

SKRIPSI

**ANALISIS SIFAT KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 4140 AKIBAT
PROSES HARDENING PADA MATERIAL**



Disusun oleh:

**NAMA : RAYNHARD NENO
NIM : 1811109**

**PROGRAM STUDI
TEKNIK MESIN S-1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2022**

LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI

**ANALISIS SIFAT KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 4140 AKIBAT
PROSES HARDENING PADA MATERIAL**



Disusun Oleh:

Nama : Raynard Neno
NIM : 1811109
Program Studi : Teknik Mesin S-1
Fakultas : Teknologi Industri

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Mesin S-1



Dr. I Komang Astana Widi, ST., MT
NIP.Y.1030400406

Diperiksa/Disetujui
Dosen Pembimbing



Ir. I Wayan Sujana, MT
NIP. 195812311989031012

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Raynhard Neno
NIM : 1811109
Program Studi : Teknik Mesin S-1
Fakultas : Teknologi Industri

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi saya yang berjudul “**Analisis Sifat Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja AISI 4140 Akibat Proses Hardening Pada Material**” adalah skripsi hasil karya sendiri, bukan menjiplak atau menduplikat serta tidak mengutip atau menyadur sebagian atau sepenuhnya dari hasil karya orang lain kecuali yang telah disebutkan dari sumber aslinya.

Malang, Juli 2022
Yang membuat pernyataan

Raynhard Neno

LEMBAR ASISTENSI LAPORAN SKRIPSI

Nama : Raynhard Neno
NIM : 1811109
Jurusan : Teknik Mesin S-1
Fakultas : Teknologi Industri Dosen
Pembimbing : Ir. I Wayan Sujana, M.T.
Judul Skripsi : ANALISIS SIFAT KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKROBAJA
AISIS 4140 AKIBAT PROSES HARDENING PADA MATERIAL
Nilai :

No.	Tanggal	Kegiatan	Paraf Dosen	Paraf Mahasiswa
1.		Diskusi Pengajuan Judul		
2.		Persetujuan Judul Oleh Koordinator Bidang Ilmu dan Dosen Pembimbing		
3.		Penyusunan Proposal Skripsi BAB I, II, dan III		
4.		Perbaikan Proposal Skripsi BAB I, II, dan III		
5.		Persetujuan Proposal Skripsi BAB I, II, dan III		
6.		Seminar Proposal Skripsi BAB I, II, dan III		
7.		Penyusunan Laporan Skripsi BAB IV dan V		
8.		Perbaikan Laporan Skripsi BAB IV dan V		
9.		Persetujuan Laporan Skripsi Bab IV dan V		
10.		Seminar Hasil Laporan Skripsi BAB I, II, III, IV dan V		

Diperiksa dan Disetujui
Dosen Pembimbing

Ir. I Wayan Sujana, M.T. NIP.

195812311989031012

**BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin S-1 tersebut dibawah ini:

Nama : Raynhard Neno

NIM : 1811109

Jurusan : Teknik Mesin S-1

Judul Skripsi : ANALISIS SIFAT KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI
4140 AKIBAT PROSES HARDENING PADA MATERIAL

Dipertahankan di Hadapan Tim Ujian Skripsi Jenjang Program Strata Satu (S-1)

Hari\Tanggal :Selasa 9 Agustus 2022

Dengan Nilai :.....

Panitia Majelis Penguji Skripsi

Ketua

Prodi Teknik Mesin S-1



Dr. I Komang Astana Widi, ST., MT.
NIP.Y.1030400405

Sekretaris

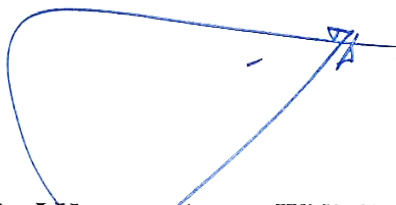
Prodi Teknik Mesin S-1



Febi Rahmadiano, ST., MT.
NIP.Y.1031500490

Anggota Penguji

Penguji I



Dr. I Komang Astana Widi, ST., MT.
NIP.Y.1030400405

Penguji II



Rosadila Febritasari,ST.,MT
NIP.P. 1032200602

ABSTRAK

ANALISIS SIFAT KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 4140 AKIBAT PROSES HARDENING PADA MATERIAL

Raynhard Neno¹, Ir. I Wayan Sujana, MT²

Program Studi Teknik Mesin S-1 Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Nasional
Malang

Abstrak

Pendahuluan: Manusia membuat suatu inovasi untuk mengembangkan dan memenuhi kebutuhan perkembangan teknologi yang ada. Mereka memperbaiki sifat mekanik dan fisik dari logam yang dipakai sebagai kebutuhan pengembangan industri. Jenis logam yang biasa dipakai adalah baja karena jenisnya yang bervariasi, bersifat kuat, ketahanan aus yang tinggi dan sifat mampu bentuk yang tinggi, sehingga dengan sendirinya akan meningkatkan umur pakai komponen. Tujuan: untuk menganalisis sifat kekerasan dan struktur mikro baja AISI 4140 akibat proses hardening pada material. Metode: Penelitian yang bersifat pengembangan dan untuk mengetahui apakah ada pengaruh dari kombinasi berupa kekerasan dan struktur micro-vickers yang dilakukan pada spesimen uji baja paduan rendah AISI 4140 Hasil: Dari proses kombinasi antara *Carburizing* dan *Nitriding* yang dilakukan menggunakan fluidized bed furnace dapat di evaluasi dengan melakukan pengujian kekerasan dengan maksud untuk mengetahui kedalaman difusi permukaan dengan menggunakan metode pengujian micro-vickers. Kesimpulan: Penambahan temperatur saat proses *Carburizing* dan juga menggunakan media pendingin udara menambah kekerasan yang sangat spesifik dan nilai kekerasan permukaan lapisan yang paling tepi semakin tinggi. Dari perlakuan panas kombinasi karburasi dan nitridasi didapatkan kandungan karbon, ketebalana lapisan, dan juga nilai kekerasan semakin meningkat dalam bentuk data yang didapatkan dari pengujian yang dilakukan. Proses nitridasi berupa unsur dan lapisan nitrida hanya terlihat pada kombinasi karburasi 700°C dan nitridasi 500°C. Ketebalan lapisan dari setiap perlakuan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur karburasi. Akibat dari difusi karbon yang sangat baik dari pada difusi nitrogen.

Kata kunci: Sifat, struktur, baja AISI 4140, hardening.

Abstract

Introduction: Humans make constellations and innovations to develop and meet the needs of existing technological developments. They improve the mechanical and physical properties of metals used for industrial development. The type of metal that is commonly used is steel because of its varied types, strength, high wear resistance and high formability, which in itself will increase the service life of components. Objective: to analyze the hardness and microstructure of AISI 4140 steel due to the hardening process of the material. Method: Research that is developmental in nature and to determine whether there is an effect of the combination of carburizing and nitriding carried out on the low alloy steel test specimen AISI 4140 Results: From the combination process between Carburizing and Nitriding carried out using a fluidized bed furnace, it can be evaluated by testing the hardness with a view to knowing the depth of surface diffusion using the micro-Vickers test method. Conclusion: The addition of temperature during the carburizing process and also using air cooling media adds a very specific hardness and the surface hardness value of the outermost layer is getting higher. From the heat treatment of the combination of carburizing and nitriding, it was found that the carbon content, layer thickness, and also the hardness value were increasing in the form of data obtained from the tests carried out. The nitriding process in the form of elements and nitride layers is only seen in the combination of 700°C carburizing and 500 nitriding. The layer thickness of each treatment increased with increasing carburizing temperature. As a result of better carbon diffusion than nitrogen diffusion.

Keywords: Properties, structure, AISI 4140 steel, hardening.

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kepada Tuhan yang Maha Esa atas rahmat karunia, bimbingan, dan penyertaan-Nya selama ini. Dengan ketekunan dan juga pendampingan-Nya, saya sebagai mahasiswa Teknik Mesin S-1 Institut Teknologi Nasional Malang dapat menyelesaikan tugas akhir berupa skripsi dengan judul **"Analisis Sifat Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja AISI 4140 Akibat Proses Hardening Pada Material"** yang tentunya sebagai syarat kelulusan dan sebagai penerapan ilmu selama masa perkuliahan.

Penyusunan skripsi ini tentu tidak lepas dari adanya bantuan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu saya sebagai penyusun skripsi ini, ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Abraham Lomi, MSEE selaku Rektor Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang.
2. Ibu Dr. Ellysa Nursanti, ST. MT selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang.
3. Bapak Dr. I Komang Astana Widi, ST., MT sebagai Ketua Prodi Teknik Mesin S-1, Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang.
4. Bapak Ir. I Wayan Sujana, MT selaku Dosen Pembimbing Penyusunan Skripsi.
5. Bapak Ir. Teguh Rahardjo, MT sebagai Koordinator Bidang Metalurgi dan Material.
6. Kedua Orangtua yang selalu mendoakan dan mendukung penulis selama menempuh pendidikan di Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Malang.
7. Bapak dan Ibu dosen pengajar beserta karyawan di Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Malang atas segala bimbingan dan arahan selama penulis menempuh pendidikan.
8. Teman-teman angkatan 18 yang telah memberi dukungan dan semangat kepada penulis.
9. Sahabat dan teman-teman terdekat yang selalu mendukung dan membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi.

Penyusun menyadari sebagai manusia biasa, pasti tidak akan pernah bisa sempurna. Maka dari itu, masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Untuk itu penyusun mengharapkan kritik dan saran dari bapak/ibu dosen yang berguna untuk menyempurnakan isi skripsi ini. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penyusun maupun bagi pembaca dalam melakukan setiap penelitian dan studi.

