departement : Materials Engineering Departement
Advisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.

Abstract

Pump is fluid machine that used for moving liquid. Pump operate with gradient pressure between suction and dischrage. It means, pump function is change mechanical energy (motor) to kinetic energy (speed). The energy is used to flowing fluid to desire place. The rotation of the electric motor drives the main shaft of the pump where several impellers are installed which serve to pump the fluid in stages. Normally, the lifetime of shaft that used by the Gending Sugar Factory, Probolinggo is four years. But after the pump shaft is supplied by a local factory, its used only a few months. This shaft failure is fracture and wear out on its screw surface. The material of pump shaft is ASSAB 705. But, spectroscopy test shows that the chemical composition of shaft is not proper with the ASSAB 705 standard. To optimize the mechanical properties of the multistage pump, a heat treatment process is carried out using a substitution material, AISI 4340 steel. The heat treatment is hardening at temperature 830 ° C, holding time 30 minutes and quenched with water and oil media. Then tempering was using the equation from Spies at temperatures 511 ° C, 538 ° C, 565 ° C, and 592 ° C with a holding time 60 minutes. Hardness test shows specimens with water cooling media have higher hardness than using oil, which is 565,67 HV and 499, 67 HV. And with the tempering temperature getting higher, the

hardness will decrease. The hardness are corresponding result with wear resistant of the material. The Metallographic Test shows that hardening specimens have a martensitic micro structure. Whereas the results of tempering are tempered martensite, bainite and ferrite. The XRD results show the suitability of the residual stress between hardening specimens and the tempering results that affect the hardness.

Keywords: *Multistage pump shaft, AISI 4340, Spies, Heat treatment, Hardness*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis sampaikan kepada kehadirat Allah SWT, karena limpahan rahmat-NYA lah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Pengerjaan Tugas Akhir ini dimaksudkan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Departemen Teknik Material FTI-ITS. Penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Analisis Pengaruh Variasi Media Pendingin pada Hardening dan Temperatur Tempering Terhadap Kekerasan Baja AISI 4340 untuk Aplikasi Poros Pompa Multistage.**”

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak yang memberikan dukungan, bimbingan, dan bantuan kepada penulis hingga Laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya :

1. Bapak Dr. Agung Purniawan S.T, M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS.
2. Dr. Eng. Hosta Ardhyananta ST., M.Sc. selaku Kaprodi Departemen Teknik Material FTI ITS.
3. Dr. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. selaku dosen wali yang telah membantu penulis menjalani pendidikan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem M.Sc selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir, yang telah membimbing, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
5. Bapak Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir, yang telah membimbing, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
6. Seluruh Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang melancarkan Tugas Akhir penulis baik secara langsung maupun tidak langsung.

Dalam laporan ini, boleh jadi masih terdapat banyak kekurangan yang tidak penulis sadari. Oleh karena itu, penulis

mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca agar karya berikutnya bisa lebih baik. Penulis berharap Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 28 Juni 2019
Penulis,
Rosa Amalia Dwi Andika

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
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 Pompa Sentrifugal <i>Multistage Horizontal</i>	5
2.2 Baja.....	6
2.2.1 Baja ASSAB 705.....	6
2.2.2 Baja AISI 4340	7
2.3 Diagram Fe-Fe ₃ C.....	8
2.4 Perlakuan Panas.....	11
2.4.1 <i>Hardening</i>	12
2.4.2 <i>Annealing</i>	12

2.4.3 <i>Normalizing</i>	12
2.5 Pengerasan dan Penemperan	13
2.5.1 <i>Austenizing</i>	13
2.5.2 <i>Quenching</i>	14
2.5.3 <i>Tempering</i>	16
2.6 Struktur Mikro yang Mungkin Terbentuk	18
2.6.1 <i>Ferrite dan Pearlite</i>	18
2.6.2 <i>Bainite</i>	19
2.6.3 <i>Martensite</i>	20
2.7 Penelitian Sebelumnya	21
2.8 Uji Metalografi	26
2.9 Uji Kekerasan	27
2.10 Uji Keausan	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Diagram Alir.....	31
3.2 Metode penelitian	32
3.3 Material yang Digunakan	33
3.4 Peralatan	34
3.5 Tahapan Penelitian	38
3.5.1 <i>Review</i> Dokumen Perusahaan.....	38
3.5.2 Preparasi Spesimen.....	38
3.5.3 Uji Komposisi.....	39
3.5.4 Proses Perlakuan Panas	39
3.5.5 Pengujian Metalografi	40

3.5.6 Pengujian Kekerasan	40
3.5.7 Pengujian Ketahanan Aus	40
3.5.8 Pengujian XRD.....	41
3.6 Rancangan Penelitian	41
3.7 <i>Timeline</i> Penelitian	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Pengujian OES (<i>Optical Emission Spectroscopy</i>)	43
4.2 Hasil Uji XRD	44
4.3 Hasil Uji Metalografi.....	48
4.4 Hasil Uji Kekerasan.....	59
4.5 Hasil Uji Keausan.....	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN.....	75
UCAPAN TERIMA KASIH.....	91
BIODATA PENULIS.....	93

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pompa Sentrifugal <i>Multistage Horizontal</i>	6
Gambar 2.2 Diagram Fasa Fe - Fe ₃ C	10
Gambar 2.3 Tiga Tahapan pada <i>Quenching</i>	15
Gambar 2.4 Kurva Pendinginan untuk Variasi Media Pendingin.....	16
Gambar 2.5 Struktur Mikro Ferit-Perlit.....	19
Gambar 2.6 Struktur Mikro Bainit.....	20
Gambar 2.7 Struktur Mikro Martensit	21
Gambar 2.8 Skema Uji Ketahanan Aus Material (a) Spesimen (b) Beban (c) <i>Holder</i> (d) Material Abrasif Dapat Berupa Kertas Amplas atau Batu Gerinda (e) Piringan Pemutar (f) Penyangga	28
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 3.2 Komponen Poros Pompa yang Aus	33
Gambar 3.3 Mesin <i>Polish</i>	34
Gambar 3.4 Mesin OES	35
Gambar 3.5 <i>Electric Furnace</i>	35
Gambar 3.6 Mesin Uji Kekerasan.....	36
Gambar 3.7 <i>Olympus BX51 Optical Microscope</i>	37
Gambar 3.8 Mesin Uji XRD	37
Gambar 3.9 Mesin Uji Ketahanan Aus	38
Gambar 3.10 Kurva Perancangan Perlakuan Panas.....	39

Gambar 3.11	Posisi indentasi Spesimen Uji Kekerasan	40
Gambar 4.1	Grafik XRD Material Substitusi As <i>Quenched</i>	45
Gambar 4.2	Grafik XRD Setelah <i>Tempering</i> 565°C.....	46
Gambar 4.3	Hasil Metalografi dengan Perbesaran 500x Material Gagal.....	48
Gambar 4.4	Hasil Metalografi dengan Perbesaran 500x Material Substitusi.....	49
Gambar 4.5	Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) HA830 (b) HO830.....	51
Gambar 4.6	Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) TA511 (b) TO511.....	53
Gambar 4.7	Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) TA538 (b) TO538	54
Gambar 4.8	Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) TA565 (b)TO565	55
Gambar 4.9	Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) TA592 (b) TO592	56
Gambar 4.10	Struktur Mikro Martensit Temper (a) Martensit (b) Bainit	58
Gambar 4.11	Grafik Hasil Uji Kekerasan.....	62
Gambar 4.12	Grafik Distribusi Kekerasan pada Setiap Spesimen	64
Gambar 4.13	Grafik Hasil Uji Keausan	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Paduan Selain C pada <i>Plain Carbon Steel</i> dan Baja Paduan Rendah.....	8
Tabel 2.2 Penelitian Sebelumnya	21
Tabel 2.3 Parameter Pengujian Kekerasan	27
Tabel 2.4 Parameter Uji Ketahanan Aus	29
Tabel 3.1 Komposisi Kimia Poros Pompa <i>Multistage</i> <i>Horizontal</i>	34
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian	41
Tabel 3.3 <i>Timeline</i> penelitian	42
Tabel 4.1 Hasil Uji Komposisi	43
Tabel 4.2 Perhitungan Regangan Kristal	47
Tabel 4.3 Kekerasan Permukaan	59
Tabel 4.4 <i>Hardenability</i>	63
Tabel 4.5 Uji Keausan.....	65

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pabrik Gula Gending merupakan salah satu pabrik gula yang terletak di Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur. Pabrik ini berdiri sejak tahun 1831 dan sekarang telah dinaungi oleh PT Perkebunan Nusantara XI. Produk utama dari pabrik ini adalah gula, yang mana gula diperoleh dengan cara diekstrak dari nira tebu. Proses produksi di Pabrik Gula berlangsung selama musim tebu saja atau biasa disebut masa giling, yaitu sekitar 4-6 bulan. Selama masa giling, Pabrik Gula harus menggiling selama 24 jam nonstop sebanyak 65 ton tebu tiap jamnya. Pabrik Gula Gending memasok tebu dari kebun kelolaan pabrik yang terletak di sekitar lokasi pabrik. Selain itu, tebu juga diperoleh dari para petani tebu yang terletak di sekitar lokasi. Tahap pertama dari proses pembuatan gula adalah proses penggilingan tebu dengan tujuan untuk memperoleh nira. Penggilingan di Pabrik Gula Gending dilakukan dalam beberapa mesin penggiling (*mill*). Hasil dari penggilingan ini nantinya akan dimurnikan dan dipanaskan serta ditambahkan penggumpal untuk mengendapkan kotoran dalam nira. Kemudian nira jernih dikurangi kandungan airnya dan menghasilkan nira kental. Pemurnian nira dilakukan dengan menyalurkan air panas dari sisa uap penggerak turbin untuk memanaskan nira. Penyaluran air tersebut dilakukan dengan menggunakan sebuah pompa listrik *multistage*. Namun pada penelitian ini, terdapat masalah dalam pompa tersebut, yaitu di bagian poros pompa. Dalam poros pompa terdapat beberapa *impeller* yang digunakan untuk menyalurkan secara bertahap air dari sisa uap penggerak turbin yang telah dikondensasi. Pada umumnya poros pompa yang digunakan di Pabrik Gula Gending ini akan bertahan sampai empat tahun operasi. Namun setelah poros pompa dipasok oleh pabrik lokal, poros pompa tidak bertahan sampai satu tahun, bahkan hanya beberapa bulan saja. Material yang digunakan dalam poros pompa *multistage* adalah ASSAB 705 dengan nilai kekerasan 167 – 176

HV (tidak bisa dikonversi ke HRC). Sedangkan seharusnya kekerasan poros pompa berdasarkan standart katalog ASSAB adalah 310 – 372 HV. Dan ketika dilakukan uji komposisi, material yang dipakai oleh Pabrik Gula Gending ini tidak memenuhi syarat. Dalam penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Junda (2018) telah dilakukan perlakuan panas pada material yang komposisinya sesuai standart ASSAB 705 yaitu AISI 4340 dengan menggunakan *equation* Holomon-Jaffe. Namun hasil yang didapatkan dengan menggunakan *equation* tersebut tingkat keakuratannya rendah. Sehingga dilakukan penelitian ulang dengan menggunakan parameter tempering yang berbeda.

Dalam penelitian ini akan dilakukan perlakuan panas dengan menggunakan *equation* Spies dengan variabel temperatur *tempering* dan media pendingin dan akan diamati struktur mikro serta sifat mekaniknya. Perlakuan panas yang dimaksudkan adalah berupa *hardening* dan *tempering*. Tujuannya adalah untuk memperoleh kekerasan dan ketangguhan yang sesuai dengan aplikasi poros pompa.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh media pendingin terhadap kekerasan dan struktur mikro pada proses pengerasan baja AISI 4340?
2. Bagaimana pengaruh temperatur *tempering* terhadap kekerasan dan struktur mikro pada proses pengerasan baja AISI 4340?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut :

1. Data operasi sudah memenuhi standar operasional
2. Desain operasional sudah memenuhi standart
3. Pengaruh lingkungan diabaikan

4. Material dianggap homogen di semua sisi
5. Diasumsikan tidak ada penurunan temperatur saat material keluar dari dapur pemanas (*furnace*)
6. Lama waktu pemindahan spesimen uji dari dapur pemanas ke media pendingin dianggap konstan pada semua spesimen uji

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh media pendingin terhadap kekerasan dan struktur mikro dalam proses pengerasan baja AISI 4340, sebagai solusi kegagalan pada poros pompa *multistage*.
2. Menganalisis pengaruh temperatur *tempering* terhadap kekerasan dan struktur mikro dalam proses pengerasan baja AISI 4340, sebagai solusi kegagalan pada poros pompa *multistage*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi penanganan bila terjadi kegagalan pada poros pompa *multistage* di kemudian hari dan dasar pengembangan dalam penelitian lebih lanjut.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

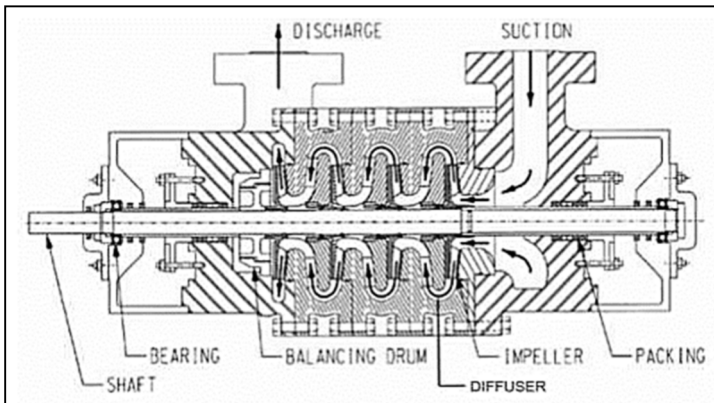
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pompa Sentrifugal *Multistage Horizontal*

Pompa merupakan suatu mesin fluida yang berguna untuk memindahkan suatu zat cair dari satu tempat ke tempat lain. Pompa beroperasi dengan membuat perbedaan tekanan antara bagian masuk (*suction*) dan bagian keluar (*discharge*). Dengan kata lain, pompa berfungsi mengubah energi mekanis dari suatu penggerak (motor) menjadi energi kinetik (kecepatan). Dimana energi ini digunakan untuk mengalirkan cairan ke tempat yang diinginkan.

Pada prinsipnya, pompa mengkonversi energi mekanik dari suatu penggerak menjadi energi aliran pada fluida yang melaluinya. Dengan demikian pompa menaikkan energi aliran pada fluida yang dapat digunakan untuk mengalirkan fluida ke tempat yang lebih tinggi dan mengatasi tahanan hidrolis dari isap dan tekan, serta mempercepat aliran.

Salah satu contoh pompa adalah pompa sentrifugal *multistage horizontal*. Pompa ini menggunakan *impeller* sebagai penggerak utama dan dipasang secara seri. Prinsip kerja dari pompa ini adalah pertama-tama fluida akan masuk melalui *nozel* ke bagian titik tengah *impeller* yang berputar. Ketika berputar, *impeller* akan memutar fluida yang ada dan mendorongnya keluar, serta akan menciptakan percepatan sentrifugal. Ketika fluida meninggalkan *impeller*, maka *impeller* akan mempunyai tekanan yang rendah . Sehingga cairan di belakangnya akan mengalir ke sisi masuk *impeller*. Pada Gambar 2.1 berikut ini merupakan bagian-bagian dari pompa.



Gambar 2.1 Pompa Sentrifugal *Multistage Horizontal* (Sumarno, 2015)

2.2 Baja

Baja adalah paduan dari besi-karbon dan beberapa elemen paduan lain yang memiliki komposisi dan perlakuan panas yang berbeda-beda. Secara umum baja diklasifikasikan berdasarkan kandungan karbonnya menjadi, baja karbon rendah, baja karbon medium, dan baja karbon tinggi. Baja juga diklasifikasikan berdasarkan kandungan elemen paduan. Baja karbon biasa (*plain carbon steels*) hanya mengandung *impurities* (pengotor) selain karbon dan sedikit mangan. Untuk baja paduan, memiliki banyak kandungan elemen paduan yang sengaja ditambahkan ke dalam baja (Callister, 2007).

2.2.1 ASSAB 705

Baja ASSAB 705 banyak digunakan dalam dunia industri. Baja ini memiliki kandungan karbon sebesar 0,38 - 0,43% C dan dapat dikategorikan baja karbon medium. Dengan kandungan karbonnya, baja ASSAB 705 dapat dikeraskan dengan perlakuan panas (*heat treatment*). Selain itu baja ASSAB 705 juga sangat cocok untuk perlakuan

panas *hardening* daripada baja karbon rendah maupun baja karbon tinggi (Syahri, 2017).

2.2.2 Baja AISI 4340

Berdasarkan katalog ASSAB, baja ASSAB 705 setara dengan baja AISI 4340. AISI 4340 banyak digunakan sebagai komponen teknik, diantaranya adalah untuk komponen mesin seperti poros engkol (*crankshaft*), batang penghubung (*connecting rods*), roda gigi (*gear shaft*), dll. AISI 4340 mempunyai arti yaitu, AISI adalah standart penamaan Amerika yang merupakan singkatan dari *American Iron and Steel Institute*. Sedangkan 4340, 43 menunjukkan baja paduan *nickel* (Ni), *chromium* (Cr), dan *Molybdenum* (Mo), sedangkan dua dijid terakhir yaitu 40 merupakan kandungan kadar karbon dalam baja.

Baja AISI 4340 termasuk baja karbon menengah memiliki kandungan karbon antara 0,25 - 0,60 wt% . Untuk memperbaiki sifat mekaniknya, baja karbon menengah dapat diberikan perlakuan panas berupa *austenizing*, *quenching*, dan *tempering*. Proses *tempering* dilakukan untuk menghasilkan struktur mikro berupa martensit. Baja karbon yang sengaja ditambahkan unsur paduan seperti *chromium*, *nickel*, dan *molybdenum* dapat menaikkan *hardenability* dari baja. Paduan yang diberi perlakuan panas ini memiliki sifat kekerasan yang lebih tinggi daripada baja karbon rendah, namun memiliki ketangguhan yang lebih rendah. Aplikasi dari baja karbon menengah diantaranya adalah, roda kereta api dan rel, roda gigi, poros engkol, dan bagian-bagian mesin lainnya serta komponen struktural yang membutuhkan kombinasi kekuatan tinggi, ketahanan aus, dan ketangguhan. Tabel 2.1 berikut ini merupakan komposisi paduan pada baja karbon menengah.