Malang, Juli 2022
Yang membuat pernyataan



Raynhard Ne



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITIS	iii
BERITA ACARA	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.4.1 Tujuan Umum.....	2
1.4.2 Tujuan Khusus	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II DASAR TEORI	4
2.1 Penelitian Terkait.....	4
2.2 Konsep Teori Baja	5
2.2.1 Pengertian Baja.....	5
2.2.2 Jenis Baja	6
2.2.3 Pengaruh Unsur Baja Panduan	7
2.2.4 Struktur Mikro Baja	8
2.3 Konsep Teori Baja Panduan AISI 4140.....	12
2.3.1 Pengertian Baja Panduan AISI 4140	12
2.4 Konsep Teori Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>).....	14
2.4.1 Pengertian Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>).....	14
2.4.2 Klasifikasi Proses Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>).....	15
2.5 Konsep Teori Perlakuan Panas Termokimia (<i>Thermocemical Treatment</i>)	16
2.5.1 Pengertian Perlakuan Panas Termokimia (<i>Thermocemical Treatment</i>).....	16
2.5.2 Klasifikasi Perlakuan Panas Termokimia (<i>Thermocemical Treatment</i>).....	17
2.5.3 Pengerasan Permukaan Pada Perlakuan Panas Termokimia (<i>Thermocemical Treatment</i>).....	17
2.5.4 Temperatur Perlakuan Panas Termokimia (<i>Thermocemical Treatment</i>).....	18
2.5.5 <i>Innovative Surface Thermocemical Treatment</i>	19

2.5.6 Proses Perlakuan Panas Termokimia (<i>Thermochemical Treatment</i>).....	21
2.6 Konsep Transformasi Fasa Baja	23
2.6.1 Pengertian Transformasi Fasa Baja	23
2.6.2 Jenis Transformasi Fasa Baja	24
2.7 Konsep Teori <i>Fluidized Bed Furnace</i>	25
2.7.1 Pengertian <i>Fluidized Bed Furnace</i>	25
2.7.2 Supply Gas Dalam <i>Fluidized Bed Furnace</i>	26
2.7.3 Media Pemanasan <i>Fluidized Bed Furnace</i>	27
2.7.4 Karakteristik <i>Fluidized Bed Furnace</i>	27
2.7.5 Parameter <i>Fluidized Bed Furnace</i>	27
2.8 Pengujian Yang Digunakan	28
2.8.1 Uji Kekerasan <i>Vickers (Micro- Vickers)</i>	28
2.8.2 Uji Mikrostruktur SEM-EDX/SEM-EDS	29
BAB III Metode Penelitian	30
3.1 Diagram Alir	30
3.2 Penjelasan Diagram Alir	31
3.3 Tempat dan Waktu Pelaksanaan.....	31
3.4 Perencanaan Penelitian	32
3.5 Komponen Penelitian.....	32
3.5.1 Alat	32
3.5.2 Bahan	34
3.6 Tempat dan Waktu Penelitian.....	35
3.7 Prosedur Penelitian	36
3.6.1 Sampel Penelitian	36
3.6.2 Proses Perlakuan Panas <i>Carburizing</i>	36
3.6.3 Proses Perlakuan Panas <i>Nitriding</i>	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Data Hasil Pengujian	37
4.1.1 Data Hasil Pengujian Distribusi Kekerasan.....	37
4.1.2 Data Hasil Pengujian Mikroskop-Optik	42
4.1.3 Data Hasil Pengujian SEM-EDX/SEM-EDS	44
4.2 Pembahasan	48
4.2.1 Kedalaman Kekerasan	48
4.2.2 Mikroskop-Optik	51
4.2.3 SEM-EDX/SEM-EDS	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA.....	54
LAMPIRAN	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kandungan Unsur Paduan Baja AISI 4140	13
Tabel 2.2 Sifat Mekanik Pada Baja Panduan AISI 4140	14
Tabel 2.3 Prinsip Utama Dari Perlakuan Panas Termokimia	17
Tabel 3.1 <i>Setting Level Taguchi</i>	32
Tabel 4.1 Nilai Kekerasan Base Material	37
Tabel 4.2 Nilai Kekerasan Kombinasi <i>Carburizing</i> (700° C) Dan Nitriding (500° C)	38
Tabel 4.3 Nilai Kekerasan Kombinasi <i>Carburizing</i> (800° C) Dan Nitriding (500° C)	39
Tabel 4.4 Nilai Kekerasan Kombinasi <i>Carburizing</i> (900° C) Dan Nitriding (500° C)	40
Tabel 4.5 Nilai Rata-Rata Kekerasan	41
Tabel 4.6 Jumlah Kandungan Komposisi Kombinasi (700° C + 500° C)	45
Tabel 4.7 Jumlah Kandungan Komposisi Kombinasi (800° C + 500° C)	46
Tabel 4.8 Jumlah Kandungan Komposisi Kombinasi (800° C + 500° C)	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Fasa Fe ₃ C	9
Gambar 2.2 <i>Photomicrograph Austenite</i>	9
Gambar 2.3 Batas <i>Ferrite</i> Perbesaran 500x.....	10
Gambar 2.4 Semenit Perbesaran 1000x.....	10
Gambar 2.5 <i>Microstructure of Pearlite</i> Perbesaran 2500x.....	11
Gambar 2.6 Struktur Mikro Martensit	11
Gambar 2.7 Struktur Mikro Bainit Perbesaran 500x	12
Gambar 2.8 Klasifikasi Perlakuan Panas	16
Gambar 2.9 <i>Ausforming</i>	19
Gambar 2.10 <i>Isoforming</i>	19
Gambar 2.11 Skema Proses Laser <i>Surface Hardening</i>	20
Gambar 2.12 Skema Proses Laser Karbon	20
Gambar 2.13 Diagram Fe-N Pada Proses <i>Nitriding</i>	21
Gambar 2.14 Siklus Proses <i>Nitrocarburizing</i>	25
Gambar 2.15 Kurva Pendinginan	25
Gambar 2.16 Skema <i>Fluidized Bed Furnance</i>	26
Gambar 2.17 Suplai Gas Dalam <i>Fluidized Bed Furnance</i>	27
Gambar 2.18 Bentuk Identor Dan Hasil Identasi <i>Vickers</i>	27
Gambar 3.1 Diagram Alir	30
Gambar 3.2 <i>Fluidized Bed Furnance</i>	32
Gambar 3.3 Mesin <i>Wire Cutting</i>	33
Gambar 3.4 Mesin <i>Grinding-Polish</i>	33
Gambar 3.5 Mesin HBRV <i>Universal Hardness Tester 187.5A</i>	33
Gambar 3.6 Mikroskop Optik Olympus BX51M	34
Gambar 3.7 Ukuran Spesimen Pengujian.....	34
Gambar 3.8 Titik Pengujian Struktur Mikro Yang Diambil	35
Gambar 3.9 Sebelum dan Sesudah Proses	35
Gambar 4.1 Ukuran Sebagai Acuan Mikroskop-Optik	42
Gambar 4.2 Tebal Lapisan Mikroskop-Optik 700° C + 500° C Pembesaran 200x.....	43
Gambar 4.3 Tebal Lapisan Mikroskop-Optik 900° C + 500° C Pembesaran 200x.....	43
Gambar 4.4 Pengamatan SEM Untuk Mengambil Titik Uji EDS (700° C + 500° C)	44
Gambar 4.5 Pengamatan SEM Untuk Mengambil Titik Uji EDS (800° C + 500° C)	45
Gambar 4.6 Pengamatan SEM Untuk Mengambil Titik Uji EDS (900° C + 500° C)	46
Gambar 4.7 Titik Pengujian <i>Micro-Vickers</i> Yang Diambil.....	49

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Hubungan Antara Kekerasan Dengan Jarak <i>Base Material</i>	37
Grafik 4.2 Hubungan Antara Kekerasan Dengan Jarak <i>Carburizing</i> (700° C) Dan Nitriding (500° C)	38
Grafik 4.3 Hubungan Antara Kekerasan Dengan Jarak <i>Carburizing</i> (800° C) Dan Nitriding (500° C)	39
Grafik 4.4 Hubungan Antara Kekerasan Dengan Jarak <i>Carburizing</i> (900° C) Dan Nitriding (500° C)	40
Grafik 4.5 Hubungan Nilai Rata-Rata Kekerasan dan Variasi Temperatur	41
Grafik 4.6 Hubungan Nilai Kekerasan Dan Jarak Untuk Semua Spesimen	42
Grafik 4.7 Komposisi Kandungan Kombinasi (700° C + 500° C)	44
Grafik 4.8 Komposisi Kandungan Kombinasi (800° C + 500° C)	46
Grafik 4.9 Komposisi Kandungan Kombinasi (900° C + 500° C)	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Biodata Penulis.....	55
Lampiran 2. Bimbingan Skripsi.....	56
Lampiran 3. Lembar Data Pengamatan Struktur Mikro	57
Lampiran 4. Dokumentasi Alat dan Bahan yang Digunakan	58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di jaman yang semakin canggih dan maju ini, kebutuhan akan produk-produk industri semakin beragam. Untuk menunjang perkembangan teknologi yang sangat pesat dibutuhkan bahan unggul yang mempunyai sifat-sifat sesuai dengan penggunaannya. Kebutuhan perkembangan teknologi tidak lepas dari unsur logam sehingga logam mempunyai peranan aktif dalam kehidupan manusia dan menunjang teknologi di jaman sekarang. Oleh karena itu, timbul kreasi dan inovasi dari manusia sebagai pelaku industri untuk dapat memperbaiki sifat-sifat mekanik dan fisik dari logam tersebut. Dalam dunia perancangan, material logam yang paling banyak digunakan adalah baja, karena selain jenisnya yang bervariasi, bersifat kuat, ketahanan aus yang tinggi dan sifat mampu bentuk yang tinggi, sehingga dengan sendirinya akan meningkatkan umur pakai komponen.