Tabel 2.1 Komposisi Paduan Selain C pada *Plain Carbon Steel* dan Baja Paduan Rendah

AISI/SAE	<i>Composition Ranges</i>			
	<i>(wt% of Alloying Element in Addition to C)</i>			
	Ni	Cr	Mo	Other
10xx, <i>Plain carbon</i>	-	-	-	-
11xx, <i>Free machining</i>	-	-	-	0.08-0.33 S
12xx	-	-	-	0.10-0.35 S
				0.04-0.12 P
13xx	-	-	-	1.60-1.90 Mn
40xx	-	-	0.20-0.30	-
41xx	-	0.80-1.10	0.15-0.25	-
43xx	1.65-2.00	0.40-0.90	0.20-0.30	-
46xx	0.70-2.00	-	0.15-0.30	-
48xx	3.25-3.75	-	0.20-0.30	-
51xx	-	0.70-1.10	-	-
61xx	-	0.50-1.10	-	0.10-0.15 V
86xx	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	-
92xx	-	-	-	1.80-2.20 Si

Sumber : Callister, 2007

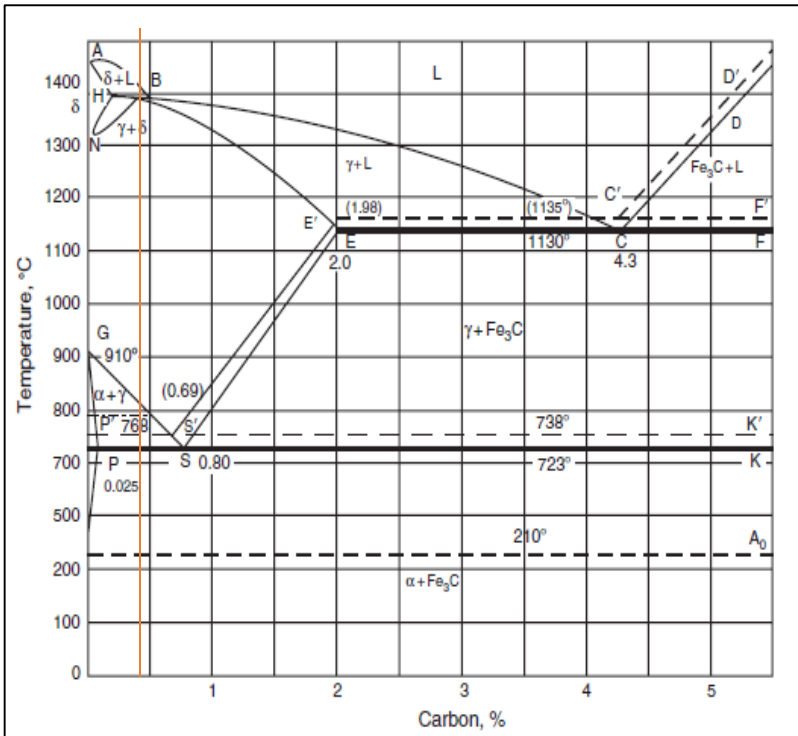
2.3 Diagram Fe-Fe₃C

Sifat mekanik dari baja tergantung pada struktur mikronya. Sedangkan struktur mikro baja sangat mudah berubah melalui proses perlakuan panas. Baja merupakan paduan dari besi dan karbon, dengan kadar karbon maksimum 1,2%. Paduan besi dengan kadar karbon lebih dari 1,2% disebut besi cor (*cast iron*).

Keberadaan karbon dalam baja sangat berpengaruh karena karbon dapat mengontrol sifat dari baja tersebut. Jika besi dipadu dengan karbon, transformasi yang terjadi pada rentang temperatur tertentu erat kaitannya dengan kandungan karbon. Diagram yang menggambarkan hubungan antara kandungan karbon dan temperatur dimana terjadi perubahan fasa selama proses pemanasan dan pendinginan disebut diagram fasa. Diagram fasa merupakan parameter untuk mengetahui segala jenis fasa yang terjadi dalam baja, serta untuk mengetahui faktor-faktor apa saja yang terjadi di dalam baja dengan berbagai jenis perlakuan (Saefuloh,2018).

Dalam keadaan cair, karbon dapat larut dalam besi. Namun dalam keadaan padat, kelarutan karbon dalam besi akan terbatas. Selain sebagai larutan padat, besi dan karbon juga dapat membentuk senyawa interstitial (*interstitial compound*), eutektik dan juga eutektoid atau mungkin juga karbon akan terpisah sebagai grafit. Oleh karena itu, diagram fase besi-karbon dibagi menjadi 2, yaitu diagram fase besi-karbida besi dan diagram fase besi-grafit.

Dari Gambar 2.2, transformasi equilibrium baja 0.4%C dapat dilihat pada garis merah. Pembekuan dimulai dengan terbentuknya ferrit delta pada temperatur sekitar 1500°C. Pada temperatur sekitar 1496°C pembekuan dilanjutkan dengan terbentuknya austenit. Pembekuan selesai ditandai dengan seluruhnya telah menjadi austenit. Kemudian pada garis A3 mulai terjadi transformasi allotropi dari austenit menjadi ferrit. Transformasi dimulai dengan terbentuknya inti-inti ferrit pada batas butir austenit. Karena austenit mengandung 0.4%C sedangkan ferrit tidak mampu melarutkan karbon sebanyak itu, maka austenit yang akan berubah menjadi ferrit harus mengeluarkan karbonnya. Makin rendah temperatur, makin banyak ferrit. Pada saat mencapai garis A1, transformasi menjadi ferrit telah selesai. Selanjutnya sisa austenit yang belum bertransformasi akan mengalami reaksi eutektoid menjadi perlit. Pada temperatur di bawah A1, paduan akan terdiri dari ferrit dan perlit.



Gambar 2.2 Diagram Fasa Fe - Fe₃C (Totten, 2006)

Perhitungan austenisasi dapat dilihat pada persamaan 2.1 berikut.

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

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

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

Temperatur austenisasi = $816,5^{\circ}\text{C} + 30^{\circ}\text{C} = 846,5^{\circ}\text{C}$

Temperatur austenisasi dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1. Dari persamaan diketahui X merupakan kadar karbon dalam baja dan y merupakan temperatur. Baja AISI 4340 merupakan baja hypoeutectoid dimana kadar karbonnya antara 0 – 0,8% C. Sehingga X_1 merupakan kadar karbon pada saat 0% C dan Y_1 adalah temperatur pada saat 0% C, yaitu 910°C. Kemudian X_2 merupakan kadar karbon pada saat 0,8% C dan y_2 adalah temperatur pada saat 8% C, yaitu 723°C. Kemudian X merupakan kadar karbon pada baja AISI 4340 dan Y merupakan temperatur A_3 . Dari persamaan 2.1 didapatkan temperatur A_3 untuk 0,4% C adalah 816,5°C. Kemudian untuk temperatur austenisasi ditambah 30°C - 50°C di atas A_3 , sehingga didapatkan temperatur austenisasinya adalah 846,5°C (Chambell, 2008). Temperatur austenisasi baja AISI 4340 berdasarkan ASM Handbook adalah sebesar 800°C - 845°C (ASM Handbook, 1991).

2. 4 Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas atau *heat treatment* adalah kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan pada suatu logam/paduan dalam keadaan padat dengan waktu tertentu dan untuk menghasilkan sifat tertentu (Avner, 1974). Secara umum heat treatment dibagi menjadi tiga tahap, yaitu :

1. Pemanasan sampai temperatur tertentu sesuai dengan proses *heat treatment* dan dengan kecepatan tertentu tergantung dari dimensi dan konduktifitas perpindahan panas benda kerja.
2. Mempertahankan pada temperatur tersebut selama beberapa saat, sehingga panasnya akan merata pada semua bagian benda kerja.
3. Pendinginan dengan media pendingin bergantung pada proses heat treatment dan benda kerja. Pada baja karbon rendah dan sedang, biasanya digunakan air sebagai media pendinginnya dengan laju pendinginan yang cukup cepat. Sedangkan pada baja karbon tinggi dan baja paduan,

biasanya digunakan minyak sebagai media pendinginnya dengan laju pendinginan yang lebih lambat (Yani, 2008).

2.4.1 Hardening

Hardening dilakukan untuk memperoleh sifat tahan aus yang tinggi, kekuatan, dan kekerasan yang lebih baik. Kekerasan yang dapat dicapai oleh suatu baja bergantung pada komposisi kimia (dalam hal ini kadar karbon dalam baja), temperatur austenisasi, *holding time*, dan proses pendinginannya (Herwandi,2005).

Hardening dapat dilakukan dengan melakukan pemanasan pada baja sampai temperatur austenisasi, kemudian menahannya pada temperatur tersebut, dan dilakukan pendinginan cepat (*quenching*), serta dilakukan *tempering* untuk memperoleh kekerasan akhir yang diinginkan. *Tempering* dilakukan bukan untuk mengeraskan baja, melainkan untuk mengembalikan ketangguhan yang hilang pada saat baja dikeraskan pada proses *austenizing* dan *quenching*.

2.4.2 Annealing

Anil (*annealing*) adalah suatu proses perlakuan panas (*heat treatment*) yang dilakukan pada logam/paduan dalam proses pembuatan produk. Pada prinsipnya, anil dilakukan dengan memanaskan sampai temperatur tertentu, kemudian menahannya pada temperatur tersebut, dan didinginkan dengan sangat lambat. Biasanya anil dilakukan untuk mempersiapkan logam/paduan untuk pengerjaan /perlakuan panas berikutnya. Tujuan dari proses anil adalah untuk melunakkan baja/meningkatkan keuletan, menghilangkan tegangan, memperbaiki *machinability*-nya, dll (Suherman, 2003).

2.4.3 Normalizing

Normalisasi atau anil penormalan merupakan suatu proses memanaskan suatu logam/paduan pada temperatur yang sesuai

dengan temperatur pengerasannya, kemudian ditahan selama 10-20 menit dan diikuti dengan pendinginan dengan udara. Normalisasi dilakukan pada benda kerja hasil pengelasan untuk menghilangkan tegangan dalam yang terjadi pada proses tersebut (Thelning, 1984).

2.5 Pengerasan dan Penemperan

Pengerasan dilakukan untuk memperoleh kekerasan yang maksimum, yaitu strukturnya seluruhnya martensit. Kekerasan maksimum tergantung pada kekerasan martensitnya. Dan kekerasan martensit tergantung pada banyaknya kadar karbon dalam austenit pada saat pemanasan.

Hasil dari proses pengerasan adalah martensit yang keras namun getas. Sehingga perlu dilakukan pemanasan kembali untuk dihasilkan baja yang lebih ulet/tangguh. Proses ini dinamakan penemperan. Penemperan dilakukan dengan memanaskan baja sampai temperatur tertentu, kemudian menahannya selama beberapa saat (1-2 jam) dan didinginkan kembali.

2.5.1 Austenizing

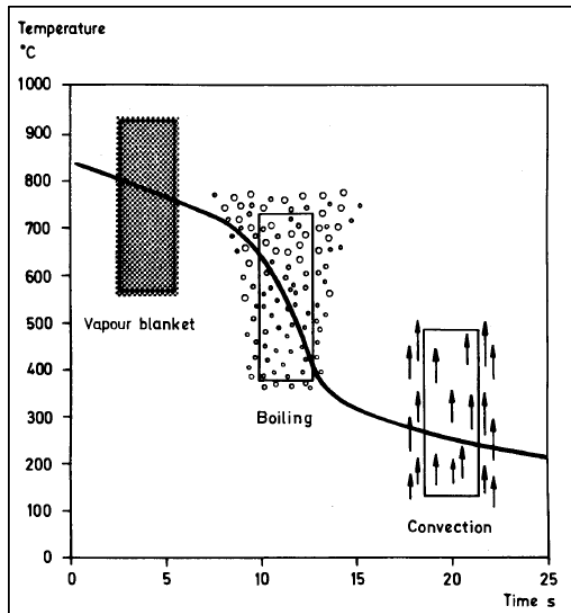
Untuk dapat memperoleh struktur martensit maka pada saat pemanasan harus mendapatkan struktur austenit, karena hanya austenit yang bisa bertransformasi menjadi martensit. Jika saat pemanasan strukturnya tidak seluruhnya austenit, maka setelah diquench struktur yang terbentuk tidak semuanya martensit. Sehingga kekerasan yang terjadi juga tidak akan maksimum. Untuk baja *hypoeutectoid* temperatur austenisasinya adalah $30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ di atas temperatur A_3 . Dan untuk baja *hypereutectoid* adalah $30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ di atas temperatur A_1 (Suherman, 2003).

Penentuan temperatur austenisasi perlu diperhatikan. Karena adanya unsur paduan dapat mempengaruhi transformasi austenit menjadi martensit. Dengan adanya unsur paduan akan menurunkan temperatur pembentukan martensit M_s (Martensit *start*) dan M_f (Martensit *finish*). Sehingga martensit akan

mudah terbentuk. Namun ketika temperatur M_s nya makin rendah akan menimbulkan banyak austenit sisa (Suherman, 1999).

2.5.2 *Quenching*

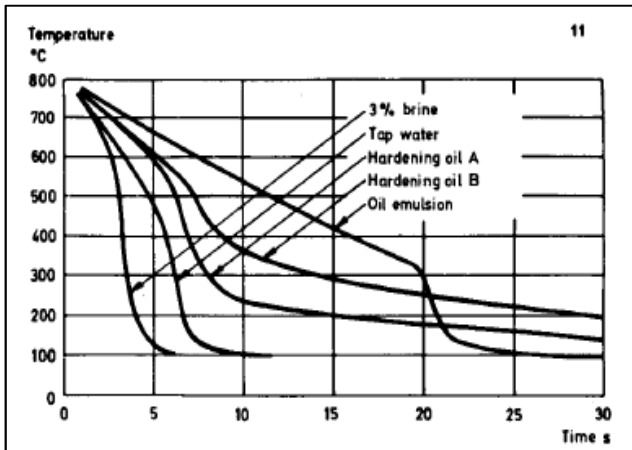
Untuk menghasilkan struktur yang diinginkan dalam proses pengerasan, yaitu martensit maka austenit yang diperoleh harus didinginkan secara cepat, setidaknya dapat mencapai laju pendinginan kritis dari baja yang bersangkutan. Dalam proses pendinginan biasanya baja yang telah dipanaskan akan dicelupkan ke media pendingin berupa *liquid*. Selama proses *quenching*, panas dari benda kerja akan mengalir ke media pendingin, sehingga temperatur benda kerja akan menurun. Laju penurunan temperatur ditentukan oleh kecepatan aliran dari panas tersebut (Avner, 1974). Terdapat tiga tahapan hilangnya panas selama proses *quenching* berlangsung, seperti pada Gambar 2.3, yaitu *vapour blanket stage*, *boiling stage*, dan *convection stage*. Ketika material hasil pemanasan dicelupkan ke dalam media pendingin, *liquid* yang menyentuh permukaan benda kerja akan berubah menjadi uap dan membentuk film tipis yang menutupi seluruh permukaan benda kerja. Tahap ini disebut *vapour blanket stage*. Selanjutnya temperatur *liquid* di sekitar benda kerja mencapai titik didih, dan semakin banyak uap yang terbentuk sehingga *blanket* tidak mampu lagi menempel pada permukaan benda kerja. Dan akan terlepas membentuk gelembung-gelembung (mendidih). Begitu *blanket* terlepas, maka akan ada *liquid* baru yang mengisi dan segera berubah menjadi gelembung uap. Energi pembentukan uap diambil dari panas pada benda kerjanya. Tahap ini merupakan *boiling stage* dimana memiliki laju pendinginan tertinggi. Kemudian tahap terakhir adalah *convection stage*. Pada tahap ini gelembung uap mulai menghilang. Perpindahan panas terjadi secara konveksi dan selisih temperatur antara *liquid* dan benda kerja tinggal sedikit, sehingga laju pendinginan sangat rendah (Suherman, 2011).



Gambar 2.3 Tiga Tahapan pada *Quenching* (Thelning, 1984)

Ada tiga media pendingin yang biasanya dipakai, yaitu air, *brine*, dan oli. Air merupakan media pendingin tertua dan murah. Laju pendinginannya sangat tinggi sehingga dapat menimbulkan tegangan dan keretakan (*crack*) pada benda kerja. Bahaya keretakan dapat dikurangi dengan mengeluarkan benda kerja dari air ketika didinginkan pada temperatur 200°C – 400°C lalu memindahkannya ke minyak. Pendinginan dengan menggunakan *brine* (air + garam) terjadi lebih cepat/mempunyai laju pendinginan yang lebih tinggi daripada dengan air biasa. Hal ini dikarenakan tahap *vapour blanket stage*-nya lebih singkat. Pendinginan dengan oli jauh lebih lambat daripada dengan air dan *brine*. Laju pendinginan tertinggi pada temperatur sekitar 600°C dan terendah ketika

temperatur pembentukan martensit. Untuk memperbaiki laju pendinginan pada oli, dapat dilakukan dengan memanaskan oli hingga temperatur 50°C-80°C. Laju pendinginan dengan menggunakan berbagai macam media pendingin dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Thelning, 1984).



Gambar 2.4 Kurva Pendinginan untuk Variasi Media Pendingin (Thelning, 1984)

2.5.3 *Tempering*

Tempering adalah proses dimana baja yang sebelumnya mengalami proses pengerasan akan dipanaskan hingga temperatur di bawah temperatur kritisnya kemudian didinginkan pada tingkat yang sesuai dengan tujuan untuk meningkatkan keuletan dan ketangguhan tetapi juga untuk meningkatkan ukuran butir matriks. Selain itu dengan penemperan juga bisa untuk menghilangkan tegangan sisa akibat proses pengerasan serta mengurangi kekerasan dalam baja (ASM Handbook Vol 4, 1991).

Proses *tempering* pada pemanasan sampai temperatur tertentu dan didinginkan dengan lambat. Pemanasan dilakukan

sampai temperatur yang diperlukan, biasanya antara 200-600°C tergantung pada keperluan. Makin tinggi temperatur pemanasan, makin besar penurunan kekerasan sedangkan keuletan bertambah (Alexander, 1990).

Tujuan utama dalam menambahkan elemen paduan dalam baja adalah untuk meningkatkan *hardenability*, yaitu kemampuan baja untuk dapat membentuk martensit pada pendinginan di atas laju pendinginan kritis. Pengaruh dari elemen paduan adalah dapat menghambat terjadinya pelunakan dalam proses *tempering*, terutama pada temperatur *tempering* yang tinggi. Dengan demikian, untuk mencapai kekerasan yang diinginkan maka baja paduan harus ditemper pada temperatur yang lebih tinggi daripada baja karbon biasa. Elemen paduan dapat dibedakan menjadi *carbide forming* dan *non carbide forming*. Unsur-unsur seperti *nickel*, *silicon*, *aluminium*, *manganese* memiliki pengaruh yang tidak signifikan terhadap kekerasan setelah penemperan. Unsur *carbide forming* seperti *chromium*, *molybden*, *tungsten*, *vanadium*, *tantalum*, *titanium* dapat memperlambat proses pelunakan dengan membentuk paduan karbida. Namun pada temperatur , yang lebih tinggi, kekerasan akan menurun seiring dengan naiknya temperatur *tempering* (ASM Handbook Vol 4, 1991)

Parameter *Tempering*

Spies mempelajari pengaruh adanya beberapa unsur paduan terhadap kekerasan baja. Adanya unsur paduan akan menambah kekerasan Fe-C setelah ditemper. Spies membuat suatu perhitungan antara temperatur *tempering*, waktu tahan *tempering* (*holding time*), dan kandungan dari beberapa unsur paduan yang menurutnya berpengaruh terhadap kekerasan baja. Perhitungan dari Spies dapat dilihat pada persamaan 2.2 berikut ini. (Spies, 1977)

$$\begin{aligned} \text{HB} = & 2.84 \text{ Hh} + 75(\% \text{C}) - 0.78(\% \text{Si}) + \\ & 14.24(\% \text{Mn}) + 14.77(\% \text{Cr}) + 128.22 \\ & (\% \text{Mo}) - 54.0(\% \text{V}) - 0.55 \text{ Tt} + 435.66 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Keterangan :

HB : Kekerasan setelah *hardening & tempering* (Brinell)

Hh : Kekerasan setelah *hardening* (Rockwell)

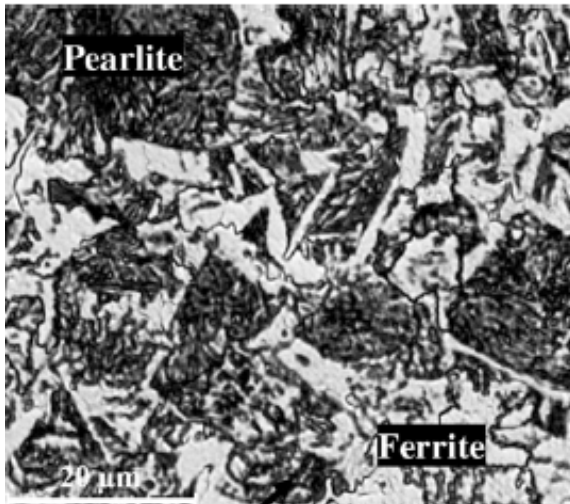
Tt : Temperatur *tempering* (°C)

2.6 Struktur Mikro yang Mungkin Terbentuk

Struktur mikro dari baja tersusun dari susunan kristal yang berulang dengan fase yang berbeda-beda. Ukuran, bentuk, komposisi dari struktur kristal ini menentukan sifat akhir dari suatu baja.

2.6.1 Ferrite dan Pearlite

Pada pendinginan equilibrium, inti ferrit tumbuh pada batas butir austenit dan mulai tumbuh ke dalam butir austenit. Proses terbentuknya ferrit berlangsung dengan difusi karbon. Ferrit pada temperatur rendah hanya mampu melarutkan sedikit karbon, sehingga austenit yang akan berubah menjadi ferrit harus mengeluarkan karbonnya dan sisa austenit menjadi kaya akan karbon. Sisa austenit ini akan mengalami reaksi eutektoid menjadi perlit. Perlit merupakan campuran dari ferrit dan sementit yang bersifat keras. Pada hasil metalografi, fasa ferrit tampak berwarna putih dan fasa perlit tampak berwarna hitam (Suherman, 2003). Gambar 2.5 merupakan gambaran dari ferrit dan perlit.

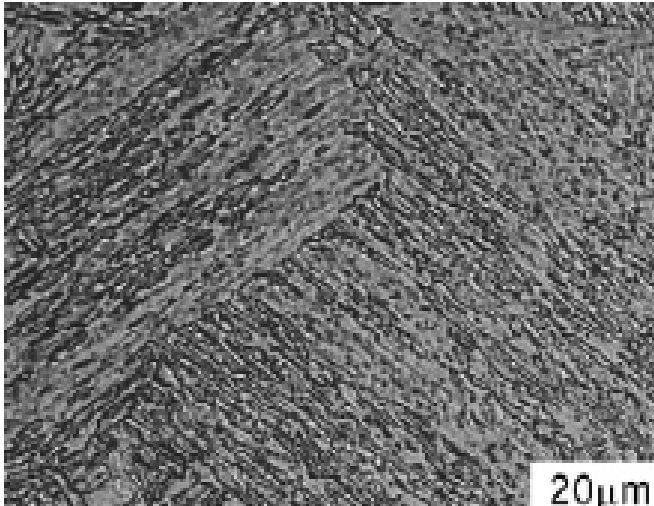


Gambar 2.5 Struktur Mikro Ferrit-Perlit (Mukherjee, 2012)

2.6.2 Bainite

Bainit tersusun atas ferrit dan sementit yang berbentuk lidi atau plat dan mengendap pada batas butir. Kekerasan bainit masih di bawah martensit. Bentuk struktur bainit seperti jarum-jarum pendek, sedikit mirip martensit namun lebih lunak dari martensit dan lebih keras dari perlit. Bainit dapat terbentuk ketika dilakukan pendinginan yang cepat namun tidak secepat martensit. Austenit pada temperatur (sekitar 550°C), austenit sudah berada jauh di bawah temperatur stabilnya. Austenit akan mengalami *driving force*, menggeser atom-atom sedemikian rupa, sehingga berubah dari FCC menjadi BCC ferrit. Karena awalnya dalam austenit terdapat banyak karbon sedangkan ferrit tidak mampu melarutkan karbon sebanyak itu maka karbon akan berdifusi keluar membentuk karbida. Kemudian austenit di sekitar ferrit tadi juga akan berubah menjadi ferrit, dan karbon-karbonnya berdifusi keluar sehingga akhirnya akan berbentuk struktur berupa bilah bilah ferrit yang didalamnya terdapat platelet sementit dengan arah hampir sejajar dengan

arah pertumbuhannya (Purboputro, 2009). Struktur inilah yang dinamakan bainit, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.

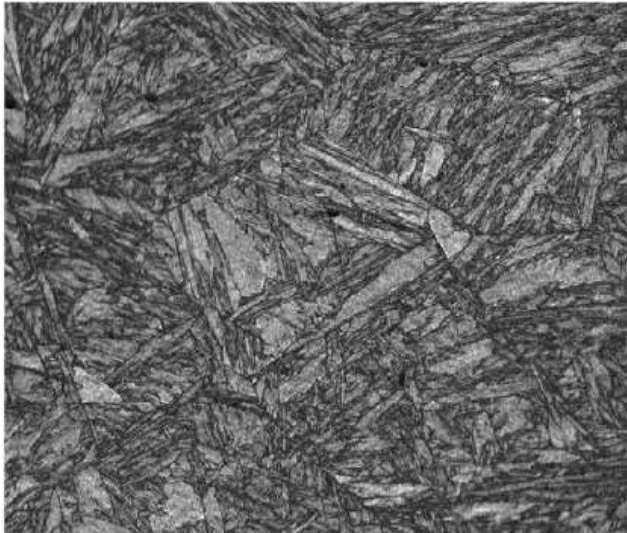


Gambar 2.6 Struktur Mikro Bainit (Kawata, 2006)

2.6.3 *Martensite*

Struktur Martensit dapat terbentuk dengan laju pendinginan yang sangat cepat. Karena adanya pendinginan yang sangat cepat ini atom karbon yang seharusnya bisa keluar/berdifusi akan terperangkap pada struktur baru (atom karbon tidak bisa keluar karena tidak mempunyai cukup energi untuk bisa berdifusi lagi). Dan menyebabkan struktur baru itu terdistorsi, tidak menjadi BCC (*Body Center Cubic*) melainkan menjadi BCT (*Body Center Tetragonal*), yaitu martensit yang tampak seperti jarum-jarum (Avner, 1974). Karena adanya atom yang terperangkap, maka menyebabkan martensit ini memiliki sifat keras dan getas. Sehingga akan dihasilkan struktur yang keras dan getas. Struktur FCC (*Face Centered Cubic*) austenit akan berubah menjadi BCT (*Body Centered*

Tetragonal) martensit pada transformasi ini. Struktur martensit berbentuk seperti jarum-jarum (Setiawan, 2006). Gambar 2.7 merupakan bentuk dari martensit.



Gambar 2.7 Struktur Mikro Martensit (Kitahara, 2006)

2.7 Penelitian Sebelumnya

Tabel 2.2 berikut merupakan beberapa penelitian sebelumnya.

Tabel 2.2 Penelitian Sebelumnya

No	Nama(Tahun)	Uraian
1	M.Junda Azizi (2019)	Penelitian yang dilakukan Muhammad Junda Azizi (2019) adalah analisa pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan <i>tempering</i> terhadap kekerasan baja ASSAB 705. Dalam hal ini dilakukan proses perlakuan panas untuk baja ASSAB 705 yang merupakan

		<p>material dari poros pompa multistage yang gagal. Perlakuan panas yang dilakukan adalah <i>hardening</i> dan <i>tempering</i> untuk memperbaiki sifat kekerasan dan ketangguhan dari material tersebut agar sesuai dengan standart yang ada. <i>Hardening</i> dilakukan pada temperatur 815°C dengan waktu tahan selama 30 menit. Kemudian dilakukan uji kekerasan untuk mengetahui kekerasan baja setelah dihardening. Setelah itu dilakukan tempering pada temperatur 300°C, 350°C, dan 400°C dengan variasi waktu tahan 60 menit dan 120 menit. Uji metalografi menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur dan waktu tahan, maka martensit yang terbentuk akan semakin sedikit akibat terdekomposisi menjadi struktur ferrit dan bainit. Dan hasil XRD juga memberikan hasil yang sesuai dengan fenomena tersebut. Sehingga hal ini akan berpengaruh pada kekerasan serta keausan material. Material yang memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus tertinggi adalah material yang diberikan <i>tempering</i> dengan temperatur 300°C dan waktu tahan 60 menit. Sedangkan material yang memiliki kekerasan dan ketahanan aus terendah adalah material yang diberikan <i>tempering</i> dengan temperatur 400°C dan waktu tahan 120 menit.</p>
--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2	Yudha Prakasa Putra Ramadhan (2017)	<p>Penelitian yang dilakukan oleh Yudha Prakasa Putra Ramadhan (2017) ini adalah menganalisa pengaruh waktu tahan dan media pendingin pada proses <i>hardening</i>. Proses <i>hardening</i> dilakukan pada temperatur 850°C dengan variasi waktu tahan 30 menit dan 60 menit. Kemudian didinginkan dengan menggunakan media air, oli, dan udara. Setelah itu dilakukan uji impak, uji kekerasan, dan uji metalografi. Material yang memiliki ketangguhan tertinggi adalah material yang dengan waktu tahan 60 menit dan didinginkan dengan udara, yaitu sebesar 7,5 Joule. Sedangkan material yang memiliki ketangguhan terendah adalah material yang dengan waktu tahan 30 menit dan didinginkan dengan air, yaitu sebesar 2 Joule. Kekerasan tertinggi adalah material dengan waktu tahan 30 menit dan didinginkan dengan air, yaitu sebesar 552 BHN. Sedangkan material dengan nilai kekerasan terendah adalah material dengan waktu tahan 60 menit dan didinginkan dengan udara.</p>
3	Hadi Sunandrio (2014)	<p>Penelitian yang dilakukan Hadi Sunandrio (2014) ini adalah melakukan analisa kegagalan serta mengetahui penyebab kerusakan pada</p>

		<p>patahnya <i>shaft</i> pompa <i>submersible</i> pada unit pengeboran minyak bumi. Pompa ini berfungsi untuk menyalurkan minyak dari dalam bumi untuk kemudian diolah dan dipasarkan. Berdasarkan hasil uji metalografi pada potongan memanjang <i>shaft</i> di daerah yang terdeformasi terlihat adanya perubahan struktur yang semula berupa ferrit – perlit berubah menjadi bainit – ferrit – perlit. Hal ini menunjukkan bahwa antara permukaan <i>shaft</i> dengan permukaan dalam bearing pada saat <i>shaft</i> berputar terjadi gesekan sehingga menimbulkan panas yang mengakibatkan kedua material mengalami pemuaiian hingga mengakibatkan kedua permukaan saling melekat dan secara tiba-tiba <i>shaft</i> terhenti dan menimbulkan beban kejut pada <i>shaft</i>, yang mengakibatkan <i>shaft</i> terpuntir hingga patah. Jadi dapat dikatakan bahwa proses terjadinya perpatahan pada <i>shaft</i> pompa dikarenakan pada salah satu sisi <i>shaft</i> tempat dudukan <i>bearing</i> terhenti secara tiba-tiba hingga timbul beban kejut (<i>impact load</i>) pada <i>shaft</i>, sedangkan kondisi motor masih tetap bekerja memutar <i>shaft</i> sehingga timbul gaya puntir pada <i>shaft</i>, akibatnya <i>shaft</i> tidak mampu lagi menahan beban puntir yang bekerja</p>
--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

		<p>hingga terjadi deformasi dan akhirnya shaft patah karena <i>over load</i>. Perpatahan terjadi pada daerah yang mengalami perubahan diameter poros (<i>radius</i>), karena didaerah radius merupakan daerah yang mempunyai konsentrasi tegangan (<i>stess concentration</i>) yang tinggi.</p>
4	Adi Noval Ihsan (2019)	<p>Penelitian yang dilakukan oleh Adi Noval Ihsan (2019) adalah analisis kegagalan pada <i>shaft</i> mesin uap di Pabrik Gula Gending. <i>Shaft</i> adalah bagian terpenting pada mesin uap II Pabrik Gula Gending, dimana <i>shaft</i> berfungsi sebagai penyalur gaya mesin uap dengan mesin penggilingan. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis faktor penyebab dan mekanisme kegagalan yang terjadi pada <i>shaft</i>. Beberapa pengujian dilakukan untuk mendukung analisis ini. Beberapa pengujian tersebut yaitu pengamatan visual, pengujian komposisi, pengujian <i>metallography</i>, pengujian kekerasan, SEM dan XRD. Hasil uji komposisi menunjukkan material <i>shaft</i> tersebut tidak memenuhi standar AISI 4340. Pengujian <i>metallography</i> menunjukkan pada daerah dekat patahan memiliki nilai <i>grain size</i> yang lebih tinggi dibanding daerah jauh dari patahan. Pengujian SEM dilakukan pada permukaan patahan</p>

		<p>dan hasil dari SEM menunjukkan adanya retakan dan garis striasi halus akibat adanya pembebanan berulang. Uji kekerasan dilakukan pada 3 daerah yaitu daerah <i>initial crack</i>, <i>propagation</i> dan <i>final crack</i>. Uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan yang dekat patahan lebih besar daripada daerah jauh patahan. Hasil XRD menunjukkan nilai regangan kristal pada daerah patahan lebih besar daripada daerah jauh patahan. Setelah dilakukannya pengujian-pengujian tersebut didapatkan faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan komponen <i>shaft</i> pada mesin uap II, yaitu kesalahan pemilihan material yang tidak sesuai standar, sehingga sifat mekanik yang ada dibawah standar. Mekanisme kegagalan komponen <i>shaft</i> pada mesin uap II diawali adanya <i>initial crack</i> pada <i>keyway</i> karena adanya pemusatan tegangan pada daerah tersebut dan kemudian retakan merambat pada permukaan sebelum terjadi <i>final crack</i> dikarenakan <i>shaft</i> tidak mampu menahan tegangan yang terjadi, sehingga menyebabkan <i>fatigue failure</i>.</p>
--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.8 Uji Metalografi

Metalografi merupakan gambaran mikro pada permukaan logam yang telah dipreparasi. Dalam pengamatan secara

metalografi dapat diperoleh gambaran struktur suatu logam. Pengujian metalografi harus menggunakan bantuan suatu mikroskop optik. Permukaan logam harus benar-benar diratakan agar struktur mikro dapat terlihat pada mikroskop. Oleh karena itu sebelum dilakukan pengujian, material uji harus dipreparasi terlebih dahulu. Adapun tahapan dalam preparasi material uji adalah pemotongan material sesuai ukuran yang diinginkan (*cutting*), *mounting* jika material uji memiliki dimensi yang sangat kecil, pengamplasan (*grinding*), *polishing*, *etching* dengan larutan etsa yang sesuai, kemudian melakukan observasi/pengamatan menggunakan mikroskop optik (Sawitri, 2015).

2.9 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada material uji. Permukaan material uji harus diratakan terlebih dahulu supaya tidak terjadi cacat indentasi. Ada beberapa tahapan dalam melakukan pengujian kekerasan. Mula-mula material uji diletakkan di mesin uji kekerasan. Kemudian diatur berapa beban yang akan dikenakan pada benda. Setelah itu dilakukan indentasi pada permukaan material uji. Dan nilai kekerasan akan muncul di layar komputer. Tabel 2.3 berikut ini menunjukkan parameter yang digunakan dalam pengujian kekerasan berdasarkan ASTM E92.

Tabel 2.3 Parameter pengujian kekerasan

Metode	<i>Vickers</i>
Indentor	Piramida intan dengan sudut 136°
Beban	100 kgf
Waktu pembebanan	10 detik

Secara matematis dapat dituliskan seperti persamaan 2.3 berikut ini (ASTM E92).

$$HV = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1.8544 P}{d^2} \quad (2.3)$$

Keterangan :

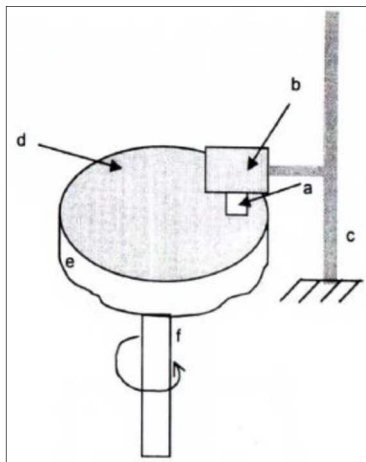
P = Beban (kgf)

d = Panjang diagonal rata-rata indentasi (mm)

$\Theta = 136^\circ$

2.10 Uji Keausan

Pengujian ketahanan aus dilakukan untuk mengetahui ketahanan aus dari material uji. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan metode *pin on disc* dengan mengacu pada standart ASTM G99. Skema dari pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skema Uji Ketahanan Aus Material (A) Spesimen (B) Beban (C) *Holder* (D) Material Abrasif Dapat Berupa Kertas Amplas atau Batu Gerinda (E) Piringan Pemutar (F) Penyangga (Yuswono, 2004)

Dalam melakukan pengujian ketahanan aus, ada beberapa prosedur yang dilakukan. Tahap pertama adalah membersihkan material uji dari pengotor yang ada pada permukaan. Kemudian melakukan pengukuran dimensi dan massa awal material uji. Selanjutnya memasukkan disk ke *holding device* dan pin ke *holder*. Lalu memberikan pembebanan yang sesuai untuk *pin* terhadap *disk*

dan menetapkan rpm yang dibutuhkan. Tabel 2.4 berikut ini menunjukkan parameter pengujian ketahanan aus.

Tabel 2.4 Parameter Uji Ketahanan Aus

Beban	2 kg
Jumlah Putaran	1000 putaran
Temperatur	Temperatur kamar
Disk	Kertas <i>abrasive grade 80</i>

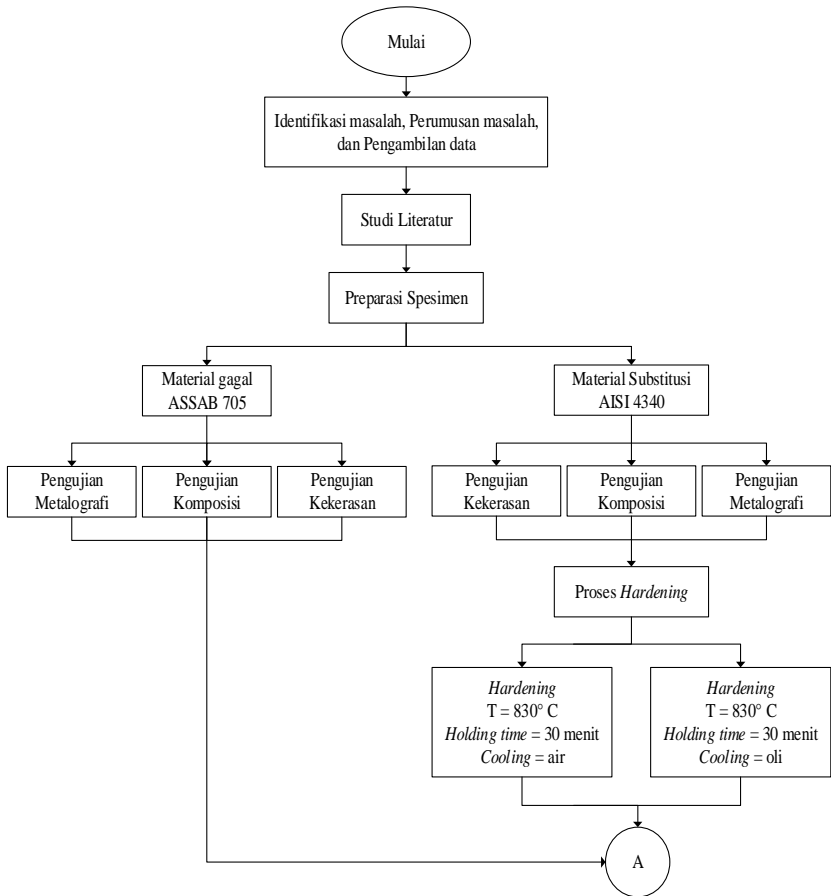
Setelah proses pengujian, akan didapatkan selisih massa awal dan massa akhir dari material uji.