Unsur logam termasuk penyumbang terbanyak pembuatan komponen –komponen mesin, salah satunya adalah baja tahan karat/*Stainless Steel* (SS). Baja AISI 4140 mempunyai komposisi kimia seperti C (0.38-0.43 %), Mn (0.75- 1.00 %), Si (0.20-0.35 %), Cr (0.80-1.10 %), Mo (0.15-0.25 %), P (≤ 0.035 %) dan S (≤ 0.04 %). Material ini sifat ketahanan korosinya sangat baik namun nilai kekerasan rendah dibandingkan baja tahan karat jenis martensitik lainnya. Paduan dengan nitrogen sebenarnya menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan elemen paduan lainnya dalam hal sifat korosi dan mekanis (Supriyanto, 2018)

Baja adalah material yang paling banyak digunakan pada berbagai bidang terutama pada bidang otomotif. Penggunaan baja ini dikarenakan berbagai sifat yang terkandung di dalamnya seperti kekerasan, keuletannya, ketangguhannya, sifat mekanis serta struktur mikronya yang lebih baik dibandingkan material lain, sehingga hal ini yang mendorong pemakaian baja pada berbagai bidang contohnya sebagai alat-alat perkakas serta komponen dari alat otomotif (Vuko, 2016).

Berdasarkan kandungan karbonnya, baja dikelompokkan menjadi tiga macam, yaitu baja karbon rendah (*low carbon steel*), baja karbon sedang (*medium carbon steel*) dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*). Sedangkan menurut kadar unsur paduan, baja dapat dibagi dalam dua golongan yaitu baja paduan rendah dan baja paduan tinggi atau baja paduan khusus. Baja paduan rendah adalah baja yang sedikit mengandung unsur paduan di bawah 10%, sedangkan baja paduan tinggi dapat mengandung unsur paduan di atas 10%. Salah satu baja paduan rendah yaitu baja AISI 4140 (Faisal, 2012).

Baja AISI 4140 merupakan baja paduan rendah yang memiliki kandungan paduan yakni chromium dan molybdenum, menurut AISI (*American Iron and Steel Institute*) pemberian angka 4140 itu memiliki makna yaitu dua digit angka pertama menyebutkan paduan yang terkandung di dalamnya sedangkan dua angka terakhir menunjukkan kadar karbon yang terkandung pada baja tersebut. Baja 2 ini biasa diaplikasikan pada *shaft*, *bolts*, *coupling*, *hydraulic machinery shaft* dan lain-lain. Aplikasi tersebut memerlukan kekuatan yang

lumayan besar, ketahanan aus yang baik serta tahan terhadap korosi. Oleh sebab itu, perlu dilakukan perlakuan panas khusus sehingga bisa menciptakan baja dengan permukaan yang keras serta inti yang sedikit lebih lunak agar bisa mengurangi kegetasan dalam baja tersebut (Manta *et al*, 2012).

Perlakuan panas (*heat treatment*) adalah salah satu metode merubah sifat mekanik baja, metode ini cukup mudah dan ekonomis karena tidak perlu dilakukan pemaduan unsur logam. Baja yang diberi perlakuan panas akan merubah sifat mekaniknya dari segi kekerasan, ketangguhan, keuletan tergantung dari metode yang kita lakukan pada baja tersebut. Karburasi merupakan salah satu metode perlakuan panas. Karburasi adalah proses perlakuan permukaan (*surface treatment*) bertujuan meningkatkan kualitas sifat ketahanan logam (Kornelia, 2017).

Dalam penelitian kali ini, maksud dari penulis ialah untuk menemukan hasil dari kombinasi antara variasi dari temperatur *Carburizing* 700°C, 800°C dan 900°C dengan proses *Nitriding* menggunakan temperatur 500°C serta menggunakan media pendinginan berupa udara. Dari jurnal yang telah diambil untuk dijadikan referensi masih belum banyak atau bahkan mungkin tidak ada yang membahas kombinasi dari kedua perlakuan *surface hardening* yang dilakukan dalam satu bahan yang berupa baja paduan rendah AISI 4140.

Heat treatment merupakan proses mengubah struktur logam dengan cara memanaskan logam di dalam tungku dengan suhu tertentu dan didinginkan dengan media pendingin. Salah satu jenis proses *heat treatment* adalah *quenching*. *Quenching* merupakan sebuah proses pendinginan secara cepat pada sebuah material setelah mendapatkan perlakuan panas. Media pendingin yang sering digunakan adalah air, oli, udara, dan masih banyak lagi yang bisa digunakan sebagai media pendingin untuk proses heat treatment.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari uraian latar belakang masalah di atas, maka dapat dirumuskan suatu rumusan permasalahan yang timbul yaitu:

1. Bagaimana mekanisme kegagalan pengujian kekerasan pada baja AISI 4140?
2. Berapa lama tingkat ketahanan pada baja AISI 4140?
3. Bagaimana gambaran struktur mikro baja AISI 4140 dalam proses pengerasan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini agar dapat berjalan dengan sesuai yang diinginkan maka permasalahan dibatasi sebagai berikut:

1. Material yang diuji baja paduan rendah AISI 4140.
2. Proses yang di pakai dalam pengujian baja paduan rendah AISI 4140 untuk mengetahui mekanisme kegagalan pada pengujian kekerasan *Vickers*.
3. Untuk mengetahui struktur mikro baja paduan rendah AISI 4140 pada kekerasan sebelum dan sesudah proses *hardening*.

1.4 Tujuan Penelitian

1.4.1 Tujuan Umum

Menganalisis sifat kekerasan dan struktur mikro baja AISI 4140 akibat proses *hardening* pada material.

1.4.2 Tujuan Khusus

1. Untuk mengetahui spesimen pada baja paduan rendah AISI 4140.
2. Untuk mengetahui struktur mikro pada baja paduan rendah AISI 4140.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini, penulis berharap agar dapat memberikan beberapa manfaat yaitu:

1. Mampu mengembangkan sebuah proses *surface hardening* untuk dijadikan sumber referensi di masa yang akan datang,
2. Dapat mengetahui kandungan karbon dan nitrogen yang terdapat setelah proses penelitian dilakukan,
3. Dapat dijadikan pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang selalu berkembang seiring dengan perkembangan zaman.

BAB II DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Heydarzadeh *et al* (2010) yang berjudul dari *School of metallurgy and University of Tehran, Iran, Departement of materials, Facutly of Engineering, University of Semnan, Iran* “*Effect Of Plasma Nitrocarburizing Temperature On The Wear Behavior Of AISI 4140 Steel*”. Penelitian ini untuk mengetahui perilaku keausan baja AISI 4140 *nitrocarburized* plasma pada suhu perlakuan yang berbeda diselidiki. Nitrokarburisasi plasma dilakukan pada 530 °C, 570 °C dan 630 °C selama 5 jam dalam atmosfer 80 vol.% N₂, 17 vol.% H₂ dan 3 vol.% CO₂. Sampel yang diberi perlakuan dikarakterisasi menggunakan teknik XRD, SEM, kekasaran dan kekerasan mikro. Perilaku keausan sampel yang dirawat dipelajari dengan metode pin-on-disk. Hasil mengkonfirmasi pembentukan fase dan dalam lapisan senyawa di semua suhu perlakuan. Jumlah fase meningkat seiring dengan kenaikan suhu perlakuan dari 530 °C menjadi 570 °C dan menurun pada 630 °C. *Nitrocarburizing* pada 570 °C menunjukkan kekerasan permukaan tertinggi, ketahanan aus tertinggi dan koefisien gesekan terendah di antara semua kondisi perawatan (Heydarzadeh *et al.*, 2010)

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Marusic *et al* (2006) dari *Faculty of Chemical of Engineering and Technology, University of Zagreb, Croatia, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia* yang berjudul “*Modification Of Carbon Steel Surface By The Tenifer Proces Of Nitrocarburizing And Post-Oxidation*”. Penelitian ini untuk mengetahui Lapisan permukaan yang diperoleh setelah perlakuan nitrokarburisasi terutama terdiri dari -Fe₂-3N dan -Fe₄N. Lapisan permukaan sampel setelah pasca-oksidasi juga terdiri dari -Fe₂-3N dan -Fe₄N, tetapi juga mengandung Fe₃O₄. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa perawatan nitrokarburisasi dan pasca-oksidasi, berdasarkan prosedur tenifer menghasilkan sifat mekanik dan korosi yang lebih baik dari baja karbon non-paduan. Sifat korosi baja karbon non-paduan yang dimodifikasi secara termokimia ditingkatkan dan mendekati sifat korosi baja tahan karat austenitik, yang dikenal dengan ketahanan korosi yang sangat baik (Marušić *et al.*, 2006).

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Motorcu (2010) dari *Çanakkale Vocational College, Çanakkale Onsekiz Mart University, Turkey* yang berjudul “*The Optimization of Machining Parameters Using the Taguchi Method for Surface Roughness of AISI 8660 Hardened Alloy Steel*”. Penelitian ini untuk mengetahui Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tingkat pakan ditemukan menjadi faktor dominan di antara faktor yang dapat dikontrol pada kekasaran permukaan, diikuti oleh kedalaman potong dan radius hidung pahat. Namun, kecepatan potong menunjukkan efek yang tidak signifikan. Selanjutnya, interaksi laju umpan/kedalaman potong ditemukan signifikan pada permukaan akhir karena pengerasan permukaan baja. Pengujian yang optimal parameter untuk kekasaran permukaan dapat

dihitung. Selain itu, model regresi orde kedua juga menunjukkan bahwa nilai prediksi sangat dekat dengan nilai eksperimental untuk kekerasan permukaan (Motorcu, 2010).

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Firman *et al* (2016) Teknik Mesin S-1 Universitas Islam Kalimantan Muhammad Arsyad Al-Bansary yang berjudul “Analisa Kekerasan Baja St 42 Dengan Perlakuan Panas Menggunakan Metode Taguchi”. Penelitian ini mengungkapkan bahwa faktor yang paling mendominasi dan mempengaruhi tingkat kekerasan material adalah di faktor A yaitu temperatur pemanasan. Berdasarkan perhitungan dengan efek mean dan efek replikasi temperatur pemanasan berada peringkat ke-1 di replikasi ke 4 sebesar 24.33 HB, sedangkan untuk media pendingin berada peringkat ke-2 di replikasi ke 2 sebesar 21.00 HB. Kombinasi faktor dengan level yang memberikan peningkatan kekerasan yaitu dengan temperatur 800°C dengan media pendingin oli sebesar 111.8 HB, sedangkan yang melunakan yaitu kombinasi antara faktor dengan level temperatur 700°C dengan media pendingin air sebesar 88.8 HB (Firman *et al.*, 2016)

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Zhang *et al* (2014) dari *National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, PR China, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, PR China* yang berjudul “*Optimizing The Mechanical Properties Of M50nil Steel By Plasma Nitrocarburizing*”. Penelitian ini mendapatkan hasil XRD menunjukkan bahwa jumlah fasa -Fe₂-3(N,C) meningkat seiring dengan meningkatnya suhu nitrokarburasi dari 460 °C menjadi 500 °C dan kemudian menurun pada 540 °C, sedangkan jumlah -Fe₄(N,C) fase meningkat seiring dengan kenaikan suhu perlakuan. Untuk kekerasan permukaannya diperoleh maksimum 1287 HV pada 540 °C. Oleh karena itu, 500 °C dapat dipilih sebagai suhu nitrokarburasi yang dioptimalkan untuk baja M50NiL (Zhang *et al.*, 2014).

Berdasarkan hasil yang diperoleh kesimpulan berikut telah ditarik :

1. Kekerasan permukaan sangat dipengaruhi oleh proses nitrokarburizing.
2. Nilai kekerasan menurun dengan retensi sampel dalam tungku untuk waktu yang lebih lama karena pelepasan tegangan internal.
3. Proses perlakuan panas pasca karburasi sangat mempengaruhi kekerasan baja nitrokarburizing.
4. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada *quenching* dan nilai kekerasan terendah diperoleh pada *annealing* baja *nitrocarburizing*.

2.2 Konsep Teori Baja

2.2.1 Pengertian Baja

Baja merupakan logam paduan yang berbahan dasar besi serta unsur karbon sebagai paduannya. Kandungan karbon pada baja berkisar antara 0.2-2.1% sesuai dengan *grade*. Penambahan karbon yaitu berfungsi sebagai unsur pengeras didalam baja. Terdapat unsur paduan lain yang biasanya ditambahkan kedalam baja selain karbon yakni mangan, krom, vanadium serta nikel. Dengan melakukan variasi kandungan unsur paduan serta karbon didalam baja bisa membuat berbagai macam jenis baja dengan

kualitas baja yang berbeda-beda pula. Penambahan unsur karbon pada baja mengakibatkan peningkatan kekerasan (*hardness*), kekuatan Tarik (*tensile strength*), disisi lain penambahan unsur karbon pada baja juga membuatnya menjadi getas serta menurunkan tingkat keuletannya. Pengaruh utama dari unsur karbon dalam baja yakni pada kekuatan, kekerasan serta sifat mudah dibentuk. Kandungan karbon yang besar mengakibatkan peningkatan kekerasan baja tetapi membuat baja menjadi getas serta sulit untuk dibentuk (Davis, 1982).

2.2.2 Jenis Baja

Jenis-jenis baja secara umum terbagi atas tiga besar yaitu baja karbon dan baja paduan yang dijabarkan secara rinci seperti dibawah ini:

1. Baja Karbon

a. Baja Karbon

Baja Karbon merupakan salah satu jenis dari baja paduan. Baja karbon atau carbon steel merupakan material logam yang terbentuk dari dua unsur antara unsur utama (Fe) serta unsur kedua yang berpengaruh pada sifat-sifatnya yakni karbon (C), sedangkan unsur yang lain berpengaruh menurut prosentasenya (Suprpto, 2015). Baja karbon umumnya memiliki kandungan unsur karbon dalam besi sebesar 0.2% hingga 1.8% (C), dimana unsur karbon berfungsi sebagai unsur penguat dalam struktur baja (De Garmo, 1990). Menurut besar kandungan karbonnya, baja karbon dibagi menjadi :

b. Baja karbon rendah

Baja ini memiliki komposisi karbon kurang dari 0.2% serta struktur mikronya ferrit dan perlit. Baja ini tidak bisa dikeraskan dengan cara perlakuan panas, baja karbon ini hanya bisa dilakukan proses pengerjaan 5 dingin. Baja karbon rendah memiliki keuletan dan ketangguhan yang tinggi.

c. Baja karbon sedang

Baja karbon sedang ialah baja dengan kandungan karbon antara 0.2 sampai 0.5 % dari keseluruhan berat baja. Baja karbon sedang dapat dilakukan perlakuan panas dengan cara memanaskan hingga fasa austenite lalu ditahan beberapa saat kemudian didinginkan cepat untuk memperoleh fasa yang keras yakni martensit. Baja karbon sedang dapat diaplikasikan sebagai poros, roda gigi, dan lain-lain.

d. Baja karbon tinggi

Baja karbon tinggi mempunyai komposisi karbon 0.6 sampai 1.4 % dari keseluruhan berat baja. Kekerasan serta kekuatan dari baja ini sangat tinggi namun keuletannya kurang.

2. Baja Paduan

Baja paduan (*alloy steel*) adalah baja yang memiliki sedikit kandungan dari satu atau lebih elemen paduan (selain karbon) seperti *silicon*, nikel, *chromium*, *manganese*, titanium, *copper*, serta aluminium. Pencampuran tersebut menghasilkan sifat yang

tidak dimiliki oleh baja karbon regular. Baja paduan sering kali digunakan di industri karena biayanya yang ekonomis, mudah ditemukan, mudah diproses dan memiliki sifat mekanik yang baik.

Baja paduan lebih responsif terhadap perlakuan panas dan perlakuan mekanik dibandingkan dengan baja karbon. Dalam penelitian ini penyusun menggunakan baja paduan yang akan dapat memudahkan pengambilan data sesuai teori yang telah diambil. Baja dapat dikatakan baja paduan jika memiliki kandungan unsur paduannya khusus, paduan yang terkandung sesuai dengan kebutuhan dari konsumen. Paduan yang banyak digunakan yakni Cr, Mn, Si, Ni, Mo, Ti, Al, Cu, Nb, Zr. Menurut jumlah paduannya baja paduan digolongkan menjadi:

a. Baja Paduan Rendah

Baja paduan rendah (*low alloy steel*) adalah baja dengan unsur paduan (misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain) dengan presentase rendah. Baja jenis ini biasanya memiliki paduan kurang dari 2.5% (Rudnev *et al*, 2003). Material baja ini sering digunakan sebagai material pada mesin perkakas seperti pahat kayu, poros, dan gergaji. Contoh *low alloy steel* dengan persentase karbon 0,4%-0,55% yaitu AISI 4140, 4150, 1552 dan 5150. Beberapa jenis baja ini sering digunakan untuk bahan pembuatan roda gigi dan dilanjutkan dengan proses pengerasan seperti induction surface hardening (Rudnev *et al*, 2003). Baja paduan rendah merupakan baja paduan yang memiliki unsur paduan kurang dari 2.5%. unsur paduan yang dipakai seperti Cr, Mn, Ni, S, Si, P dll. Baja paduan jenis ini biasanya dipakai untuk membuat perkakas potong, gergaji, pahat, mata pisau dan lain-lain.

b. Baja paduan sedang

Baja paduan ini memiliki unsur paduan sekitar 2.5 sampai 10%. Baja paduan ini biasanya digunakan sebagai pembuat alat ukur, cetakan penarikan dan lain-lain.

c. Baja paduan tinggi

Baja paduan ini memiliki unsur paduan lebih dari 10%, baja paduan ini sering dipakai sebagai cetakan penarikan kawat, rol derat dan lain-lain.

2.2.3 Pengaruh Unsur Baja Paduan

Pengaruh unsur pada baja paduan terdiri dari beberapa unsur berikut:

1. Karbon (C)

Karbon adalah unsur penting pada baja dikarenakan dengan karbon bisa meningkatkan kekerasan serta kekuatan dari baja, didalam baja kandungan karbon didalamnya sekitar 0.1-1.7%, sedangkan unsur selain baja dibatasi sesuai dengan kegunaanya. Penggunaan karbon dalam baja jika berlebihan bisa mengakibatkan penurunan ketangguhan dari baja tersebut.

2. Mangan (Mn)

Mangan merupakan hal penting dalam proses pembuatan baja, kandungan mangan kurang lebih 0.6% tidak berpengaruh pada sifat baja, atau bisa diartikan mangan dalam jumlah kecil tidak berpengaruh pada baja. Penambahan mangan pada baja bertujuan untuk meningkatkan kekuatan. Tarik tanpa mengurangi regangan, sehingga setelah ditambahkan mangan baja mempunyai sifat kuat dan ulet.

3. Silikon (Si)

Silikon pada baja biasanya mempunyai presentase lebih dari 0.4%, akibat dari penambahan silikon dapat mempengaruhi kenaikan tegangan. Tarik serta menurunkan laju pendinginan kritis, selain itu pengaruh dari penambahan silikon dalam baja yakni meningkatkan kekerasan, keuletan, ketahanan aus, kekenyalan dan ketahanan pada panas serta karat. Unsur silikon ini mengakibatkan sementit tidak stabil yang menyebabkan sementit memisah dan membentuk grafit. Silikon merupakan pembentuk ferrit tetapi bukan pembentuk dari karbida, silikon cenderung memiliki partikel oksida sehingga membuat orientasi kristal menjadi banyak dan pertumbuhan mengalami pengurangan akibat struktur butir yang semakin halus.