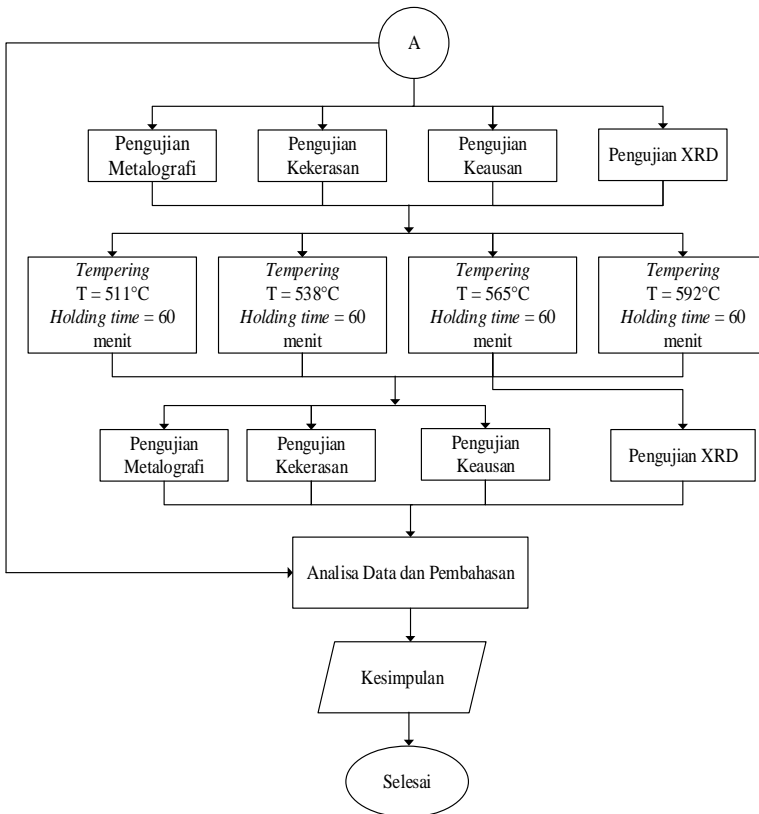
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Dalam pelaksanaan penelitian ini dilakukan beberapa pengujian sesuai dengan Gambar 3.1 berikut ini.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Metode penelitian

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

1. Studi Literatur

Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, serta situs industri yang mempelajari

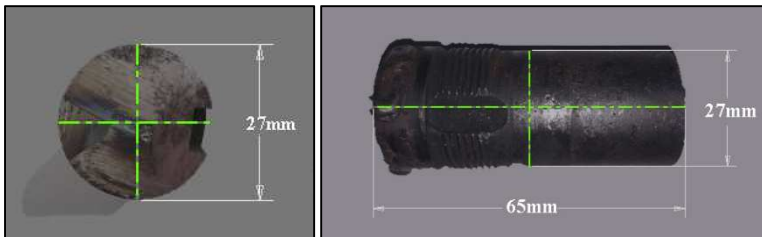
tentang proses perlakuan panas pada komponen poros pompa.

2. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur yang ada. Adapun pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu : uji komposisi dengan menggunakan OES (*Optical Emission Spectroscopy*), pengujian keausan dengan *pin on disc*, uji kekerasan *Vickers*, dan XRD.

3.3 Material yang Digunakan

Pada saat awal pengoperasian, ketika poros pompa dipasang sebagai komponen orisinil, poros tersebut dilaporkan mengalami kerusakan setelah empat tahun beroperasi. Akan tetapi, setelah poros pompa tersebut dipasang oleh pabrik lokal, umur pakainya hanya satu tahun, bahkan hanya beberapa bulan saja. Kegagalan pada poros pompa tersebut disebabkan karena patah dan aus pada ulirnya. Gambar 3.2 berikut merupakan gambaran dari poros pompa yang gagal.



Gambar 3.2 Komponen Poros Pompa Yang Aus

Material yang digunakan oleh PT Pabrik Gula Gending Probolinggo untuk komponen poros pompa adalah ASSAB 705 yang memiliki komposisi kimia seperti ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Poros Pompa *Multistage Horizontal*

Unsur	Kandungan
C	0,38 - 0,43
Mn	0,6 - 0,8
P	0,035
S	0,04
Si	0,15 - 0,35
Ni	1,65 - 2,00
Cr	0,70 - 0,90
Mo	0,20 - 0,30

3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Penggaris
Digunakan untuk mengukur spesimen.
2. Mesin pemotong
Digunakan untuk memotong material yang akan dijadikan sampel penelitian.
3. Mesin *Grinding - Polish*
Digunakan untuk preparasi spesimen yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 di bawah ini.

**Gambar 3.3** Mesin *Polish*

4. *OES (Optical Emission Spectroscopy)*

Digunakan untuk mengetahui komposisi material uji. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 Mesin OES

5. *Electric Furnace*

Digunakan untuk melakukan perlakuan panas pada material uji. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 di bawah ini.



Gambar 3.5 *Electric Furnace*

6. Uji Kekerasan
Digunakan untuk mengetahui kekerasan dari material uji. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 di bawah ini.



Gambar 3.6 Mesin Uji Kekerasan

7. Amplas SiC *grade* 80-2000
Digunakan untuk menghaluskan permukaan material sebagai preparasi pengujian mikroskop optik.
8. Larutan Etsa Nital
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi. Larutan etsa nital terdiri dari 1 - 5 ml HNO₃ dan 100 ml ethanol 95% atau methanol 95%.
9. Mikroskop Optik
Digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai struktur mikro/fasa yang terdapat pada material uji. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 di bawah ini.



Gambar 3.7 *Olympus BX51 Optical Microscope*

10. Mesin uji XRD

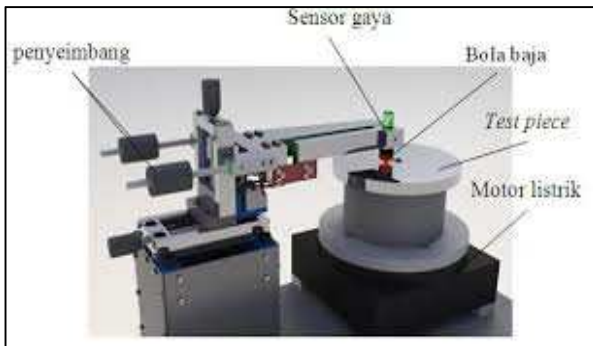
Digunakan untuk mengetahui fasa pada material baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8 di bawah ini.



Gambar 3.8 Mesin Uji XRD

11. Mesin uji keausan *Pin on Disc*

Digunakan untuk mengetahui tingkat keausan pada material uji. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.9 di bawah ini.



Gambar 3.9 Mesin Uji Ketahanan Aus

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan informasi (data perusahaan) yang berkaitan dengan poros pompa *multistage horizontal* sebagai pendukung dalam penelitian ini. Berikut data-data yang diambil, yaitu :

1. Data operasi
2. Spesifikasi material

3.5.2 Preparasi Spesimen

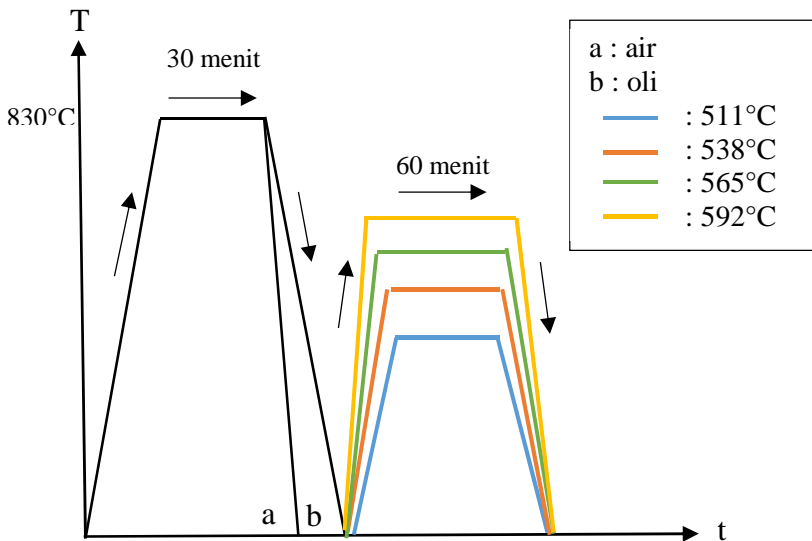
Preparasi spesimen dilakukan dengan melakukan cutting pada material menjadi beberapa bagian. Kemudian material ini akan dilakukan uji komposisi, uji *hardness*, uji metalografi, uji keausan, dan uji XRD.

3.5.3 Uji Komposisi

Uji komposisi ini dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia dalam material yang akan digunakan dalam penelitian ini. Pengujian dilakukan di PT. Logamindo Sarimulia *Iron and Steel Foundry*, Sidoarjo.

3.5.4 Proses Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah *hardening* dan *tempering*. Untuk tahap awal, akan dilakukan proses *hardening* terlebih dahulu pada temperatur 830°C dengan *holding time* 30 menit dan media *quenching* berupa air dan oli. Setelah melakukan proses *hardening*, akan dilakukan *tempering* pada tiga temperatur yang berbeda, yaitu 538°C, 592°C, 649 °C dengan *holding time* 60 menit pada masing-masing spesimen. Gambar 3.10 menunjukkan proses perlakuan panas pada penelitian ini.



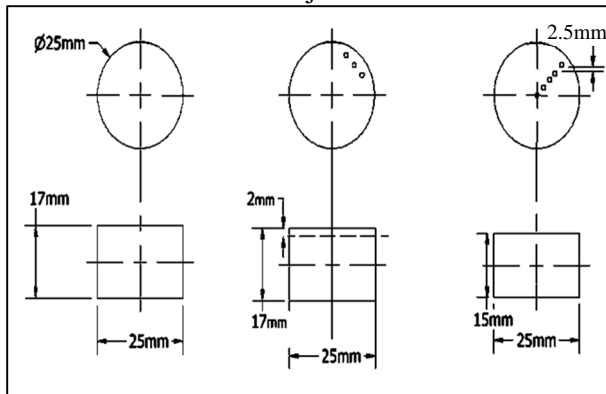
Gambar 3.10 Kurva Perancangan Perlakuan Panas

3.5.5 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari material sebelum dan setelah diberi perlakuan panas. Pengujian diawali dengan preparasi permukaan specimen, lalu dilakukan pengetsaan dan observasi struktur mikro dengan mikroskop optik. Uji ini dilakukan dengan mengacu pada ASTM E407.

3.5.6 Pengujian Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada material. Pengujian ini menggunakan metode *Vickers* dimana dalam pengujiannya memakai indenter piramida intan, pembebanan sebesar 100 kgf dan indentasi selama 10 detik (ASTM E92). Uji menggunakan *Universal Hardness Tester* HBRV 187.5A di Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material ITS. Gambar 3.11 berikut ini merupakan posisi indentasi dari material uji.



Gambar 3.11 Posisi Indentasi Spesimen Uji Kekerasan

3.5.7 Pengujian Ketahanan Aus

Uji keausan dilakukan dengan mesin *pin on disc* dengan memberikan beban tertentu pada specimen selama 1000

putaran. Pengukuran massa diukur sebelum dan sesudah dilakukan pengujian keausan, sehingga akan didapatkan selisih massa. Uji ini mengacu pada ASTM G99.

3.5.8 Pengujian XRD

Uji ini dilakukan untuk mengetahui keberadaan suatu senyawa material uji dengan mengamati pola difraksinya. Pengujian XRD dilakukan dengan menggunakan alat *Pan Analytical* XRD di Laboratorium Karakterisasi Departemen Teknik Material FTI-ITS.

3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3.2 berikut merupakan rancangan dari penelitian ini.

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian

Material	Temp. Hardening	Media Pendingin	Temp. Tempering	Holding time	Pengujian				
					Uji Komposisi	Uji Metalografi	Uji Kekerasan	Uji Keausan	Uji XRD
TP	-	-	-	-	√	√	√	-	-
HA830	830°C	Air	-	-	-	√	√	√	√
HO830	830°C	Oli	-	-	-	√	√	√	√
TA511	830°C	Air	511°C	1 jam	-	√	√	√	-
TA538	830°C	Air	538°C	1 jam	-	√	√	√	-
TA565	830°C	Air	565°C	1 jam	-	√	√	√	√
TA592	830°C	Air	592°C	1 jam	-	√	√	√	-
TO511	830°C	Oli	511°C	1 jam	-	√	√	√	-
TO538	830°C	Oli	538°C	1 jam	-	√	√	√	-
TO565	830°C	Oli	565°C	1 jam	-	√	√	√	√
TO592	830°C	Oli	592°C	1 jam	-	√	√	√	-

3.7 Timeline Penelitian

Tabel 3.3 berikut merupakan *timeline* dari penelitian ini.

Tabel 3.3 Timeline Penelitian

No	Kegiatan	Januari	Februari	Maret	April	Mei
1	Pengambilan data					
2	Preparasi spesimen					
3	Pengujian spesimen (Pengujian komposisi, pengujian kekerasan, pengamatan makroskopi, pengujian metalografi)					
4	Preparasi perlakuan panas					
5	Perlakuan panas					
6	Pengujian spesimen (Pengujian metalografi, pengujian kekerasan, pengujian keausan, pengujian XRD)					

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian OES (*Optical Emission Spectroscopy*)

Pengujian OES dilakukan untuk mengetahui komposisi dari suatu material. Tabel 4.1 berikut merupakan hasil pengujian OES pada material yang gagal dan material substitusi.

Tabel 4.1 Hasil Uji Komposisi

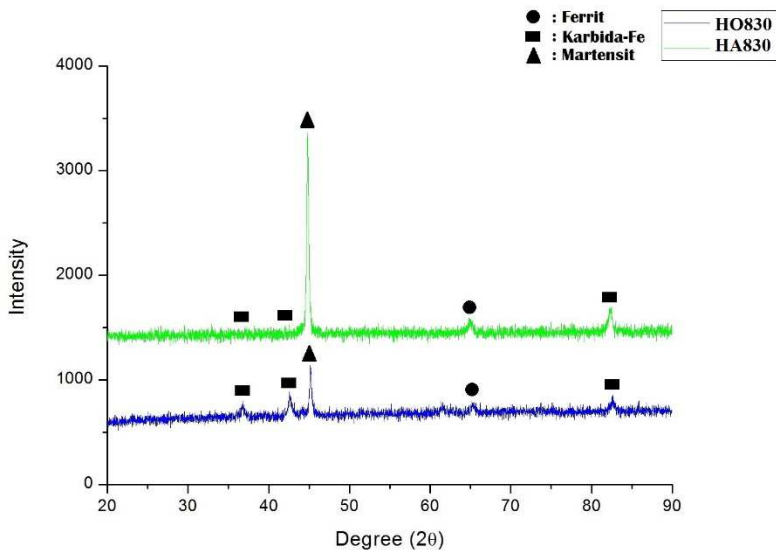
Unsur	Kandungan (%)		
	Hasil Uji material gagal	ASSAB 705	AISI 4340 (yang diberi perlakuan)
C	0,4	0,4	0,38 – 0,43
Mo	0,25	0,25	0,2 – 0,3
Cr	0,005	0,8	0,7 – 0,9
Ni	0,003	1,8	1,65 – 2,00
Mn	0,9	0,7	0,6 – 0,8
S	0,03	-	0,04
Si	0,002	-	0,15 – 0,35
P	0,03	-	0,035
Fe	<i>Balance</i>	<i>Balance</i>	<i>Balance</i>

Tabel 4.1 menunjukkan hasil uji komposisi pada sampel uji poros pompa *sentrifugal multistage* yang mengalami kegagalan. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, menunjukkan material poros yang digunakan tidak sesuai dengan standar yang ada. Komposisi kimia untuk poros pompa yang seharusnya adalah ASSAB 705, ditunjukkan pada tabel 4.1 kolom ASSAB 705. Kadar unsur paduan yang tidak sesuai standar adalah *Chromium* (Cr), *Nickel* (Ni), dan *Silicon* (Si). *Chromium* (Cr) merupakan unsur pembentuk karbida. *Chromium* Dalam jumlah yang rendah (sekitar 0,5 – 2 %) dapat meningkatkan kekerasan dalam baja dan menghasilkan struktur butiran yang lebih halus (Rahardjo, 2014).

Dalam jumlah yang besar chromium dapat meningkatkan sifat tahan korosi. *Nickel* (Ni) merupakan unsur penstabil austenit. Dalam jumlah yang besar Ni dapat meningkatkan sifat tahan korosi pada baja. *Silicon* (Si) merupakan unsur penstabil ferrit, yang menjadikan ferrit lebih stabil pada temperatur yang lebih tinggi. Dengan penambahan sedikit Si, akan meningkatkan sedikit kekuatan ferrit (Rahardjo, 2014). Ketika unsur-unsur tersebut tidak sesuai dengan standar yang ada, maka akan berpengaruh pada kekerasan dari material poros. Sehingga akan mempengaruhi kinerja dari poros tersebut. Karena material yang digunakan untuk poros pompa tidak sesuai dengan standar ASSAB 705, maka digunakan material substitusi yang setara dengan ASSAB 705, yaitu AISI 4340, untuk selanjutnya diberi perlakuan panas dan diteliti perubahan-perubahan yang terjadi, meliputi struktur mikro dan sifat mekaniknya.

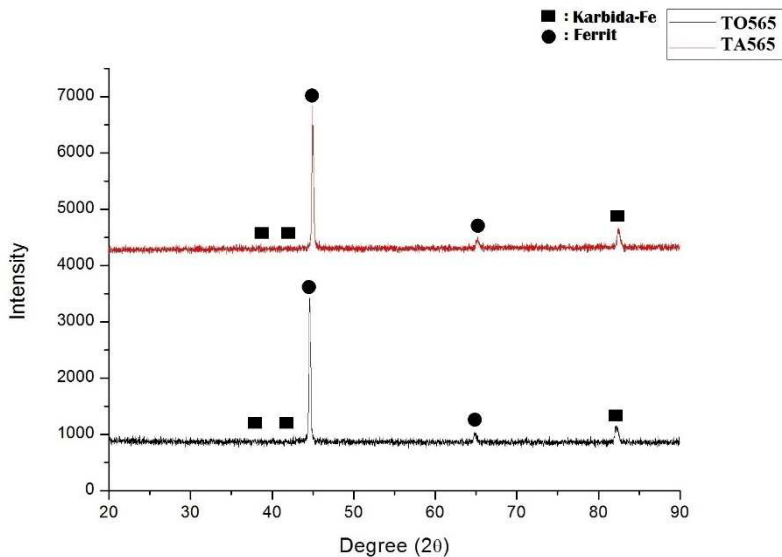
4.2 Hasil Uji XRD

Pengujian sinar X dilakukan pada material *hardening* dan *tempering* pada temperatur 565°C. Sinar X yang dipancarkan oleh XRD akan menumbuk atom-atom Fe pada baja yang tersusun atas struktur kristal tertentu. Hasil dari pantulan sinar inilah yang dapat digunakan untuk mengetahui senyawa pada baja, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Grafik hasil XRD untuk *hardening* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik XRD Material Substitusi *as-Quenched*

Gambar 4.1 merupakan hasil XRD dari material yang telah mengalami *hardening* pada temperatur 830°C dengan waktu tahan selama 30 menit dan didinginkan pada media air dan oli. Senyawa yang muncul adalah martensit, ferrit, dan Fe₃C. Pada posisi 2θ = 37° dan 43° muncul peak Fe₃C. Pada posisi 2θ = 44° muncul peak martensit. Pada posisi 2θ = 65° muncul peak ferrit. Pada posisi 2θ = 82° muncul peak Fe₃C.



Gambar 4.2 Grafik XRD Setelah *Tempering* 565°C

Gambar 4.2 merupakan grafik hasil XRD dari material yang mengalami perlakuan *hardening* pada temperatur 830°C dengan waktu tahan selama 30 menit dan didinginkan pada media air dan oli kemudian dilakukan *tempering* pada temperatur 565°C selama 60 menit dan pendinginan melalui udara. Senyawa yang muncul adalah ferrit dan Fe₃C. Pada posisi 2θ = 37° dan 43° muncul peak Fe₃C. Pada posisi 2θ = 44° muncul peak ferrit. Pada posisi 2θ = 65° muncul peak ferrit. Pada posisi 2θ = 82° muncul peak Fe₃C.