4. Nikel (Ni)

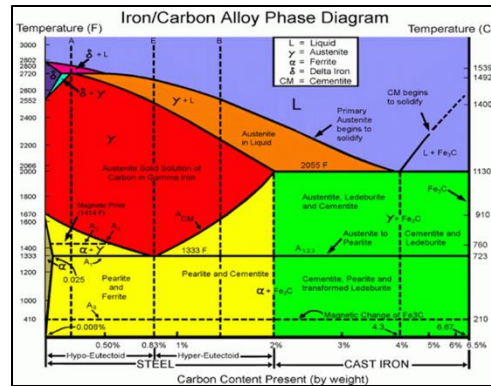
Nikel memiliki pengaruh sama seperti mangan yakni memperbaiki kekuatan Tarik serta menaikkan keuletan serta sifat tahan panas. Apabila unsur baja paduan memiliki kandungan nikel sebesar 25% baja paduan tersebut memiliki sifat tahan korosi, sama seperti unsur Mn, unsur paduan nikel memberikan pengaruh untuk menurunkan temperatur kritis, kecepatan kritis dan yang paling utama untuk membuat struktur butiran menjadi halus serta menambah keuletan (Suprpto, 2015).

5. Kromium (Cr)

Sifat dari kromium yaitu dapat menurunkan laju pendinginan kritis, kandungan kromium yang mencapai 1.5% dapat meningkatkan kekerasan dalam minyak. Penambahan kromium pada baja membuat struktur yang lebih halus serta membuat sifat baja mempunyai kekerasan lebih baik dikarenakan kromium dan karbon dapat menghasilkan karbida. Kromium dapat menambah keplastisan dan kekuatan tarik serta berguna dalam pembentukan lapisan pasif yang berguna untuk melindungi baja dari korosi serta tahan terhadap suhu yang tinggi.

2.2.4 Struktur Mikro Baja

Struktur mikro merupakan gambaran dari kumpulan fasa-fasa yang terdapat dalam baja, fasa ini dapat diamati melalui teknik metalografi. Metalografi sendiri merupakan metode yang digunakan untuk menyelidiki struktur logam hingga perbesaran 3000 kali, struktur yang dilihat dinamakan mikro struktur.



Gambar 2.1 Diagram Fasa Fe₃C

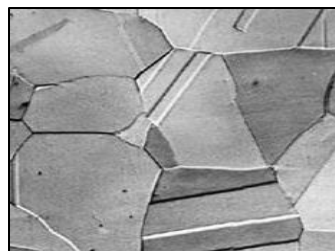
(Sumber: Knowledgeatery.blogspot.com)

Beberapa jenis struktur mikro yang terdapat pada suatu baja, yaitu sebagai berikut:

1. Austenit (*Austenite*)

Austenit adalah larutan padat karbon bebas (ferit) dan besi dalam besi gamma. Pada pemanasan baja, setelah suhu kritis atas, pembentukan struktur selesai menjadi austenit yang keras, ulet dan non-magnetik. Ia mampu melarutkan karbon dalam jumlah besar. Hal ini terjadi di antara rentang kritis atau transfer selama pemanasan dan pendinginan baja. Austenit terbentuk ketika baja mengandung karbon hingga 1,8 % pada 1130°C. Pada pendinginan di bawah 723°C, ia mulai berubah menjadi perlit dan ferit. Baja Austenitik tidak dapat dikeraskan dengan metode perlakuan panas yang biasa dan non-magnetik (Taufiqurrokhman, 2019).

Austenit mempunyai struktur sel FCC (*Face Centered Cubic*). Pada FCC semua sumbu memiliki panjang yang sama dengan sudut antara sumbu 90°. Sel FCC tidak memiliki atom yang terletak pada pusat kubus. Sel satuan ini memiliki atom yang terletak pada pusat bidang/sisi dan atom pada titik sudut kubusnya. Kedelapan atom pada titik sudut menghasilkan satu atom, dan keenam bidang sisi menghasilkan tiga atom per sel satuan. Dengan demikian sel satuan FCC memiliki empat atom.

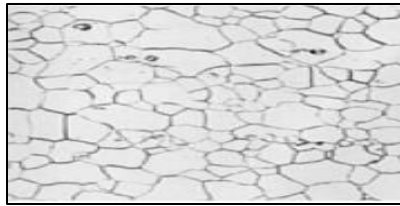


Gambar 2.2 Photomicrograph Austenite

(Sumber: Tsffaunsoed, 2009)

2. Ferit (*Ferrite*)

Baja *ferrite* diperoleh ketika kandungan karbon didalamnya rendah. Gambar mikrostruktur yang dapat jelas dilihat yaitu batas butir *ferrite*. *Ferrite* adalah fasa dengan kekuatan rendah, jika ukuran butir *ferrite* baik, keuletan dan kemampuan bentuk yang baik diperoleh, dikarenakan *ferrite* memiliki struktur kristal BCC. Ferit terbentuk akibat proses pendinginan yang lambat dari austenit baja hypotektoid pada saat mencapai titik fasa A3. Baja feritik memperlihatkan transisi dari ulet untuk perilaku rapuh dikarenakan temperature menurun atau saat laju regangan meningkat. Ferit bersifat sangat lunak, ulet dan memiliki kekerasan sekitar 70-100 BHN serta memiliki konduktivitas yang tinggi.



Gambar 2.3 Batas *Ferrite* Perbesaran 500x
(Sumber: ASM Handbook Volume 9 Metallography and Microstructure)

3. Sementit (*Cementite*)

Besi karbida yang memiliki kandungan 6.67% karbon, cocok dengan rumus dari Fe_3C . dalam baja paduan karbon, ada beberapa paduan yang bertujuan untuk membentuk karbida misal mangan dan kromium akan menggantikan baja dalam sementit. Penggantian elemen lain untuk beberapa besi sementit dapat meningkatkan kekerasan, dikarenakan kerapuhan dari sementit ini sehingga jumlahnya sedikit dalam baja.

Cementite (atau besi karbida) adalah senyawa besi dan karbon, lebih tepatnya karbida logam transisi menengah dengan rumus Fe_3C . Secara berat, itu adalah 6,67% karbon dan 93,3% besi. Ia memiliki struktur kristal ortorombik. Ini adalah bahan keras, rapuh, biasanya diklasifikasikan sebagai keramik dalam bentuknya yang murni, dan merupakan unsur yang sering ditemukan dan penting dalam metalurgi besi. Sementara sementit hadir di sebagian besar baja dan cast iron, itu diproduksi sebagai bahan baku dalam proses karbida besi, yang termasuk keluarga teknologi pembuatan besi alternatif.

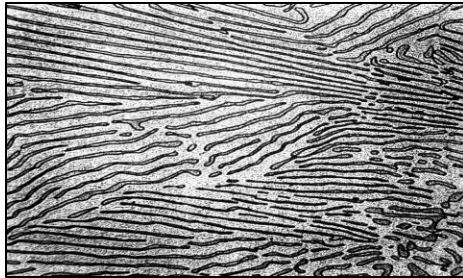


Gambar 2.4 Sementit Perbesaran 1000x
(Sumber: ASM Handbook Volume 9 Metallography and Microstructure)

4. Perlit (*Pearlit*)

Perlit merupakan campuran dari ferit dan sementit dimana kedua fasa terbentuk dari austenit dengan pola pipih. Untuk pembentukan perlit membutuhkan pendinginan yang lambat dari austenite serta tergantung dari komposisi bajanya. Bentuk perlit yang berasal dari suhu dibawah suhu kritis lebih rendah dibandingkan baja yang diproses serta bisa jadi terbentuk secara iso termal atau pendinginan *continue*.

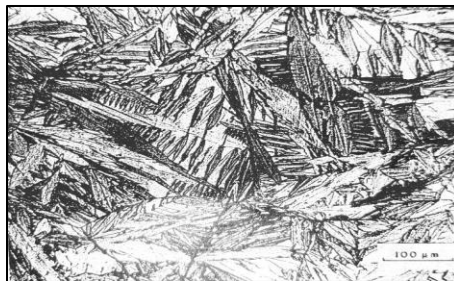
Kekuatan serta kekerasan dari baja ferrit perlit meningkat seiring dengan meningkatnya kadar perlit serta semakin meningkat pengurangan jarak lamellar, perlit halus dalam baja karbon eutectoid memiliki kekerasan hamper 400 HV.



Gambar 2.5 *Microstructure of Pearlite* Perbesaran 2500x
(Sumber: Courtesy of USX Corporation)

5. Martensit (*Martensite*)

Pembentukan martensit tergantung pada komposisi kimia serta pendinginan tingkat dari wilayah austenit suhu tinggi. Tidak seperti transformasi austenit lainnya, martensit terbentuk setelah spesimen didinginkan di bawah temperatur tertentu. Kekerasan martensit ditentukan oleh kandungan karbon, serta dipengaruhi oleh unsur paduan. Kemampuan untuk membentuk martensit dalam baja sebagai fungsi ukuran bagian dan tingkat pendinginan tergantung pada pengerasan baja. *Hardenability* ditingkatkan dengan meningkatkan karbon dan jumlah paduan serta dengan memperbesar ukuran butir austenit. Kandungan karbon sangat mempengaruhi sifat martensit. Pada dasarnya, dua jenis martensit dapat dibentuk dalam baja, yaitu *lath martensite* dan *acicular martensite*.



Gambar 2.6 Struktur Mikro Martensit
(Sumber: Courtesy of USX Corporation)

6. Bainit (*Bainite*)

Transformasi austenit, adalah agregat mirip ferit serta sementit yang terbentuk dalam kondisi menengah bagi yang menghasilkan pembentukan perlit serta martensit. Bainit

diklasifikasikan sebagai *upper bainit* atau *lower bainit*. *Upper bainit* terbentuk secara isothermal atau selama pendinginan terus-menerus pada temperatur tepat di bawah menghasilkan bainit. Bainit yang lebih rendah terbentuk pada temperatur yang lebih rendah, ke suhu di bawah tertentu kasus. Pembentukan *upper bainit* dimulai dengan pertumbuhan bilah ferit panjang tanpa karbon. Dikarenakan kandungan karbon bilah ferit rendah, austenit pada batas bilah diperkaya pada karbon. Bentuk sementit terbentuk pada bilah batas bervariasi dengan kandungan carbon. Pada baja karbon rendah, sementit akan mengendap sebagai senar serta partikel terisolasi, tapi jika kandungan karbon lebih tinggi senar lebih kontinyu. Jika karbida tidak diendapkan, tetapi dipertahankan sebagai austenit atau berubah menjadi plat martensit.