Selain untuk mengetahui fasa apa saja yang terbentuk selama proses *quenching* dan *tempering*, XRD juga bisa digunakan untuk mengetahui regangan kristal pada material. Hasil dari perhitungan regangan kristal dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perhitungan Regangan Kristal

Spesimen	Posisi (2θ)	FWHM	Regangan (ϵ)	Tegangan (σ)
TO565	44,5950	0,1171	0,001242	248,4332
TA565	44,9465	0,1224	0,001287	257,4246
HO830	45,1962	0,2007	0,002098	419,5108
HA830	44,8002	0,2175	0,002295	459,093

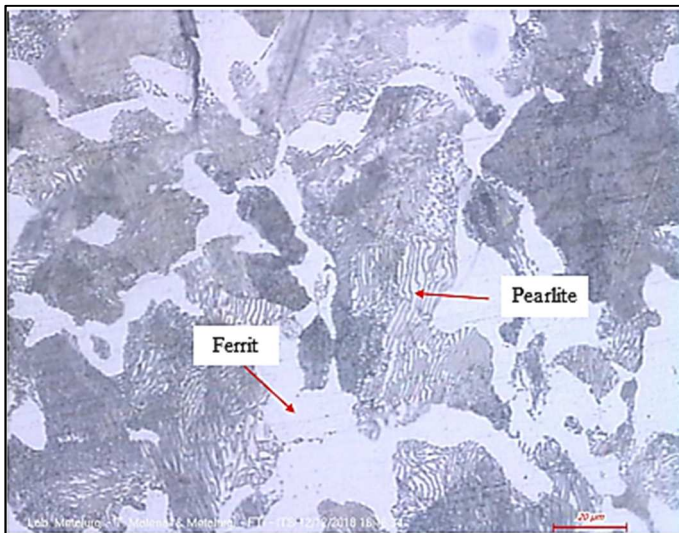
Berdasarkan Tabel 4.2, dapat diketahui nilai dari regangan kristal dari spesimen uji. Spesimen TO565 merupakan spesimen dengan perlakuan *quenching* pada media oli kemudian ditemper pada temperatur 565°C selama 60 menit dan didinginkan di udara. Spesimen TO565 memiliki regangan kristal sebesar 0,001242. Spesimen TA565 merupakan spesimen dengan perlakuan *quenching* pada media air kemudian ditemper pada temperatur 565°C selama 60 menit dan didinginkan di udara. Spesimen TO565 memiliki regangan kristal sebesar 0,001287. Spesimen HO830 merupakan spesimen *hardening* dengan media pendingin oli, yang memiliki regangan kristal sebesar 0,002098. Dan spesimen HA830 merupakan spesimen *hardening* dengan media pendingin air, yang memiliki regangan kristal sebesar 0,002295. Spesimen *hardening* memiliki regangan kristal yang lebih besar daripada spesimen *tempering*. Hal ini dikarenakan pada spesimen *hardening* terdapat banyak tegangan sisa. Tegangan sisa yang besar akan berpengaruh pada kekerasan yang besar pula (Thiele et al). Suatu material yang mengalami proses *quenching* akan menghasilkan kekerasan yang tinggi namun ketangguhan rendah. Untuk mengembalikan ketangguhan itu maka dilakukan proses *tempering*. Yang menjadikan tegangan antar struktur kristalnya berkurang (Nurjaman, 2012). Dengan adanya pengurangan tegangan ini menjadikan kekerasannya menurun. Hal ini sesuai dengan perhitungan dari tegangan sisa pada Tabel 4.2.

θ merupakan sudut Bragg, yaitu sudut antara sinar yang ditransmisikan dengan sinar pantulan dari XRD. FWHM

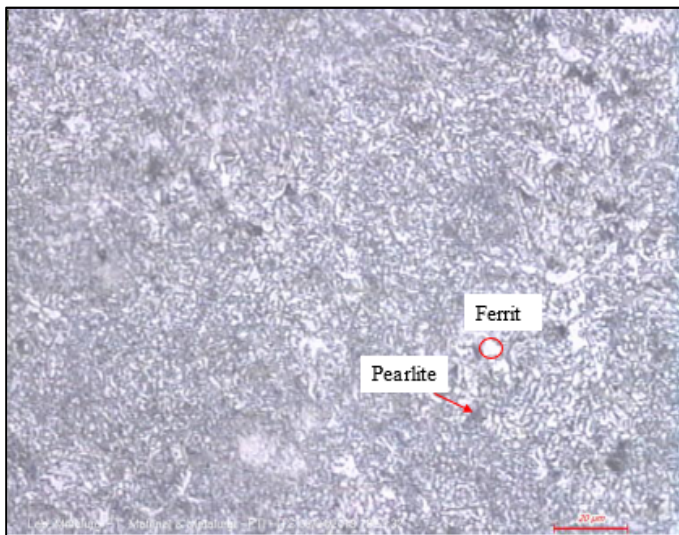
merupakan *Full Width at Half Maximum* atau lebar setengah puncak pada puncak tertinggi. ϵ merupakan regangan kristal pada material. Dimana berdasarkan hukum Hooke regangan (ϵ) sebanding dengan tegangan. Semakin tinggi regangan kristal, maka struktur yang terbentuk semakin tegang. Akibat stuktur yang tegang ini, maka akan menghasilkan kekerasan yang tinggi, begitupun sebaliknya.

4.3 Hasil Uji Metalografi

Sebelum dilakukan pengujian metalografi perlu dilakukan preparasi pada permukaan spesimen, yang meliputi *grinding*, *polishing*, dan *etching* dengan etsa nital selama 15 detik. Setelah proses etching, spesimen akan diobservasi pada mikroskop optik. Gambar 4.3, Gambar 4.4, Gambar 4.5, Gambar 4.6, Gambar 4.7, Gambar 4.8, Gambar 4.9, Gambar 4.10 berikut merupakan hasil dari uji metalografi.



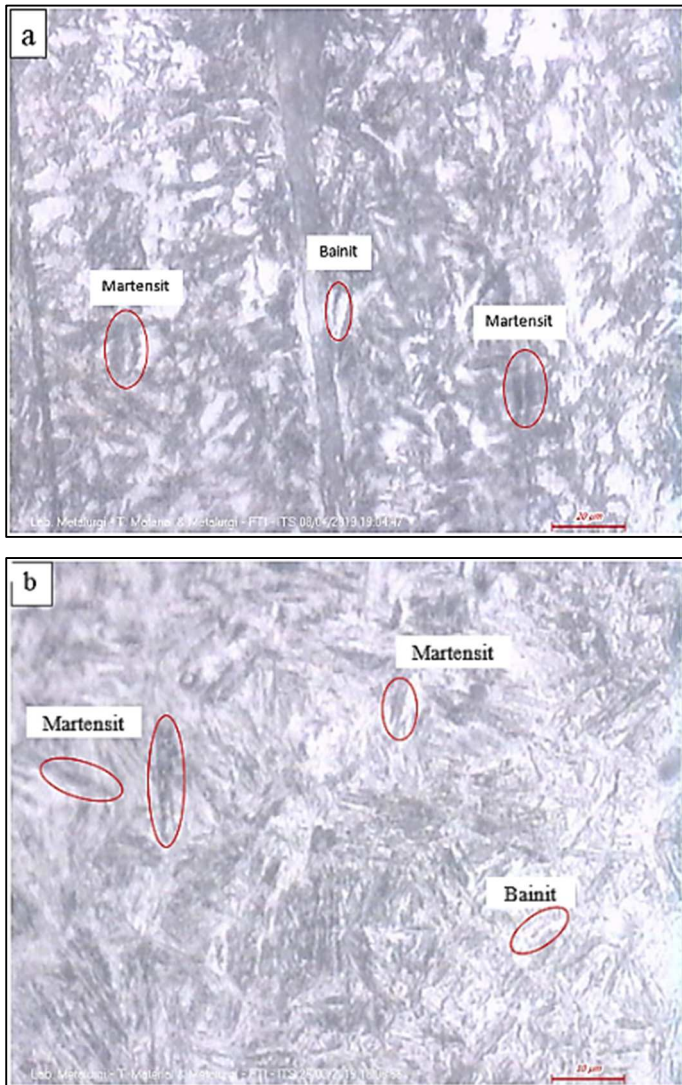
Gambar 4.3 Hasil Metalografi dengan Perbesaran 500x Material Gagal



Gambar 4.4 Hasil Metalografi Dengan Perbesaran 500x Material Substitusi

Hasil struktur mikro dari material poros yang gagal (Gambar 4.3), yaitu terdiri dari ferrit (bagian yang terang) dan *pearlite* (bagian yang gelap). Ferrit dan *pearlite* dapat terbentuk akibat pendinginan yang lambat yang menyebabkan austenit memiliki cukup waktu untuk bertransformasi secara ekuilibrium. Sedangkan hasil dari struktur mikro material substitusi yang belum diberikan perlakuan juga sama, yaitu ferrit (bagian yang terang) dan *pearlite* halus (bagian yang gelap) dengan ukuran yang lebih halus. Terbentuknya struktur seperti ini merupakan hasil dari *hot working* atau *cold working*. *Hot working* merupakan pengerjaan panas. Material diekstrusi pada keadaan panas menjadi rod yang lebih kecil. Akibat dari ekstrusi ini adalah menjadikan struktur mikro menjadi pipih. Namun karena dilakukan pada temperatur tinggi, maka sisa panas yang ada akan menyebabkan terjadinya rekristalisasi. Rekristalisasi merupakan penyusunan kembali butiran kristal yang terdistorsi menjadi kristal baru yang sempurna

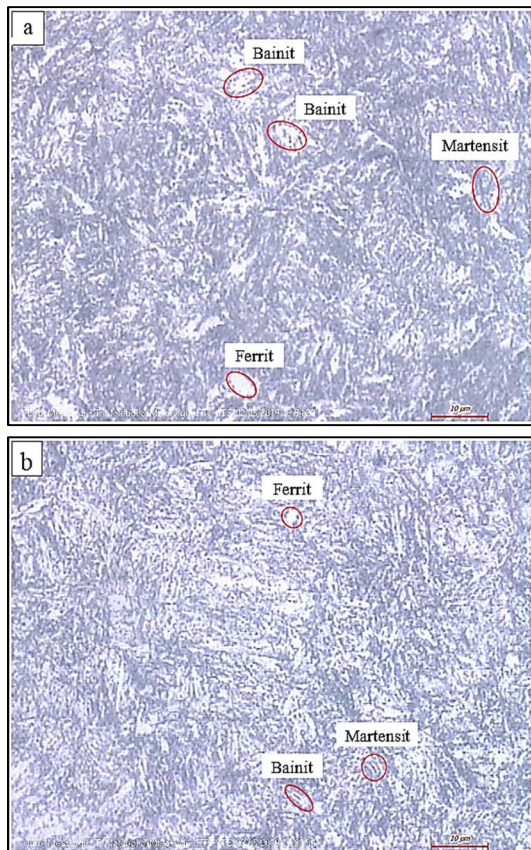
(tidak lagi terdistorsi). Rekristalisasi berlangsung diawali dengan proses pengintian (*nucleation*) dan diikuti dengan pertumbuhan (*growth*). Mula – mula beberapa atom dari kristal yang terdistorsi akan membentuk inti kristal baru yang sempurna (tidak terdistorsi). Biasanya terjadi pada batas butir. Kemudian atom dari struktur kristal lama akan bergabung dengan struktur kristal baru. Dan kristal akan bertumbuh menjadi lebih besar. Rekristalisasi dikatakan selesai bila seluruh atom dari struktur kristal lama telah habis bergabung dengan struktur kristal baru. Sehingga karena proses rekristalisasi, menjadikan struktur mikro yang dihasilkan berbentuk seperti Gambar 4.4. Struktur mikro ini juga dapat terjadi akibat *cold working*. *Cold working* merupakan pengerjaan dingin atau proses deformasi yang dilakukan pada temperatur di bawah temperatur rekristalisasi. Sehingga menyebabkan material menjadi tegang dan keras dengan struktur mikro ferrit & *pearlite* pipih. Umumnya untuk meningkatkan keuletan, machinability yang bagus, maka dilakukan *stress relief annealing*. *Stress relief annealing* dilakukan dengan cara memanaskan baja hingga temperatur 550°C - 650°C untuk baja karbon dan baja paduan rendah selama 1 – 2 jam. Pemanasan ini tidak mengakibatkan perubahan fase, namun mengakibatkan terjadinya rekristalisasi. Kemudian pendinginan dilakukan dengan laju yang rendah agar tidak terjadi tegangan. Biasanya pendinginan dilakukan pada *furnace* sampai temperatur 500°C dan dilanjutkan pendinginan pada udara.



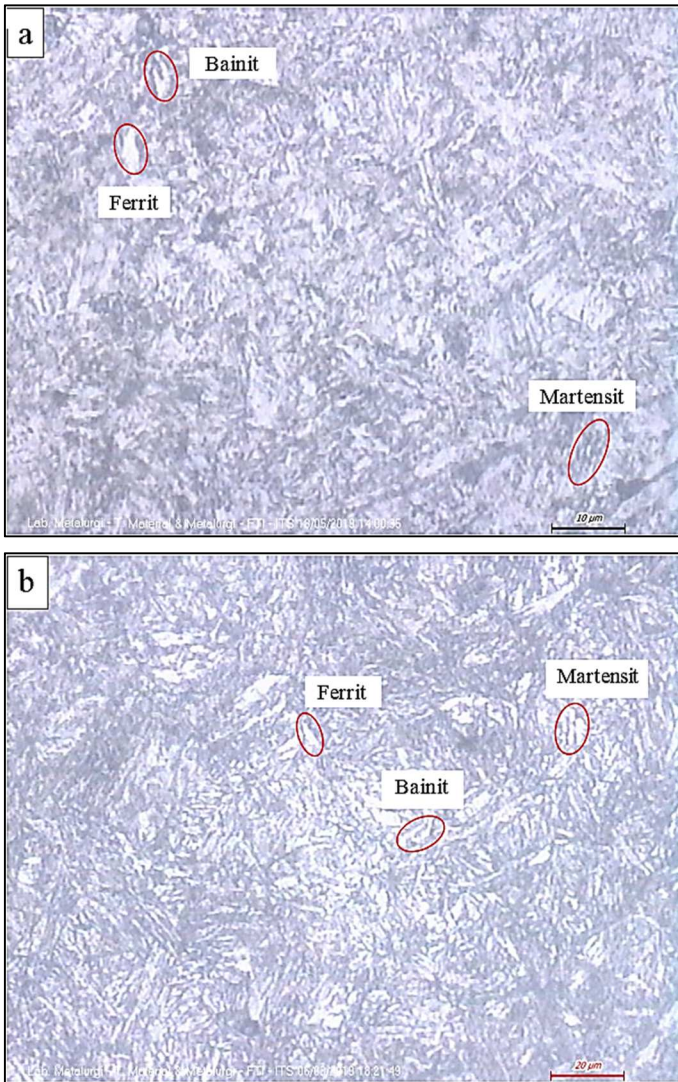
Gambar 4.5 Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) HA830 (b) HO830

Hasil struktur mikro dari spesimen yang diberikan perlakuan panas *hardening* dapat dilihat pada Gambar 4.5 a dan b dengan dua media pendingin yang berbeda, masing-masing air dan oli. Struktur mikro yang terbentuk adalah martensit (jarum-jarum berwarna gelap) dan bainit. Jenis martensit yang terbentuk adalah lath martensit. Dimana *lath* martensit dapat terbentuk ketika terjadi pendinginan cepat pada baja karbon rendah dan baja karbon medium (Krauss, 1999). Karena adanya pendinginan yang sangat cepat ini atom karbon yang seharusnya bisa keluar/berdifusi akan terperangkap pada struktur baru (atom karbon tidak bisa keluar karena tidak mempunyai cukup energi untuk bisa berdifusi lagi). Dan menyebabkan struktur baru itu terdistorsi, tidak menjadi BCC (*Body Center Cubic*) melainkan menjadi BCT (*Body Center Tetragonal*), yaitu martensit yang tampak seperti jarum-jarum (Avner, 1974). Karena adanya atom yang terperangkap, maka menyebabkan martensit ini memiliki sifat keras dan getas. Kekerasan martensit dipengaruhi oleh kadar karbon dalam austenitnya. Semakin tinggi kadar karbon, maka kekerasan yang terbentuk juga akan semakin tinggi. Martensit dapat terbentuk ketika austenit langsung didinginkan hingga mencapai temperatur M_s (martensit *start*). Banyaknya austenit yang bertransformasi menjadi martensit tidak tergantung pada waktu, melainkan pada temperatur. Kadar karbon dan paduan juga berpengaruh pada temperatur M_s dan M_f . Semakin tinggi kadar karbon maka semakin rendah M_s dan M_f nya. Sehingga pada kadar karbon yang tinggi M_f sudah berada di bawah temperatur kamar, yang berarti proses pendinginan telah selesai. Namun masih tersisa austenit yang belum bertransformasi. Sehingga struktur akhirnya adalah martensit dan austenit sisa (Suherman, 2003). Selain martensit, dengan laju pendinginan yang tidak begitu cepat dapat terbentuk bainit. Austenit pada temperatur (sekitar 550°C), austenit sudah berada jauh di bawah temperatur stabilnya. Austenit akan mengalami *driving force*, menggeser atom-atom sedemikian rupa, sehingga berubah dari FCC menjadi BCC ferrit. Karena awalnya dalam austenit terdapat banyak karbon sedangkan ferrit tidak mampu

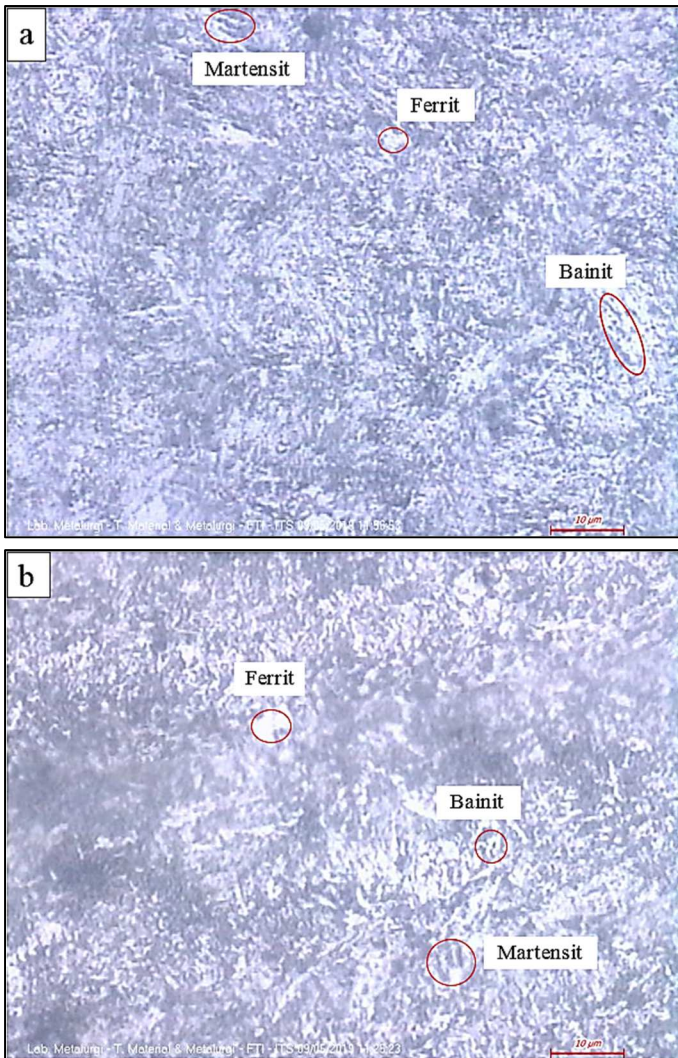
melarutkan karbon sebanyak itu maka karbon akan berdifusi keluar membentuk karbida. Kemudian austenit di sekitar ferrit tadi juga akan berubah menjadi ferrit, dan karbon-karbonnya berdifusi keluar sehingga akhirnya akan berbentuk struktur berupa bilah bilah ferrit yang didalamnya terdapat platelet sementit dengan arah hampir sejajar dengan arah pertumbuhannya. Struktur inilah yang dinamakan bainit.



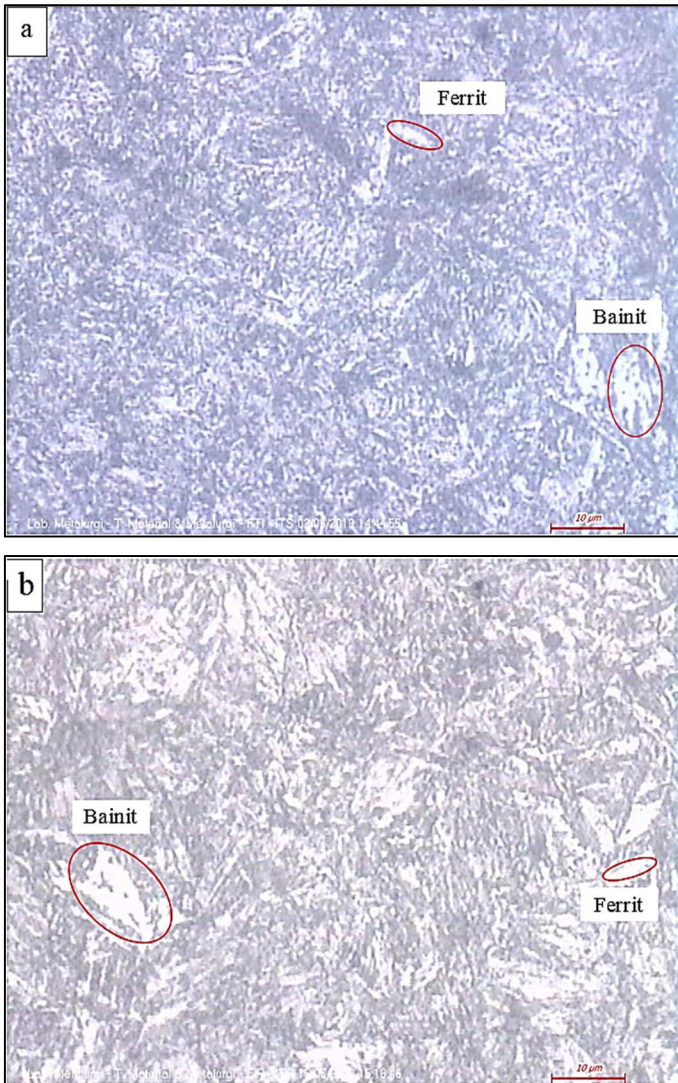
Gambar 4.6 Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) TA511 (b) TO511



Gambar 4.7 Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) TA538 (b) TO538



Gambar 4.8 Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) TA565 (b) TO565



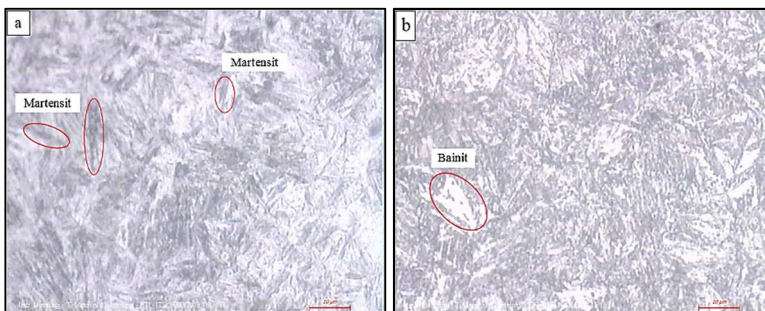
Gambar 4.9 Hasil Uji Metalografi dengan Perbesaran 1000x pada Spesimen (a) TA592 (b) TO592

Gambar 4.6 a dan b merupakan struktur mikro *tempering* pada temperatur 511°C dengan masing-masing menggunakan media pendingin air dan oli. Struktur mikro yang terbentuk terdiri dari martensit, bainit, dan ferrit. Martensit hasil proses *hardening* memiliki sifat metastabil. Sehingga ketika diberikan energi maka struktur BCT ini akan menuju strukturnya yang lebih stabil yaitu BCC. Atom karbon yang terperangkap pada struktur baru (BCT), akan berdifusi keluar menjadi karbida. Sehingga struktur BCT yang awalnya keras dan getas, akan berubah menjadi struktur yang lebih lunak yaitu BCC ferrit. Pada temperatur rendah (kurang dari 205°C), karbon akan berdifusi keluar membentuk karbida epsilon. Dimana karbida epsilon ini bersifat *submicroscopic*. Pada tahap ini terjadi penurunan tegangan dalam, namun kekerasan tetap bahkan bertambah. Pada temperatur yang lebih tinggi (205°C - 400°C), karbida epsilon akan tumbuh menjadi Fe₃C, sementit dan austenit sisa akan bertransformasi menjadi bainit atau martensit. Dengan temperatur temper yang lebih tinggi lagi (400°C - 650°C), sementit akan tumbuh menjadi lebih besar berbentuk spheroid halus. BCT akan berubah menjadi BCC, ferrit. Struktur dengan *spheroid* sementit halus yang tersebar dalam matriks ferrit biasa disebut *sorbite*.

Gambar 4.7 a dan b merupakan hasil dari struktur mikro proses *tempering* pada temperatur 538°C masing-masing dengan menggunakan media pendingin air dan oli. Struktur mikro yang dihasilkan adalah martensit, bainit, dan ferrit. Martensit yang dihasilkan akan semakin mengecil bahkan bentuknya sudah tidak seperti jarum-jarum lagi. Hal ini menandakan bahwa martensit hampir semuanya telah terdekomposisi menjadi struktur yang lebih stabil yaitu BCC. Karbon yang berdifusi keluar dari martensit membentuk platelet-platelet sementit dalam matriks ferrit. Struktur ini disebut bainit (Junda, 2019). Pada temperatur tinggi, bainit yang terbentuk adalah *upper* bainit (Bhadeshia, 1999). Dan bainit yang terbentuk juga semakin banyak. Upper bainit memiliki kekerasan yang lebih rendah daripada martensit.

Gambar 4.8 a dan b merupakan hasil dari struktur mikro proses *tempering* pada temperatur 565°C masing-masing dengan menggunakan media pendingin air dan oli. Struktur mikro yang dihasilkan adalah martensit, bainit, dan ferrit. Dengan semakin naiknya temperatur *tempering*, maka martensit temper yang terbentuk akan berkurang sedangkan ferrit dan sementit dengan matriks ferrit akan semakin banyak sebagai hasil dari dekomposisi dari martensit (LI Hong-ying, 2013). Sehingga kekerasan yang dihasilkan juga akan semakin menurun.

Gambar 4.9 a dan b merupakan hasil dari struktur mikro proses *tempering* pada temperatur 592°C masing-masing dengan menggunakan media pendingin air dan oli. struktur mikro yang terbentuk adalah bainit dan ferrit. Martensit telah terdekomposisi habis menjadi ferrit. Sedangkan struktur bainit mendominasi pada temperatur ini. Dengan semakin tingginya temperatur *tempering*, maka kekerasan akan semakin menurun. *Tempering* pada temperatur di bawah 400°C menyebabkan kekerasan berkurang namun tidak signifikan. Sedangkan *tempering* pada temperatur di atas 400°C menyebabkan kekerasan menurun secara signifikan (Huiji et al, 2018).



Gambar 4.10 Struktur Mikro Martensit Temper (a) Martensit (b) Bainit

Setelah proses *hardening*, perlu dilakukan *tempering* untuk mengembalikan ketangguhan dari material. Sehingga

struktur mikro yang awalnya martensit akan terdekomposisi menjadi struktur mikro lain. Perubahan struktur pada pemanasan martensit sangat gradual, sehingga tidak jelas perbedaan antara struktur yang satu dan yang lainnya. Secara umum, hasil pemanasan martensit kembali dinamakan martensit temper (Suherman, 2001). Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 4.10, yang merupakan hasil dari martensit temper.

4.4 Hasil Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode *Vickers* dengan pembebanan 100 kgf dan durasi indentasi selama 10 detik pada tiap spesimen. Hasil pengujian uji kekerasan pada tiap spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan 4.4.

Tabel 4.3 Kekerasan Permukaan

Spesimen	Kekerasan (HV)		St.Dev
	<i>Equation by Spies</i>	Hasil Percobaan	
TP material gagal	-	170,67	4,73
TP material substitusi	-	275,00	12,29
HA830	-	565,67	8,33
H0830	-	499,67	2,52
TA511	399,79	387,00	5,00
TO511	387,33	377,33	7,77
TA538	384,16	374,33	4,51
TO538	370,95	368,67	2,52
TA565	368,09	350,00	7,94
TO565	355,24	339,00	7,00
TA592	351,87	327,33	7,57
TO592	339,66	320,33	7,77

Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa setelah mengalami perlakuan panas berupa *hardening* terjadi kenaikan yang signifikan

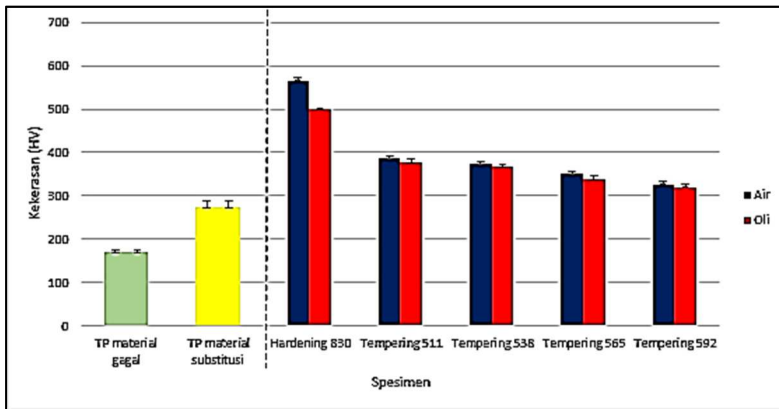
pada nilai kekerasan. Spesimen TP (Tanpa Perlakuan) material gagal memiliki kekerasan sebesar 170,67 HV. Dikarenakan struktur mikro yang terbentuk adalah ferrit dan *pearlite*. Pada kondisi awal sebelum material substitusi diberikan perlakuan, kekerasannya sebesar 275 HV, kemudian diquench dengan dua media pendingin berbeda menjadikan kekerasan meningkat menjadi 565,67 HV untuk media air dan 499,67 HV untuk media oli. Kekerasan yang rendah pada material TP (Tanpa Perlakuan) material substitusi disebabkan karena struktur mikro yang terbentuk adalah ferrit dan *pearlite* halus. Kemudian setelah diquench kekerasannya naik signifikan, karena struktur yang terbentuk adalah martensit dan bainit. Dalam martensit tegangan antar kristalnya besar, sehingga kekerasan yang dihasilkan akan juga akan besar pula. Nilai kekerasan hasil *hardening* memiliki nilai yang bervariasi, dikarenakan faktor dari media pendingin yang dipakai. Selama pendinginan terjadi perpindahan panas antara spesimen dengan media pendingin. Kontak antara media pendingin dengan spesimen mengakibatkan perubahan temperatur yang berbeda-beda. Semakin cepat laju pendinginan, semakin tinggi nilai kekerasan yang diperoleh (Gale, 2017). *Quenching* dengan media pendingin air membuat material menjadi lebih keras daripada quenching menggunakan media pendingin oli dan udara (Yudha, 2017). Kekerasan yang terbentuk tergantung dari berapa % martensit yang terbentuk. (ASM Handbook, Vol 4) Menurut ASM Handbook Vol 4, dengan kadar karbon 0,38%, berdasarkan hasil uji komposisi AISI 4340 spesimen dianggap membentuk 99% martensit ketika kekerasannya mencapai 595 HV. Dianggap membentuk 95% martensit ketika kekerasannya mencapai 534 HV. Dianggap membentuk 90% martensit ketika kekerasannya mencapai 498 HV. Dianggap membentuk 80% martensit ketika kekerasannya mencapai 450 HV. Dianggap membentuk 50% martensit ketika kekerasannya mencapai 407 HV. *Hardening* dengan media pendingin air memiliki kekerasan sebesar 565,67 HV, yang berarti terbentuk lebih dari 95% martensit. Kemudian

hardening dengan media pendingin oli memiliki kekerasan sebesar 488,6 HV, yang berarti terbentuk kurang lebih 90% martensit.

Setelah *tempering* kekerasan material menurun. Pada temperatur *tempering* 511°C, kekerasannya menurun berturut-turut pada media pendingin air dan oli, yaitu sebesar 387 HV dan 377,33 HV. Hal ini disebabkan karena struktur yang terbentuk tidak sepenuhnya martensit, sehingga akan terjadi penurunan kekerasan dari hasil *quenching*. Kemudian kekerasannya menurun lagi ketika temperatur *tempering* 538°C dengan media pendingin air dan oli, berturut-turut kekerasannya sebesar 374,33 HV dan 368,67 HV. Atom karbon dalam struktur kristal BCT akan semakin banyak berdifusi keluar, sehingga tegangan di dalam struktur BCT juga akan semakin berkurang. Dan hal ini akan menyebabkan kekerasan semakin menurun. Pada temperatur yang lebih tinggi lagi, yaitu 565°C dengan media pendingin air dan oli, kekerasannya berturut-turut sebesar 350,00 HV dan 339,00 HV. Jumlah martensit semakin sedikit, namun bainit dan ferrit semakin banyak. Struktur bainit memiliki kekerasan di bawah martensit. Sehingga kekerasannya juga akan semakin menurun. Pada temperatur *tempering* lebih tinggi lagi, yaitu 592°C dengan media pendingin air dan oli, kekerasannya berturut-turut sebesar 327,33 HV dan 320,33 HV. Terjadi penurunan kekerasan yang signifikan. Karena pada temperatur ini, martensit telah habis terdekomposisi, menyisakan bainit dan ferrit.

Berdasarkan uraian di atas, kekerasan material akan menurun setelah dilakukan *tempering*, dikarenakan *tempering* bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan. Sehingga kekerasan akan turun, seiring dengan naiknya nilai keuletan (Dony, 2017). Perbedaan antara hasil *tempering* dengan menggunakan media pendingin air dan oli tidak signifikan. Dikarenakan temperatur dan waktu tahan yang dipakai sama, dan digunakan pendinginan dengan udara. Sehingga hasil yang terjadi juga tidak jauh berbeda. Namun dengan menggunakan media air, kekerasan *after tempering* juga akan lebih tinggi dibandingkan dengan oli.

Hal ini berbanding lurus dengan kekerasan *after hardening*. Dengan semakin tingginya temperatur *tempering*, maka kekerasan akan semakin menurun. *Tempering* pada temperatur di bawah 400°C menyebabkan kekerasan berkurang namun tidak signifikan. Sedangkan *tempering* pada temperatur di atas 400°C menyebabkan kekerasan menurun secara signifikan (Huiji et al, 2018). Gambar 4.11 merupakan grafik hasil uji kekerasan untuk setiap spesimen.

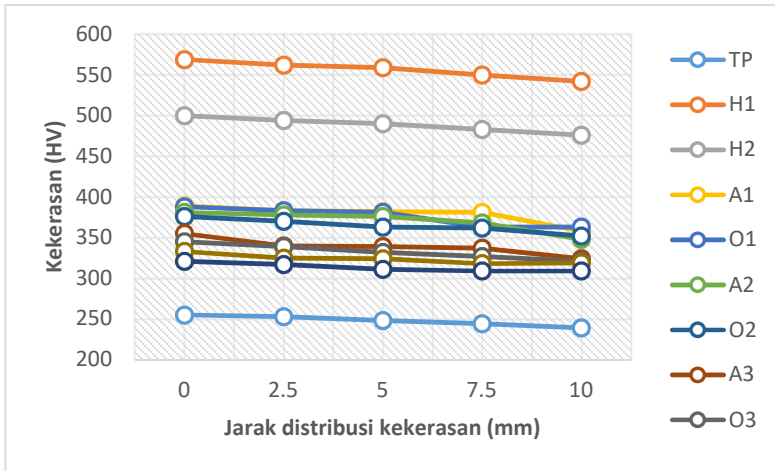


Gambar 4.11 Grafik Hasil Uji Kekerasan

Tabel 4.4 Hardenability

Spesimen	Jarak titik uji dari tepi spesimen (mm)				
	0	2,5	5	7,5	10
TP (substitusi)	255	253	248	244	239
HA830	569	562	559	550	542
HO830	500	494	490	483	476
TA511	389	383	382	381	358
TO511	388	383	381	363	363
TA538	381	378	376	368	348
TO538	376	370	363	362	352
TA565	355	340	339	337	324
TO565	345	339	332	327	321
TA592	333	325	324	318	319
TO592	321	317	311	309	309

Tabel 4.3 merupakan hasil uji kekerasan pada jarak 2 mm dari permukaan, dengan jarak antar indentasi 2,5 mm. Tujuan dari uji kekerasan 2 mm dari permukaan adalah untuk membuktikan bahwa proses perlakuan panas meliputi *hardening* dan *tempering* ini menghasilkan kekerasan yang merata pada material baik di permukaan maupun di bagian dalam material tersebut. Untuk spesimen H1, kekerasan 0 mm dari tepi sebesar 569 HV dan 10 mm dari tepi sebesar 542 HV. Untuk spesimen H2, kekerasan 0 mm dari tepi sebesar 500 HV dan 10 mm dari tepi sebesar 476 HV. Untuk spesimen O3, kekerasan 0 mm dari tepi sebesar 345 HV dan 10 mm dari tepi sebesar 321 HV. Berdasarkan data tersebut, kekerasan yang dihasilkan semakin ke tengah atau ke sumbu semakin menurun namun penurunannya tidak signifikan. Hal ini membuktikan bahwa material AISI 4340 ini memiliki *hardenability* yang bagus. Untuk lebih jelasnya, Gambar 4.12 berikut menampilkan kekerasan pada tiap titik yang diuji dari bagian tepi hingga tengah.



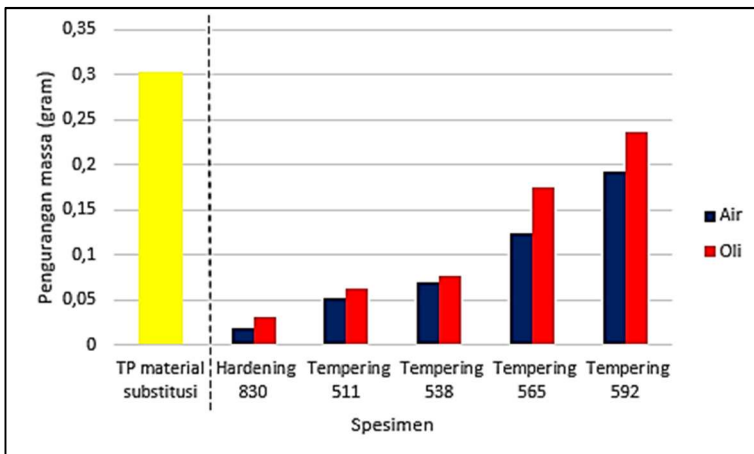
Gambar 4.12 Grafik Distribusi Kekerasan pada Setiap Spesimen

4.5 Hasil Uji Keausan

Pengujian keausan dilakukan dengan memberikan pembebanan sebesar 2 kg dengan jumlah putaran sebanyak 1000 putaran dan menggunakan kertas *abrasive grade* 80. Tabel 4.5 berikut ini merupakan hasil dari uji keausan.