Lower bainit punya model yang lebih mirip platelet daripada *upper bainit*. Pelat ferit lebih luas daripada yang di atas bainit dan lebih mirip penampilannya dengan pelat martensit. Seperti halnya *upper bainit*, penampilan *lower bainit* bervariasi dengan kandungan karbon. *Lower bainit* ditandai oleh pembentukan sementit seperti batang di dalam pelat ferit. Bainit terbentuk pada suhu antara 220 - 250°C dengan kadar karbon 0.5%.



Gambar 2.7 Struktur Mikro Bainit Perbesaran 500x
(Sumber: ASM Handbook Volume 9 Metallography And Microstructure)

2.3 Konsep Teori Baja Paduan AISI 4140

2.3.1 Pengertian Baja Paduan AISI 4140

AISI 4140 adalah golongan baja karbon sedang (*medium carbon steel*) dengan kandungan karbon yang sekitar 0,42% serta merupakan baja paduan rendah (*low alloy steel*) yang mengandung unsur paduan chromium (*krom*) dan molybdeum sebagai bahan penguat. Berdasarkan *American Iron And Steel Institute* (AISI) yang merupakan salah satu standarisasi baja, dimana dua digit angka pertama pada 4140 menyatakan paduan Chromium-Molybdeum sedangkan dua digit angka terakhir menyatakan persentase kandungan karbon. Menurut Mill Certificate by SeAH BesteelCorp baja AISI 4140 memiliki kekerasan setelah perlakuan panas (*heat treatment*) mencapai maksimal 50-52 HRC.

Tabel 2.1 Kandungan unsur paduan Baja AISI 4140

Unsur paduan	Presentase (%)
Karbon	0,42
Silikon	0,26
Nikel	0,08
Mangan	0,85
Fosfor	0,24
Sulfur	0,09
Tembaga	0,23
Kromium	0,85
Molibedeum	0,16
Total	3,18

(Sumber: Mill Certificate by SeAH Besteel Corp)

Baja AISI 4140 memiliki pengaplikasian yang luas diantaranya untuk komponen mesin seperti poros engkol, as roda, batang piston hingga material mur dan baut. Dalam penelitian Rusnaldy (2017), baja AISI 4140 dapat digunakan sebagai material rompi anti peluru. Menurut Kim *et al* (2017), baja AISI 4140 merupakan salah satu baja karbon menengah dan paduan rendah yang representatif serta banyak digunakan untuk pembuatan komponen industri. Hal ini dikarenakan baja tersebut memiliki kekerasan yang baik, kekuatan, ketangguhan serta ketahanan aus, maka material ini cocok digunakan sebagai bahan baku material roda gigi, poros dan rotor. Akan tetapi saat komponen tersebut berada pada kondisi pengoperasian yang keras seperti surface rolling dan sliding contact secara terus menerus, maka komponen yang memakai baja AISI 4140 tersebut rentan terjadi kerusakan permukaan yang serius seperti micropitting, keausan abrasif dan korosi yang berakibat pada pendeknya usia pakai. sehingga dari itu perlu dilakukan treatment khusus.

Karakteristik dari baja AISI 4140 yaitu kekerasan yang baik serta mampu mesin. Kekerasan tersebut bersumber dari kadar kromium serta kadar molibedeum yang membuat kekerasan seragam serta kekuatan yang tinggi. Baja AISI 4140 dapat dikeraskan dengan media oli/minyak hingga kekerasan yang relatif tinggi. Karakteristik yang diinginkan dari baja ini adalah ketangguhan yang unggul, keelastisitasan yang baik dan daya tahan yang baik dalam kondisi pengerasan dan pemanasan.

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Pada Baja Paduan AISI 4140
 Mechanical Properties AISI 4140/SCM 440

Mechanical Properties	Symbol	Steel
Yield strength (N/mm ²)		≥739
Tensile Strength (N/mm ²)		≥892
Extension ratio (%)		≥18.2
Area reduction (%)		≥63
Impact (V)		87 - 88

(Sumber: Mill Certificate by SeAH Besteel Corp)

2.4 Konsep Teori Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

2.4.1 Pengertian Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Perlakuan panas atau *heat treatment* adalah suatu metode yang dipergunakan untuk merubah sifat-sifat mekanik dari suatu baja seperti kekerasan, keuletan serta kekuatannya. Metode yaitu dengan melalui proses pemanasan dan pengaturan kecepatan pendinginan sehingga dapat merubah komposisi kimianya ataupun yang tidak merubah komposisi kimia dari material tersebut. Perlakuan panas merupakan sebuah kombinasi dari operasi pemanasan dan pendinginan dengan kecepatan tertentu yang dilakukan terhadap logam paduan dalam keadaan padat, sebagai upaya untuk memperoleh sifat-sifat tertentu (Sujana, 1996).

Perlakuan panas adalah suatu proses pemanasan dan pendinginan logam dalam keadaan padat untuk mengubah sifat-sifat fisis logam tersebut. Baja dapat dikeraskan sehingga tahan aus dan kemampuan memotong meningkat, atau baja dapat dilunakkan untuk memudahkan pemesinan lebih lanjut Bahri (2018). Perlakuan panas merupakan suatu proses pemanasan dan pendinginan logam dalam keadaan padat yang bertujuan untuk mengubah sifat-sifat mekanik dan struktur mikro dari logam tersebut. Perlakuan panas hampir dilakukan pada material yang akan dilakukan pengerjaan lanjut dengan kata lain perlakuan panas menyiapkan material setengah jadi untuk dilakukan pengerjaan selanjutnya Hadi (2010). Pada dasarnya proses perlakuan panas meliputi:

1. Pemanasan, yaitu memanaskan material menggunakan tungku pemanas hingga mencapai suhu yang telah ditetapkan serta dengan kecepatan tertentu.
2. Penahanan atau *holding time* merupakan suatu proses yang bertujuan untuk mendapatkan nilai kekerasan yang tinggi dari suatu bahan atau material yang dilakukan dengan cara menahan temperatur pemanasannya temperatur *austenite* dengan waktu tertentu. Tujuan utama dari proses ini yaitu agar diperoleh pemanasan yang sama atau homogen sehingga bentuk dari fasa *austenite* yang didapatkan pada bahan mempunyai bentuk yang sama.
3. Pendinginan atau *quenching* merupakan suatu proses pendinginan logam dengan media pendingin seperti air, oli, udara, minyak atau bisa juga dengan media pendingin yang lain. Material yang sudah melalui proses 14 pemanasan dan penahanan

dilakukan proses pendinginan untuk pemilihan media pendingin juga harus sesuai agar bisa menghasilkan material seperti yang diinginkan.

Syarat-syarat dari perlakuan panas yang harus dipenuhi saat proses yaitu:

1. Suhu pemanasan harus naik secara teratur dan merata.
2. Alat ukur suhu harus teliti.
3. Laju pendinginan harus sesuai dengan jenis perlakuan panas yang dilakukan.

2.4.2 Klasifikasi Proses Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Klasifikasi Proses Perlakuan Panas (*Heat Treatment*) dibagi menjadi empat yaitu:

1. *Annealing*

Annealing merupakan suatu proses perlakuan panas (*heat treatment*) yang sering dilakukan pada logam dalam pembuatan suatu produk. Pada dasarnya *annealing* dilakukan dengan cara memanaskan logam sampai temperature tertentu, menahan pada temperatur tadi selama waktu ditentukan agar mencapai perubahan yang diinginkan kemudian didinginkan dengan laju pendinginan yang cukup lambat (Sujana, 1996).

Annealing dapat dilakukan terhadap material dengan kondisi yang berbeda-beda dan dengan tujuan yang berbeda juga. Tujuan dilakukannya proses ini adalah untuk melunakkan material, menghaluskan butir kristal, mengurangi tegangan sisa, dan memperbaiki keuletan dari material. Dalam *annealing* ada beberapa macam proses yaitu *full annealing*, *recrystallization annealing*, *stress relief annealing*, *spheroidization* dan lain-lain.

2. *Normalizing*

Proses *normalizing* dilakukan dengan cara memanaskan bahan kurang lebih 1700°F (925°C), kemudian didinginkan pada *still air* atau *furnance*. Pada umumnya hasil *normalizing* memiliki struktur mikro lebih halus, sehingga untuk baja dengan komposisi kimia yang sama akan mempunyai *yield strength*, kekerasan serta *impact strength* yang lebih tinggi daripada yang diperoleh melalui *annealing* dan *machinability*nya akan lebih baik.

Proses *normalizing* biasanya dilakukan pada benda hasil tuangan atau hasil tempa untuk menghilangkan tegangan dalam dan menghaluskan butiran kristalnya sehingga menghasilkan sifat yang lebih baik. Pada proses ini *annealing* lebih baik tidak dilakukan pemanasan hingga temperature tinggi karena butir kristal *austenite* yang terjadi akan terlalu besar, sehingga pendinginan lambat akan diperoleh butir ferit/pearlit yang kasar ini dapat membuat kurangnya keuletan atau ketangguhan material.