Tabel 4.5 Hasil Uji Keausan

Spesimen	Massa		Pengurangan Massa
	Sebelum Uji	Setelah Uji	
TP (substitusi)	68,922	68,27	0,652
HA830	70,3475	70,3288	0,0187
HO830	69,1789	69,148	0,0309
TA511	70,2844	70,2323	0,0521
TO511	70,1305	70,0684	0,0621
TA538	68,7845	68,7147	0,0698
TO538	68,7316	68,6557	0,0759
TA565	69,9163	69,7925	0,1238
TO565	70,3262	70,1518	0,1744
TA592	69,0803	68,8871	0,1932
TO592	68,707	68,4715	0,2355



Gambar 4.13 Grafik Hasil Uji Keausan

Berdasarkan Gambar 4.13 ditunjukkan bahwa material substitusi yang belum mengalami perlakuan panas memiliki pengurangan massa sebesar 0,652 gram. Setelah dilakukan proses hardening, pengurangan massanya sebesar 0,0187 gram untuk media pendingin air dan 0,0309 gram untuk media pendingin oli. Hal ini disebabkan karena material TP (Tanpa Perlakuan) material substitusi memiliki struktur mikro ferrit dan *pearlite* sehingga kekerasannya rendah. Sedangkan material *hardening*, menghasilkan struktur mikro martensit dan bainit, sehingga kekerasannya akan berbeda jauh. Kekerasan suatu material akan sangat mempengaruhi tingkat ketahanan aus dari material tersebut (Ikhwansyah,2012). Makin keras suatu material, maka semakin sulit media *abrasive* untuk melakukan goresan (Ratia, 2015). Yang artinya, semakin keras suatu material maka semakin tinggi juga sifat tahan ausnya. Material yang memiliki sifat tahan aus yang tinggi berarti memiliki pengurangan massa yang rendah. Kemudian setelah dilakukan *tempering* pengurangan massanya bertambah jika dibandingkan dengan hasil spesimen *hardening*. Dengan temperatur *tempering* 511°C, pengurangan massa untuk media pendingin air adalah 0,0521 gram sedangkan untuk media pendingin oli adalah 0,0621 gram. Dengan temperatur *tempering* 538°C, pengurangan massa untuk media pendingin air adalah 0,0698 gram sedangkan untuk media pendingin oli adalah 0,0759 gram. Dengan temperatur *tempering* 565°C, pengurangan massa untuk media pendingin air adalah 0,1238 gram sedangkan untuk media pendingin oli adalah 0,1744 gram. Dengan temperatur *tempering* 565°C, pengurangan massa untuk media pendingin air adalah 0,1932 gram sedangkan untuk media pendingin oli adalah 0,2355 gram. Dengan media pendingin air pengurangan massanya lebih sedikit daripada dengan menggunakan media oli. Hal ini disebabkan karena perbedaan kekerasan yang dihasilkan pada spesimen TA511, TA538, TA565, TA592 dan TO511, TO538, TO565, TO592 hanya sedikit atau tidak signifikan. Sehingga pengurangan massanya juga tidak berbeda jauh. Semakin tinggi temperatur *tempering*, pengurangan massa akibat uji keausan juga

semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur *tempering* akan menghasilkan sifat ketahanan aus yang semakin rendah dengan pengurangan massa yang semakin tinggi. Berdasarkan hasil uji keausan, urutan spesimen yang memiliki sifat tahan aus paling tinggi ke paling rendah adalah HA830, HO830, TA511, TO511, TA538, TO538, TA565, TO565, TA592, TO592, dan TP material substitusi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian percobaan yang telah dilakukan, ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil, diantaranya :

1. Semakin cepat laju pendinginan, maka menghasilkan kekerasan yang semakin besar.
2. Semakin tinggi temperatur *tempering*, maka menghasilkan material yang semakin lunak. Secara berurutan material hasil *tempering* yang memiliki kekerasan tertinggi hingga terendah adalah HA830, HO830, TA511, TO511, TA538, TO538, TA565, TO565, TA592, TO592.

5.2 Saran

1. Pemilihan material untuk komponen poros pompa harus sesuai standart yang ada.
2. Melakukan serangkaian proses perlakuan panas dengan menggunakan parameter yang sesuai.
3. Media pendingin yang dipakai sebaiknya disesuaikan dengan material yang dipakai untuk menghindari resiko dari *crack*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 1991. *ASM Handbook Volume 4: Heat Treatment*. USA: ASM International.
- _____. 2000. *ASTM G99 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. USA : ASM International.
- _____. 2017. *ASTM E92 Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. USA : ASM International.
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Alexander, Sriatie Djaprie. 1990. *Dasar Metalurgi untuk Rekayasawan*. Jakarta: Gramedia.
- Azizi, Muhamad Junda. 2018. *Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Tempering Terhadap Kekerasan Baja Assab 705 yang Dihardening untuk Aplikasi Poros Pompa Multistage*. Surabaya : ITS.
- Bhadeshia. 1999. *The Bainite Transformation: Unresolved Issues*. Materials Science and Engineering A273–275, 58 – 66.
- Binudi, Rahardjo, dkk. 2014. *Pengaruh Unsur Ni, Cr dan Mn Terhadap Sifat Mekanik Baja Kekuatan Tinggi Berbasis Laterit*. Tangerang : Pusat Penelitian Metalurgi LIPI.
- Callister, William. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Chambell, F.C. 2008. *Element of Metallurgy and Engineering*. New York: ASM International.
- Fan, Huiji, et al. 2018. *Effect of Tempering Process on Microstructure and Mechanical Properties of G18NiMoCr3-6 Cast Steel*. Materials Science and Engineering 394, 1 - 6.
- H. J. Spies, G. Munch, and A. Prewetz. 1977. *Möglichkeiten der Optimierung der Auswahl vergutbarer Baustahle durch*

- Berechnung der Hart-und-vergutbarkeit.* Neue Hütte, 8(22), 443–445.
- Herwandi, dkk. 2005. *Analisa Perubahan Struktur Akibat Heat Treatment pada Logam ST, FC Dan Ni-Hard 4.* Jurnal teknik mesin, vol 7, 2 : 57 - 62.
- Horn, R.M., dkk. 1978. *Mechanisms of Tempered Martensite Embrittlement in Low Alloy Steels.* Metallurgical Transactions A, Vol 9A, 1039 - 1053.
- Isnauri, Ikhwanyah. 2012. *Analisa PengaruhBeban Terhadap Laju Keausan Al-Si Alloy dengan Metode Pin on Disk Test.* Sumatra: Universitas Sumatera Utara
- Kawata, H., et al. 2006. *Crystallography Of Ausformed Upper Bainite Structure In Fe-9ni-C Alloys.* Materials Science and Engineering A 438–440, 140–144.
- Kitahara, Hiromoto, et al. 2006. *Crystallographic Features Of Lath Martensite In Low-Carbon Steel.* Acta Materialia 54, 1279–1288.
- Krauss, George. 1999. *Martensite in Steel: Strength and Structure.* Materials Science and Engineering A273–275, 40-57
- LI Hong-ying, et al. 2013. *Effect of Tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 6150 Steel.* China : Central South University.
- Mukherjee, Monideepa, et al. 2012. *Prediction Of Hardness Of The Tempered Martensitic Rim Of Tmt Rebars.* Materials Science and Engineering A 543, 35– 43.
- Nurjaman, Fajar. 2012. *Pembuatan Grinding Ball dari Material White Cast Iron dengan Penambahan Chromium, Molybdenum, Vanadium, dan Boron sebagai Unsur Pदान Pembentuk Karbida.* Depok: Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- Prasetya, Dony. 2017. *Analisis Pengaruh Variasi Waktu Tahan Tempering dan Temperatur Tempering Terhadap Kekerasan Material Crossbar yang Dihardening Sebagai Solusi Kegagalan pada Crossbar.* Surabaya: ITS.

- Purboputro, Ilmu Pramuko. 2009. *Peningkatan Kekakuan Pegas Daun Dengan Cara Quenching*. Jurnal Media Mesin, Vol 10, 1 : 15-21.
- Rakasiwi, Gale Cyindie. 2017. *Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Media Pendingin Proses Hardening pada Sifat Kekerasan Crossbar Sebagai Solusi Kegagalan Crossbar PT. Semen Indonesia Tbk*. Surabaya : ITS.
- Ramadhan, Yudha Prakasa Putra. 2017. *Analisis Pengaruh Variasi Waktu Tahan dan Media Pendingin Proses Hardening pada Sifat Kekerasan Baja AISI 8655 Sebagai Solusi Kegagalan pada Hammer Crusher*. Surabaya : ITS.
- Ratia, V. 2015. *Behavior of Martensitic Wear Resistant Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions*. Tampere: Tampere University of Technology.
- Saefuloh, Iman, dkk. 2018. *Pengaruh Proses Quenching dan Tempering Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah dengan Paduan Laterit*. Jurnal Teknik Mesin Untirta, Vol 4, 1 : 56 - 64.
- Sawitri, Dyah, dkk. 2015. *Perancangan Mekanik Mesin Poles Untuk Proses Metalografi Bahan Menggunakan Motor Listrik*. Surabaya : ITS.
- Suherman. 1999. *Ilmu Logam II*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Suherman, Wahid. 2003. *Ilmu Logam I*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Suherman, Wahid. 2001. *Perlakuan Panas*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sunandrio, Hadi, dkk. 2014. *Analisis Kegagalan Shaft Pompa Submersible pada Unit Pengeboran Minyak Bumi Failure Analysis Of Pump Shaft Submersible On Oil Drilling Unit*. Jurnal M.I. Mat. Konst, Vol. 14, 1 : 37 – 45.
- Syahri, Budi. 2017. *Analisis Kekerasan Baja ASSAB 705 yang Diberi Perlakuan Panas Hardening dan Media Pendingin*. Padang: Universitas Negeri Padang.

- Thehning, Karl Erik. 1984. *Steel and Its Heat treatment*. Delhi: Replika Press Pvt Ltd.
- Thiele JD, et al. 2000. *Effect of Cutting-Edge Geometry and Workpiece Hardness on Surface Residual Stresses in Finish Hard Turning of AISI 52100 Steel*. *ASME J. Manuf. Sc. & Eng.*, 642-649.
- Totten, George E. 2006. **Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies**. USA : Taylor & Francis Group LLC.
- Yani, Rina Dwi, dkk. 2008. *Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro Logam ST 60*. Pontianak: Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Pontianak.
- Yuswono. 2004. *Pembuatan Perunggu (Paduan Cu-10%Sn) Berpori untuk Komponen Bantalan Pelumas Sendiri*. Serpong: Prosiding Pertemuan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan.

LAMPIRAN

1. Hasil uji komposisi material yang gagal

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

Method: Fe-10-F IARM 200C
 Comment: Low alloy Steel
 Sample Name: ASSAB
 Quality: Element concentration
 10/11/2018 3:03:40 PM

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.416	0.275	0.951	0.0322	0.0343	0.0059	< 0.0020	0.0034
2	0.400	0.272	0.936	0.0309	0.0321	0.0057	< 0.0020	0.0039
3	0.398	0.273	0.932	0.0315	0.0296	0.0050	< 0.0020	0.0035
< x > (3)	0.405	0.273	0.940	0.0315	0.0320	0.0056	< 0.0020	0.0036
sd	0.0096	0.0014	0.0103	0.00065	0.0023	0.00047	0.00000	0.00024
rsd	2.4	0.5	1.1	2.1	7.3	8.4	0.0	6.8

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0700	< 0.0015	0.0031	< 0.0010	0.0017	0.00072	< 0.0100	< 0.0030
2	0.0700	0.0016	0.0031	< 0.0010	0.0016	0.00092	< 0.0100	< 0.0030
3	0.0700	0.0018	0.0032	< 0.0010	0.0018	0.00068	< 0.0100	< 0.0030
< x > (3)	0.0700	0.0016	0.0031	< 0.0010	0.0017	0.00077	< 0.0100	< 0.0030
sd	0.00003	0.00015	0.00005	0.00000	0.00008	0.00013	0.00000	0.00000
rsd	0.0	8.9	1.6	0.0	4.8	17.1	0.0	0.0

	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	B	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0023	0.0093	< 0.0015	< 0.0040	0.00062	< 0.0030	0.00047	< 0.0020
2	0.0022	0.0104	< 0.0015	< 0.0040	0.00037	< 0.0030	0.00048	< 0.0020
3	0.0020	0.0097	< 0.0015	< 0.0040	0.00066	< 0.0030	0.00053	< 0.0020
< x > (3)	0.0022	0.0096	< 0.0015	< 0.0040	0.00055	< 0.0030	0.00049	< 0.0020
sd	0.00000	0.00053	0.00000	0.00000	0.00016	0.00000	0.00003	0.00000
rsd	7.8	5.4	0.0	0.0	28.2	0.0	5.8	0.0

	La	Fe	Sb	Te				
	%	%	%	%				
1	< 0.0010	98.2	< 0.0010	0.0014				
2	< 0.0010	98.2	< 0.0010	0.0021				
3	< 0.0010	98.2	< 0.0010	0.0021				
< x > (3)	< 0.0010	98.2	< 0.0010	0.0019				
sd	0.00000	0.0231	0.00000	0.00040				
rsd	0.0	0.0	0.0	21.1				

Tanda tangan



2. ASTM A29

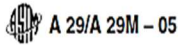


TABLE 2 Grade Designations and Chemical Compositions of Alloy Steel Bars

Note: 1—Small quantities of certain elements are present in alloy steels, which are not specified or required. These elements are considered as incidental and may be present to the following maximum amounts: copper, 0.35 %; nickel, 0.25 %; chromium, 0.20 % and molybdenum, 0.06 %.

Note: 2—Where minimum and maximum sulfur content is shown it is indicative of resulfurized steel.

Note: 3—The chemical ranges and limits shown in Table 2 are produced to product analysis tolerances shown in Table 6.

Note: 4—Standard alloy steels can be produced with a lead range of 0.15–0.35 %. Such steels are identified by inserting the letter “L” between the second and third numerals of the AISI number, for example, 41 L 40. A cast or heat analysis is not determinable when lead is added to the ladle stream.

Grade Designation	Heat Chemical Ranges and Limits, %							
	Carbon	Manganese	Phosphorus, max	Sulfur, max	Silicon ^a	Nickel	Chromium	Molybdenum
1330	0.28–0.33	1.60–1.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	...
1335	0.33–0.38	1.60–1.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	...
1340	0.38–0.43	1.60–1.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	...
1345	0.43–0.48	1.60–1.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	...
4012	0.09–0.14	0.75–1.00	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.15–0.25
4023	0.20–0.25	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.20–0.30
4024	0.20–0.25	0.70–0.90	0.035	0.035–0.050	0.15 to 0.35	...	...	0.20–0.30
4027	0.25–0.30	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.20–0.30
4028	0.25–0.30	0.70–0.90	0.035	0.035–0.050	0.15 to 0.35	...	...	0.20–0.30
4032	0.30–0.35	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.20–0.30
4037	0.35–0.40	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.20–0.30
4042	0.40–0.45	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.20–0.30
4047	0.45–0.50	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.20–0.30
4118	0.18–0.23	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.40–0.60	0.08–0.15
4120	0.18–0.23	0.90–1.20	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.40–0.60	0.13–0.20
4121	0.18–0.23	0.75–1.00	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.45–0.65	0.20–0.30
4130	0.28–0.33	0.40–0.60	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.80–1.10	0.15–0.25
4135	0.33–0.38	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.80–1.10	0.15–0.25
4137	0.35–0.40	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.80–1.10	0.15–0.25
4140	0.38–0.43	0.75–1.00	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.80–1.10	0.15–0.25
4142	0.40–0.45	0.75–1.00	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.80–1.10	0.15–0.25
4145	0.43–0.48	0.75–1.00	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.80–1.10	0.15–0.25
4147	0.45–0.50	0.75–1.00	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.80–1.10	0.15–0.25
4150	0.48–0.53	0.75–1.00	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.80–1.10	0.15–0.25
4161	0.56–0.64	0.75–1.00	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	0.70–0.90	0.25–0.35
4320	0.17–0.22	0.45–0.65	0.035	0.040	0.15 to 0.35	1.65–2.00	0.40–0.60	0.20–0.30
4340	0.38–0.43	0.60–0.80	0.035	0.040	0.15 to 0.35	1.65–2.00	0.70–0.90	0.20–0.30
E4340	0.38–0.43	0.65–0.85	0.025	0.025	0.15 to 0.35	1.65–2.00	0.70–0.90	0.20–0.30
4419	0.18–0.23	0.45–0.65	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.45–0.60
4422	0.20–0.25	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.35–0.45
4427	0.24–0.29	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	...	...	0.35–0.45
4615	0.13–0.18	0.45–0.65	0.035	0.040	0.15 to 0.35	1.65–2.00	...	0.20–0.30
4620	0.17–0.22	0.45–0.65	0.035	0.040	0.15 to 0.35	1.65–2.00	...	0.20–0.30
4621	0.18–0.23	0.70–0.90	0.035	0.040	0.15 to 0.35	1.65–2.00	...	0.20–0.30
4626	0.24–0.29	0.45–0.65	0.035	0.040	0.15 to 0.35	0.70–1.00	...	0.15–0.25

3. Standart ASSAB 705

GENERAL

ASSAB 705 is machinery steel with unique machinability. ASSAB 705 is supplied as quenched and tempered that enhances hardness and toughness distribution.

Typical analysis %	C 0.40	Mn 0.70	Cr 0.80	Ni 1.80	Mo 0.25
Reference standard	AISI 4340, DIN 34CrNiMo6, W.nr. 1.6582, BS EN24, AFNOR 35NCD6, JIS SNCM 439				
Delivery condition	Quenched and tempered to 293-352HB				

APPLICATIONS

ASSAB 705 is an alloyed machinery steel with good hardenability also in large cross sections. It combines high strength with best toughness.

ASSAB 705 is intended for use in the as-delivered condition, requiring no further heat treatment. However, it can be oil, water or polymer hardened to higher hardness and higher mechanical properties if required. ASSAB 705 is suitable for induction hardening and can also be nitrided or tufrided to a surface hardness of 600-650 Vickers.

ASSAB 705 is not suitable for welding but can be repair welded when certain precautions are taken.

Typical applications include high strength machine parts, spindles, high strength bolts and studs, gears, axle shaft, crankshafts, connecting rods, arbors etc.

PROPERTIES

MECHANICAL DATA

QUENCHED AND TEMPERED

Mechanical Properties	Typical values under supplied condition
Yield strength, Rp 0.2, N/mm ²	≥ 850
Tensile strength, N/mm ²	≥ 980
Elongation, A _g , %	≥ 14
Reduction of area, Z, %	≥ 45
Impact strength (Charpy-V at -23°C), J/cm ²	≥ 55



Components (main shafts) for palm oil extract



Car components

4. Perhitungan Kekerasan berdasarkan Equation Spies

Temperatur = 511°C		Air		Oli	
Unsur	Faktor pengali	Kandungan	Hardness	Kandungan	Hardness
After hardening	2,84	53,33	151,46	49,11	139,47
C	75	0,38	28,33	0,38	28,33
Si	0,78	0,17	0,13	0,17	0,13
Mn	14,24	0,60	8,54	0,60	8,54
Cr	14,77	0,70	10,34	0,70	10,34
Mo	128,22	0,20	25,64	0,20	25,64
V	54	0,00	0,00	0,00	0,00
Temperatur tempering	0,55	511	281,05	511	281,05
	435,66		435,66		435,66
Kekerasan (HB)			378,79	366,80	
Kekerasan (HV)			399,79	387,33	

$$\begin{aligned}
 HB &= 2,84 Hh + 75 (\%C) - 0,78 (\%Si) + 14,24 (\%Mn) \\
 &\quad + 14,77 (\%Cr) + 128,22 (\%Mo) - 54 (\%V) \\
 &\quad - 0,55 Tt + 435,66
 \end{aligned}$$

a. Air

$$\begin{aligned}
 HB &= (2,84 \times 53,33) + 75 (0,38) - 0,78 (0,17) \\
 &\quad + 14,24 (0,60) + 14,77 (0,70) + 128,22 (0,20) \\
 &\quad - 54 (0) - (0,55 \times 511) + 435,66 \\
 &= 378,79 HB
 \end{aligned}$$

b. Oli

$$\begin{aligned}
 HB &= (2,84 \times 49,11) + 75 (0,38) - 0,78 (0,17) \\
 &\quad + 14,24 (0,60) + 14,77 (0,70) + 128,22 (0,20) \\
 &\quad - 54 (0) - (0,55 \times 511) + 435,66 \\
 &= 366,80 HB
 \end{aligned}$$

Temperatur = 538°C		Air		Oli	
Unsur	Faktor pengali	Kandungan	Hardness	Kandungan	Hardness
After hardening	2,84	53,33	151,46	49,11	139,47
C	75	0,38	28,33	0,38	28,33
Si	0,78	0,17	0,13	0,17	0,13
Mn	14,24	0,60	8,54	0,60	8,54
Cr	14,77	0,70	10,34	0,70	10,34
Mo	128,22	0,20	25,64	0,20	25,64
V	54	0,00	0,00	0,00	0,00
Temperatur tempering	0,55	538	295,90	538	295,90
	435,66		435,66		435,66
Kekerasan (HB)			363,94	351,95	
Kekerasan (HV)			384,16	370,95	

$$HB = 2,84 Hh + 75 (\%C) - 0,78 (\%Si) + 14,24 (\%Mn) + 14,77 (\%Cr) + 128,22 (\%Mo) - 54 (\%V) - 0,55 Tt + 435,66$$

a. Air

$$HB = (2,84 \times 53,33) + 75 (0,38) - 0,78 (0,17) + 14,24 (0,60) + 14,77 (0,70) + 128,22 (0,20) - 54 (0) - (0,55 \times 538) + 435,66 = 363,94 HB$$

b. Oli

$$HB = (2,84 \times 49,11) + 75 (0,38) - 0,78 (0,17) + 14,24 (0,60) + 14,77 (0,70) + 128,22 (0,20) - 54 (0) - (0,55 \times 538) + 435,66 = 351,95 HB$$

Temperatur = 565°C		Air		Oli	
Unsur	Faktor pengali	Kandungan	Hardness	Kandungan	Hardness
After hardening	2,84	53,33	151,46	49,11	139,47
C	75	0,38	28,33	0,38	28,33
Si	0,78	0,17	0,13	0,17	0,13
Mn	14,24	0,60	8,54	0,60	8,54
Cr	14,77	0,70	10,34	0,70	10,34
Mo	128,22	0,20	25,64	0,20	25,64
V	54	0,00	0,00	0,00	0,00
Temperatur tempering	0,55	565	310,75	565	310,75
	435,66		435,66		435,66
Kekerasan (HB)			349,09	337,10	
Kekerasan (HV)			368,09	355,24	

$$\begin{aligned}
 HB &= 2,84 Hh + 75 (\%C) - 0,78 (\%Si) + 14,24 (\%Mn) \\
 &\quad + 14,77 (\%Cr) + 128,22 (\%Mo) - 54 (\%V) \\
 &\quad - 0,55 Tt + 435,66
 \end{aligned}$$

a. Air

$$\begin{aligned}
 HB &= (2,84 \times 53,33) + 75 (0,38) - 0,78 (0,17) \\
 &\quad + 14,24 (0,60) + 14,77 (0,70) + 128,22 (0,20) \\
 &\quad - 54 (0) - (0,55 \times 565) + 435,66 \\
 &= 349,09 HB
 \end{aligned}$$

b. Oli

$$\begin{aligned}
 HB &= (2,84 \times 49,11) + 75 (0,38) - 0,78 (0,17) \\
 &\quad + 14,24 (0,60) + 14,77 (0,70) + 128,22 (0,20) \\
 &\quad - 54 (0) - (0,55 \times 565) + 435,66 \\
 &= 337,10 HB
 \end{aligned}$$

Temperatur = 592°C		Air		Oli	
Unsur	Faktor pengali	Kandungan	Hardness	Kandungan	Hardness
After hardening	2,84	53,33	151,46	49,11	139,47
C	75	0,38	28,33	0,38	28,33
Si	0,78	0,17	0,13	0,17	0,13
Mn	14,24	0,60	8,54	0,60	8,54
Cr	14,77	0,70	10,34	0,70	10,34
Mo	128,22	0,20	25,64	0,20	25,64
V	54	0,00	0,00	0,00	0,00
Temperatur tempering	0,55	592	325,60	592	325,60
	435,66		435,66		435,66
Kekerasan (HB)			334,24	322,25	
Kekerasan (HV)			351,87	339,66	

$$HB = 2,84 Hh + 75 (\%C) - 0,78 (\%Si) + 14,24 (\%Mn) + 14,77 (\%Cr) + 128,22 (\%Mo) - 54 (\%V) - 0,55 Tt + 435,66$$

a. Air

$$HB = (2,84 \times 53,33) + 75 (0,38) - 0,78 (0,17) + 14,24 (0,60) + 14,77 (0,70) + 128,22 (0,20) - 54 (0) - (0,55 \times 592) + 435,66 = 334,24 HB$$

b. Oli

$$HB = (2,84 \times 49,11) + 75 (0,38) - 0,78 (0,17) + 14,24 (0,60) + 14,77 (0,70) + 128,22 (0,20) - 54 (0) - (0,55 \times 592) + 435,66 = 322,25 HB$$

5. Nilai eror perhitungan

Spesimen	Kekerasan permukaan hasil perhitungan	Kekerasan permukaan hasil eksperimen
TA511	406,39	387 ± 5
TO511	393,97	377,33 ± 7,77
TA538	391	374,33 ± 4,51
TO538	377,69	368,67 ± 2,52
TA565	374,5	350 ± 7,94
TO565	362,18	339 ± 7
TA592	358,95	327,33 ± 7,57
TO592	346,42	320,33 ± 7,77

6. Perhitungan kekerasan permukaan

Spesimen	Kekerasan (HV)			
	1	2	3	Rata-Rata
TP (material gagal)	167	169	176	170,67
TP (material substitusi)	289	270	266	275,00
HA830	575	563	559	565,67
HO830	502	500	497	499,67
TA511	392	387	382	387,00
TO511	386	375	371	377,33
TA538	379	374	370	374,33
TO538	371	369	366	368,67
TA565	359	347	344	350,00
TO565	346	339	332	339,00
TA592	336	324	322	327,33
TO592	329	318	314	320,33

7. XRD peak list BCT (Martensit)

Name and formula

Reference code: 00-044-1290

Compound name: Carbon Iron

Common name: martensite

PDF index name: Carbon Iron

Empirical formula: $C_{0.05}Fe_{1.95}$

Chemical formula: $C_{0.055}Fe_{1.945}$

Crystallographic parameters

Crystal system: Tetragonal

Space group: I4/mmm

Space group number: 139

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	0	1	2,04820	44,183	100,0
2	1	1	0	2,02130	44,803	49,0
3	0	0	2	1,46830	63,285	7,0
4	2	0	0	1,42930	65,222	12,0
5	1	1	2	1,18800	80,842	11,0
6	2	1	1	1,17220	82,164	20,0
7	2	0	2	1,02420	97,545	6,0
8	2	2	0	1,01070	99,307	3,0
9	1	0	3	0,92620	112,543	5,0
10	3	0	1	0,90640	116,390	5,0
11	3	1	0	0,90410	116,861	7,0
12	2	2	2	0,83260	135,389	4,0
13	2	1	3	0,77730	164,610	10,0

8. XRD peak list Karbida-Fe

Name and formula

Reference code:	01-089-2005
Compound name:	Iron Carbide
ICSD name:	Iron Carbide
Empirical formula:	CFe ₃
Chemical formula:	Fe ₃ C

Crystallographic parameters

Crystal system:	Hexagonal
Space group:	P6322
Space group number:	182

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	0	0	4,12834	21,507	0,7
2	1	0	1	2,99578	29,799	1,5
3	1	1	0	2,38350	37,711	20,5
4	0	0	2	2,17700	41,444	22,6
5	1	1	1	2,09073	43,238	100,0
6	1	0	2	1,92566	47,159	0,1
7	2	0	1	1,86518	48,786	0,2
8	1	1	2	1,60743	57,268	13,9
9	2	1	0	1,56037	59,164	0,1
10	2	0	2	1,49789	61,896	0,1
11	2	1	1	1,46889	63,257	0,1
12	3	0	0	1,37611	68,079	12,3
13	3	0	1	1,31214	71,897	0,1
14	2	1	2	1,26824	74,800	0,1
15	1	1	3	1,23961	76,838	10,1
16	2	2	0	1,19175	80,535	1,1
17	3	0	2	1,16321	82,939	9,1
18	2	2	1	1,14947	84,155	7,0
19	3	1	1	1,10735	88,154	0,1

9. XRD peak list ferrit

Name and formula

Reference code: 01-087-0721

Mineral name: Iron
Compound name: Iron
Common name: Iron - alpha
ICSD name: Iron

Empirical formula: Fe
Chemical formula: Fe

Crystallographic parameters

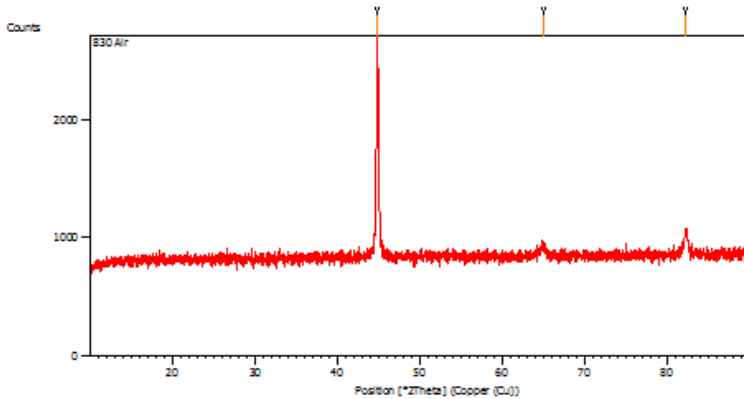
Crystal system: Cubic
Space group: Im-3m
Space group number: 229

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	0	2,02671	44,677	100,0
2	2	0	0	1,43310	65,028	11,5
3	2	1	1	1,17012	82,342	17,4

10. Perhitungan Regangan Mikrostruktur

a. HA830



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.8002	1858.28	0.2175	2.02308	100.00
65.0312	92.99	0.6691	1.43422	5.00
82.3136	200.89	0.4015	1.17142	10.81

$$FWHM = 0,2175 \ 2\theta$$

$$Position = 44,8002 \ 2\theta$$

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

$$\beta_{(2\theta)} = 0,2175 \times \frac{\pi}{180}$$

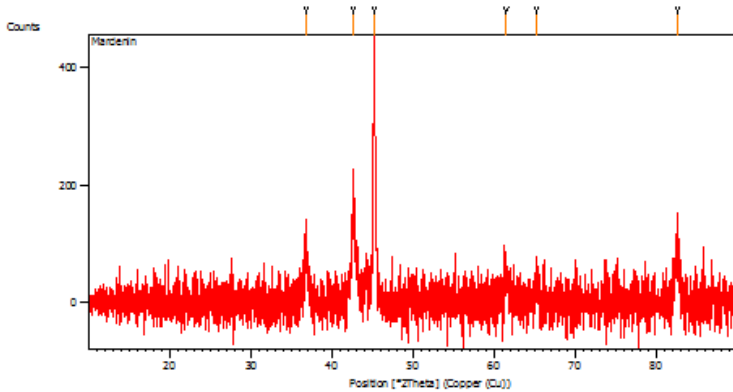
$$\beta_{(2\theta)} = 3,7845 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

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

$$\varepsilon = \frac{3,7845 \times 10^{-3} \text{ rad}}{4} \times \frac{\cos 22,4001}{\sin 22,4001}$$

$$\varepsilon = 2,295 \times 10^{-3}$$

b. HO830



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
36.7972	97.06	0.2342	2.44257	22.29
42.6276	180.58	0.2676	2.12101	41.47
45.1962	435.43	0.2007	2.00627	100.00
61.5190	39.97	0.4015	1.50740	9.18
65.3310	66.04	0.5353	1.42837	15.17
82.5925	105.39	0.2007	1.16817	24.20

$$FWHM = 0,2007 \ 2\theta$$

$$Position = 44,1962 \ 2\theta$$

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

$$\beta_{(2\theta)} = 0,2007 \times \frac{\pi}{180}$$

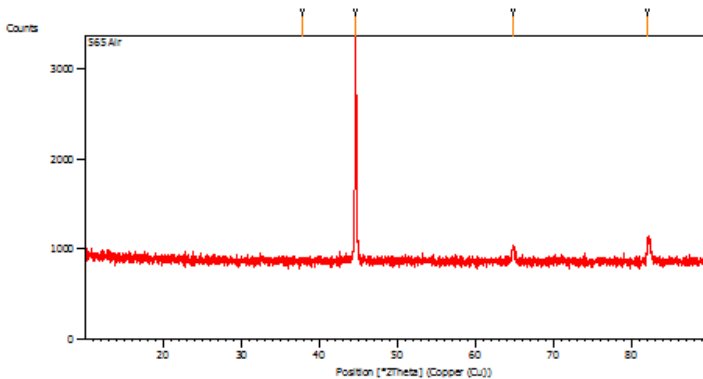
$$\beta_{(2\theta)} = 3,49218 \times 10^{-3} \text{rad}$$

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

$$\varepsilon = \frac{3,49218 \times 10^{-3} \text{rad}}{4} \times \frac{\cos 22,5981}{\sin 22,5981}$$

$$\varepsilon = 2,098 \times 10^{-3}$$

c. TA565



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.9465	2450.18	0.1224	2.01516	100.00
45.0854	1458.21	0.0816	2.01427	59.51
65.1649	158.34	0.4080	1.43042	6.46
82.4238	317.05	0.2040	1.16916	12.94

$$FWHM = 0,1224 \ 2\Theta$$

$$Position = 44,9465 \ 2\Theta$$

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

$$\beta_{(2\theta)} = 0,1224 \times \frac{\pi}{180}$$

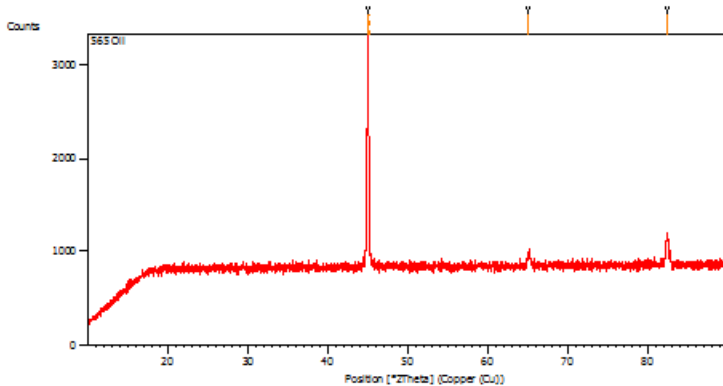
$$\beta_{(2\theta)} = 2,12976 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

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

$$\varepsilon = \frac{2,12976 \times 10^{-3} \text{ rad}}{4} \times \frac{\cos 22,47325}{\sin 22,47325}$$

$$\varepsilon = 1,287 \times 10^{-3}$$

d. TO565



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
37.8742	29.09	0.4015	2.37555	1.18
44.5950	2456.04	0.1171	2.03190	100.00
64.8649	150.07	0.2676	1.43750	6.11
82.1237	271.67	0.1338	1.17365	11.06

$$FWHM = 0,1171 \ 2\Theta$$

$$Position = 44,595 \ 2\Theta$$

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

$$\beta_{(2\theta)} = 0,1171 \times \frac{\pi}{180}$$

$$\beta_{(2\theta)} = 2,03754 \times 10^{-3} rad$$

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

$$\varepsilon = \frac{2,03754 \times 10^{-3} rad}{4} \times \frac{\cos 22,2975}{\sin 22,2975}$$

$$\varepsilon = 1,242 \times 10^{-3}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, kakak, dan ponakan 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. Bapak Tari dan Bapak Chanan selaku laboran di Laboratorium Manufaktur dan Metalurgi yang membantu kelancaran penggunaan peralatan pendukung Tugas Akhir penulis.
3. Rika Aprilia, Novita Astri, Aldi, Reni Fatmawati, Pras, Ria Nurul dan saudara sepupu penulis domisili Surabaya lainnya, yang seringkali memberikan traktiran, berbagi pengalaman, teman jalan-jalan, serta berbagi keluh-kesah sejak penulis jauh dari orangtua.
4. Teman-teman SMA (Rena, Reni, Lintang, Fanny, Nala, Rully) yang telah mau mendengarkan keluh-kesah, curhatan tidak penting, dan memberikan dukungan kepada penulis dari zaman awal merantau hingga saat ini.
5. Teman-teman kuliah (Rena, Bintang, Firen) yang telah menemani dan senantiasa mendukung penulis semasa kuliah.
6. Mbak Ulik, teman dari kakak penulis, yang senantiasa mendengarkan curhatan serta tangis ketika penulis sedang galau menjalani hidup ini.
7. Asarah yang selalu mau mendengarkan keluh-kesah, dukungan, serta bahan ghibahan dari dulu hingga saat ini.
8. Teman-teman Hijabers (Izah, Salsa, Nala, Nia, Rere, Hanisa, Raras) yang mau mendengarkan dan berbagi bahan ghibahan selama ini.

9. Teman-teman (Lutfi, Aldi, Rafiandy, Putro, Ihsan) yang selalu mengganggu serta memberikan hiburan selama masa kuliah ini.
10. Teman-teman *Metal Revorn* (Ghazi, Iqbal, Bayuzen, Gerry, Abrar, Ambay, Ronald, Rafi) yang selalu berbagi motivasi dan bantuan selama pengerjaan Tugas Akhir.
11. Mas Andika, Mas Redy, Mas Odi, Mbak Asia, dan Mbak Qory, Mas Yudha, Mas Dony, Junda, Opal yang telah berbagi pengetahuan tentang pengerjaan Tugas Akhir.
12. Seluruh mahasiswa Teknik Material serta keluarga MT17 yang penulis sayangi, yang telah menemani dan memberikan banyak pengalaman berharga selama jenjang perkuliahan ini.
13. IMAC dan HMMT yang telah memberikan wadah bagi penulis untuk mengembangkan diri.
14. Seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan.

Surabaya, Juni 2019
Penulis

Rosa Amalia Dwi Andika
0251154000026

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di kota Gresik pada tanggal 8 Januari 1997. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan Kasun dan Sri Sedianingsih. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Kedungsumber, SMPN 1 Balongpanggung, dan SMAN 2 Surabaya. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Material Intstitut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi, pelatihan, dan seminar. Penulis pernah menjabat sebagai staff BSO KWU HMMT FTI-ITS 2016/2017, Bendahara BSO KWU HMMT FTI-ITS 2017/2018, staff ahli di Material Advantage Student Chapter 2017/2018. Selain itu penulis juga pernah mengikuti kepanitiaan Gerigi 2016 dan staff Medcons di Young Engineers & Scientist Summit 2017.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT Krakatau Steel pada bulan Juli-Agustus 2018. Selama kerja praktek penulis mendalami topik terkait Analisis Penyebab *Out Of Mechanical Properties* Pada *Coil* Sampel Nomor AAS721 Divisi *Hot Strip Mill* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk.

Tugas akhir yang diambil penulis dalam bidang Metalurgi Manufaktur berjudul “Analisis Pengaruh Variasi Media Pendingin pada *Hardening* dan Temperatur *Tempering* Terhadap Kekerasan Baja AISI 4340 untuk Aplikasi Poros Pompa *Multistage*.”

Email : rosaamaliada@gmail.com

Telp : +6281554799353

(Halaman ini sengaja dikosongkan)