3. *Hardening*

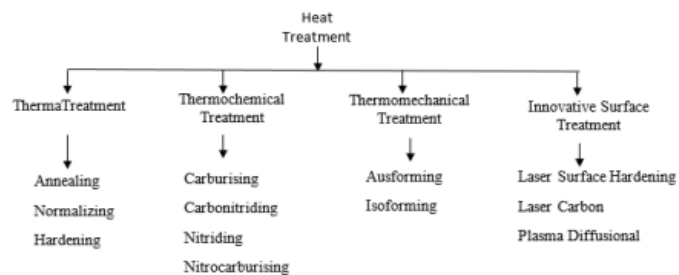
Hardening merupakan salah satu proses perlakuan panas dengan kondisi *non-equilibrium*, laju pendinginannya sangat cepat, sehingga struktur mikro yang tercipta adalah struktur mikro tidak equilibrium. *Hardening* dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai temperature *austenite*, dipertahankan beberapa

saat ditemperatur yang terakhir lalu didinginkan dengan cepat sehingga mendapatkan martensit yang keras, kekerasan maksimum yang dicapai juga bergantung pada jumlah karbon yang terdapat didalam material tersebut, semakain tinggi kandungan karbon yang terdapat didalamnya maka akan semakin keras pula hasil dari hardening tersebut.

Untuk baja dengan kandungan karbon rendah setelah dilakukan proses *hardening* seperti tidak ada kenaikan atau bisa dibilang seperti tidak dilakukan proses apapun. Sehingga untuk proses ini hanya dilakukan pada material yang memiliki kandungan carbon yang memadai yaitu tidak kurang dari 0,30 %. Agar mendapat struktur martensit yang sepenuhnya maka laju pendinginan harus mencapai laju pendinginan kritis (*critical cooling rate*) atau CCR. Jika laju pendinginan kurang dari CCR akan mengakibatkan sebagian *austenite* yang tidak bertransformasi menjadi martensit, sehingga kekerasan tidak tercapai maksimal. Dalam proses *hardening* laju pendinginan suatu benda kerja juga bergantung pada beberapa faktor yaitu:

- a. Jenis media pendingin.
- b. Temperatur media pendingin.
- c. Kuatnya sirkulasi pada media pendingin.

Untuk media pendingin yang biasanya dipakai pada proses ini yaitu : *braine*, air, *salt bath*, minyak serta udara.



Gambar 2.8 Klasifikasi Perlakuan Panas
(Sumber: Sujana, 1996)

2.5 Konsep Teori Perlakuan Panas Termokimia (*Thermocemical Treatment*)

2.5.1 Pengertian Perlakuan Panas Termokimia (*Thermocemical Treatment*)

Pengertian perlakuan panas termokimia ialah mendifusikan elemen kimia pada temperatur yang meningkat agar dapat meningkatkan sifat mekanis permukaan material (Lawrence & Van Vlack, 1983). Perlakuan panas termokimia adalah perlakuan panas dimana unsur-unsur kimia terutama karbon dan nitrogen dimasukkan kepermukaan pada suhu tinggi dengan menggunakan media transfer padat, cair, gas atau plasma (Arthur *et al*, 1986). Proses ini termasuk metode *austenite*, *Carburizing*, dan *Carbonitriding* yang seperti perlakuan *thermal*.

Tabel 2.3 Prinsip utama dari perlakuan panas termokimia

Process	Description	Process	Typical treatment temp. °C	Typical case depth, mm	Typical surface hardness, HV
Carburising	A process in which a steel surface is enriched with carbon, at a temperature above the ferrite/austenite transformation. On subsequent quenching, an essentially martensitic case is formed.	Solid, Liquid, Gaseous, Plasma	850-950	0.25-4.0	700-900*
Carbonitriding	Similar to carburising, but involving nitrogen as well as carbon enrichment.	Liquid, Gaseous, Plasma	750-900	0.05-0.75	600-850*
Nitrocarburising	A process in which a steel or cast iron surface is enriched with nitrogen, carbon and possibly sulphur at a temperature below the ferrite/austenite transformation.	Liquid, Gaseous, Plasma	570	0.02 max [†] 1.0 max [‡]	500-650 [†]
Nitriding	A process in which a steel surface is enriched with nitrogen, at a temperature below the ferrite/austenite transformation.	Gaseous, Liquid, Plasma	500-525	0.4-0.6	800-1050

*Depending on tempering treatment (upper figure represents typical as-quenched hardness).
[†]Thickness and microhardness of compound layer on mild steel. Values are dependent on alloy content of material treated.
[‡]Total depth of diffusion zone.

(Sumber: Sujana, 1996)

Keuntungan dari proses pengerasan termokimia yaitu:

- Mudah mengontrol kedalaman pengerasan
- Baik untuk bentuk kompleks
- Biaya rendah terutama untuk produksi massal
- Bahan baku *low carbon steel*, alasannya karena mudah dibentuk dan *dimachining*, bagian tengahnya ulet, kekerasan permukaannya meningkat dan struktur lebih tangguh daripada baja medium atau *high carbon steel*.

2.5.2 Klasifikasi Perlakuan Panas Termokimia (*Thermocemical Treatment*)

Klasifikasi perlakuan panas termokimia terbagi menjadi dua, yaitu:

- Austenitik thermochemical* ialah suatu metode pengerasan permukaan yang dilakukan pada temperatur *austenite* dan yang tergolong perlakuan panas *austenitik thermochemical* yaitu *carburizing*, *carbo nitriding* dan *boring*.
- Ferritik thermochemical* ialah metode pengerasan permukaan yang dilakukan pada daerah temperatur *ferritic* dan yang termasuk perlakuan panas *ferritik thermochemical* yaitu *nitriding* dan *nitrocarburizing*.

Setiap klasifikasi diatas memiliki keuntungan masing-masing untuk *austenitic thermochemical treatment* keuntungannya yaitu zona difusi yang terjadi lebih dalam dan ketahanan aus yang lebih baik. Sedangkan untuk *ferritik thermochemical treatment* keuntungannya yaitu resiko retak akibat *residual stress* sedikit dan biaya pengerjaan lebih rendah karena prosesnya dilakukan pada daerah temperatur *ferritic*.

2.5.3 Pengerasan Permukaan Pada Perlakuan Panas Termokimia (*Thermocemical Treatment*)

Pengerasan permukaan dengan cara *thermochemical* terbagi menjadi empat yaitu:

- Carburizing*

Karburasi atau yang sering disebut juga sebagai proses sementasi, yaitu proses penambahan karbon permukaan baja (biasanya baja karbon rendah) pada temperature diatas AC_3 yaitu pada daerah stabil fasa. Karburasi dilakukan pada temperature sekitar $815^{\circ}C-955^{\circ}C$ dengan media yang memiliki karbon potensial yang tinggi, sehingga terjadi difusi atom-atom karbon dari media ke dalam lapisan permukaan baja. Pada temperature *Austenite*, laju difusi karbon dalam

baja relative tinggi. Namun demikian, kandungan karbon tidak akan melebihi batas maksimum dari kelarutan karbon dalam fasa *austenite* yang ditentukan oleh garis Ac_m. Untuk baja paduan khususnya baja perkakas, kandungan karbon di permukaan baja setelah karburasi dapat melebihi 3%

2. *Carbonitriding*

Carbonitriding adalah salah satu modifikasi dari proses karburasi dimana selain karbon juga ditambahkan 0.5% nitrogen, prosesnya berlangsung pada temperatur lebih rendah, dengan larutan karbon dan nitrogen pada kulit maka ini akan mempertinggikan mampu keras baja. Temperatur perlakuan panas yang umumnya dilakukan berkisar antara 750-900 °C, kekerasan lapisan mencapai 600-850 HV. Akibat suhu prosesnya lebih rendah dari karburasi maka kemungkinan terjadinya distorsi atau retak akan lebih rendah begitu juga dengan homogenitas kekerasan sampai dengan kedalaman tertentu lebih baik. Beberapa sifat penting yang dihasilkan oleh proses karbonitridasi adalah aus memberikan 18 ketahanan yang tinggi terhadap *abrasive*, ketahanan aus *abrasive* dan juga ketahanan leleh. Proses karbonitridasi ini hanya digunakan untuk baja karbon biasa dan baja paduan rendah.

3. *Nitriding*

Nitridasi adalah suatu proses perlakuan panas termokimia dimana nitrogen didifusikan kepermukaan baja pada temperatur berkisar antara 500-600°C sehingga terbentuk pengerasan kulit akibat terbentuknya nitrida paduan pada permukaan. Ketebalan lapisan yang terbentuk berkisar antara 0,4-0,6 mm dengan kekerasan mencapai 800-1050 HV. Karena suhu prosesnya sangat rendah, maka kemungkinan terjadinya distorsi geometri atau retak sangat kecil. Beberapa sifat penting yang dihasilkan oleh proses nitridasi adalah ketahanan leleh sangat baik, ketahanan abrasif, ketahanan aus adhesif, ketahanan korosi juga baik.

4. *Nitrocarburizing*

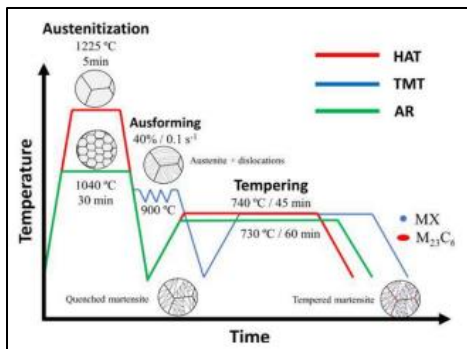
Nitrokarburasi adalah termasuk salah satu proses perlakuan panas termokimia. Proses ini dilakukan pada temperatur 570°C dengan mendifusikan karbon dan nitrogen kedalam permukaan baja, sehingga akan diperoleh lapisan permukaan yang keras, tipis dengan ketebalan 10-25µm. Lapisan tersebut terdiri dari fasa karbonitrida dengan kekerasan permukaan mencapai 500-700 HV kekerasan ini sangat bermanfaat untuk meningkatkan ketahanan aus adhesif dari permukaan baja.

2.5.4 Temperatur Perlakuan Panas Termokimia (*Thermocemical Treatment*)

1. *Ausforming*

Proses yang dikenal sebagai *ausforming* atau *low temperature thermomechanical treatment* (LTMT) yang pertama kali dijelaskan oleh Harney dan kemudian oleh Lips dan van Zuijlen, melibatkan deformasi *austenite* didalam *metastable* diantara *lance ferrite* dan *bainite*. Baja dikondisi *austenite* stabil

dikembangkan dengan baik, didinginkan dari suhu *austerizing*, deformasi dilakukan tanpa memungkinkan terjadinya transformasi. *Treatment ausforming* rela dibandingkan dengan *high temperature thermomechanical treatment* dimana deformasi dilakukan didalam *austenite* yang stabil biasanya mendahului pendinginan untuk membentuk martensit (Tata *et al*, 1995).

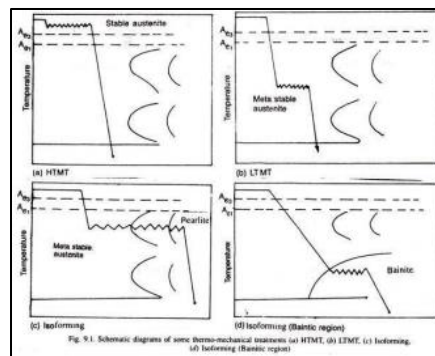


Gambar 2.9 Ausforming

(Sumber: www.sec.gov/Archives/edgar/data.html)

2. Isoforming

Proses *isoforming* melibatkan deformasi dari *austenite* yang stabil namun deformasi ini berlanjut hingga transformasi *austenite* selesai pada suhu deformasi. Hal ini dikarenakan morfologi dari *pearlite* mengarah kepada keuletan yang rendah dari baja *ferrite/pearlite* suhu transisi kelenturan meningkat dengan volume yang lebih besar dari pecahan *pearlite* (Tata *et al*, 1995).



Gambar 2.10 Isoforming

(Sumber: www.sec.gov/Archives/edgar/data.html)

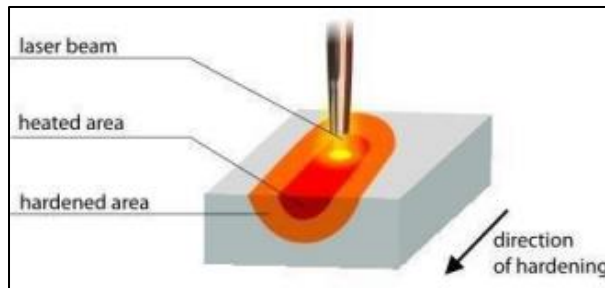
2.5.5 Innovative Surface Treatment

Innovative Surface Treatment dibagi menjadi tiga yaitu sebagai berikut:

1. Laser Surface Hardening

Pengerasan laser termasuk di antara teknologi inti perlakuan panas. Sinar laser digunakan untuk memanaskan area yang akan diproses. Kepadatan energi laser

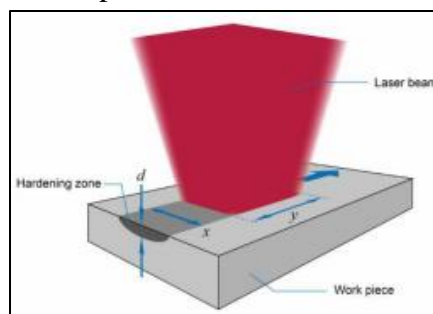
yang tinggi memungkinkan pemanasan yang terjadi sangat cepat pada area yang mengeras di atas suhu austenit. Fenomena “*Selfquenching*” digunakan setelah mengeluarkan sumber panas dari zona interaksi. Energi panas yang diserap oleh lapisan permukaan dengan cepat didistribusikan ke seluruh benda kerja. Difusi panas ini menghasilkan penurunan suhu yang sangat cepat di area yang mengeras. Gradien pendinginan yang tinggi telah menghasilkan struktur martensit butir halus dengan kekerasan yang sangat tinggi, yang merupakan keunggulan utama dibandingkan dengan metode pengerasan konvensional serta tidak adanya media pendingin dan otomatisasi yang mudah. Area yang dikeraskan terbatas pada lapisan permukaan dengan ketebalan maksimal sekitar 2 mm, sehingga pengerasan laser termasuk dalam teknologi perawatan permukaan (Kiwi, 2019).



Gambar 2.11 Skema Proses Laser Surface Hardening
(Sumber: www.researchgate.net)

2. Laser Carbon

Pengerasan laser karbon atau laser/electron beam surface adalah prosedur pengerasan permukaan pendek untuk bahan besi yang dapat mengeras secara martensit memakai energi yang ditransfer oleh berkas electron, pendinginan cepat austenit yang diperlukan untuk membentuk martensit terjadi melalui pendinginan sendiri, kedalaman pengerasan umum yang diperoleh oleh yaitu mulai dari 0,1 sampai 1,5 mm. Proses pengerasan bergerak dari permukaan menuju daerah inti bagian dalam komponen melalui konduksi panas. Dengan memberikan keunggulan distorsi pengerasan yang sangat rendah dan konsumsi energi yang relatif rendah dan Vakum diperlukan untuk melakukan pengerasan.



Gambar 2.12 Skema Proses Laser Karbon
(Sumber: www.vippng.com)

3. Diffusional Treatment

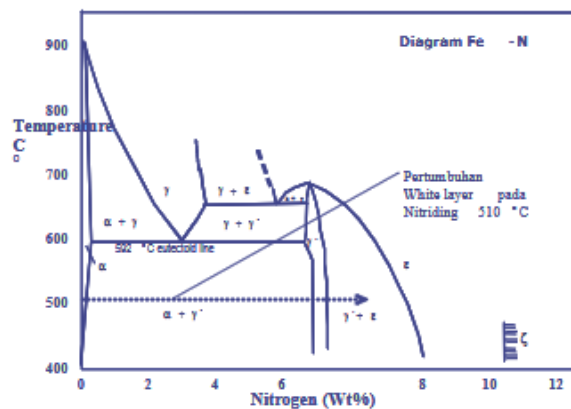
Perlakuan panas *Plasma diffusional* diikuti oleh pelapisan (metode *dupleks*) yang membuka sepenuhnya untuk proses pelapisan. Nitrogen yang berdifusi ke permukaan menghasilkan kenaikan kekerasan yang merata pada material sampai mencapai lapisan kekerasan tertinggi pada suatu material.

2.5.6 Proses Perlakuan Panas Termokimia (*Thermochemical Treatment*)

Proses perlakuan panas termokimia (*Thermochemical Treatment*) dibagi menjadi empat yaitu sebagai berikut:

1. Nitriding

Proses Nitridisasi (*Nitriding*) adalah proses perlakuan panas termokimia (*thermochemical treatment*) dengan tujuan mendifusikan nitrida ke dalam permukaan baja pada temperature 450-580°C sehingga membentuk lapisan ferrite dengan kadar nitrogen mencapai 6%. Pada sekitar 6%, fasa gamma membentuk komposisi Fe-4N, pada kadar nitrogen lebih dari 8% hasil reaksi kimia yang terbentuk adalah Fe₂-3N serta zona difusi nitrogen dibawah lapisan nitride. Dengan ketentuan baja harus memiliki elemen paduan seperti Al, Ti, Cr, Mo, V, Nb, Zr (elemen karbida) agar dapat membentuk kulit keras berupa endapan paduan nitride (TiN, CrN, VN dan lain-lain). Untuk meningkatkan ketahanan aus *adhesive* dan *abrasive*, ketahanan leleh, dan ketahanan pelunakan pada temperature meningkat. Proses *Nitriding* sangat baik untuk baja dengan komposisi kimia: C, 0.2-0.3 %; Mn, 0.04-0.6% ; Al, 0.9-1.4 %; Cr, 0.9 to 1.4 %; dan Mo, 0.15-0.25 % (Rahardjo, 2008).



Gambar 2.13 Diagram Fe- N Pada Proses *Nitriding*

(Sumber: Anil Kumar Sinha, 2013).

2. Carburizing

Karburasi (*Carburizing*) merupakan proses termokimia atau chemical heat treatment yang dilakukan dengan mengubah komposisi kimia permukaan baja untuk memperkaya unsur karbon pada permukaan baja pada suhu 850-950°C (Malau, 1999), sehingga atom karbon aktif tersebut akan berdifusi masuk ke

dalam permukaan baja dan mencapai kedalaman tertentu. Hukum pertama Fick's menyatakan bahwa difusi dari sebuah elemen dalam suatu bahan substrat merupakan fungsi koefisien difusi dan gradien konsentrasi. Gradien konsentrasi adalah jumlah atom yang terdapat di sekitar substrat dibandingkan dengan jumlah atom yang terdapat di dalam substrat (Schonmetz & Gruber, 1994). Berdasarkan media yang digunakan, karburasi dapat dibedakan menjadi 3 cara yaitu : gas, cair, dan padat.

Proses *Carburizing* yang tepat akan menambah kekerasan permukaan sedang pada bagian inti. Proses *Carburizing* atau pengerasan permukaan dapat dilakukan dengan metode padat, cair dan gas (Amstead, 1979).

- a. Karburasi padat (*pack carburizing*) bahan dimasukkan kotak tertutup dan ruangan diisi dengan arang kayu atukokas ataupun bahan yang berunsur karbon. Prosesnya memerlukan waktu yang cukup lama.
- b. Karburasi gas (*gaz carburizing*) menggunakan gas alam atau hidro karbon maupun propan (gas karbit). Diterapkan untuk bagian - bagian yang kecil dan dapat dicelup setelah pemanasan dalam dapur.
- c. Karburasi cair (*liquid carburizing*) baja dipanaskan dalam suhu tertentu dan dalam dapur yang mengandung garam *cyanide* sehingga karbon dan sedikit nitrogen dapat berdifusi kedalam lapisan luar. Kulit luar memiliki kadar karbon yang lebih tinggi dan kadar nitrogen lebih rendah. Cara ini cocok untuk pengerasan permukaan benda berukuran sedang.

3. *Carbonitriding*

Proses karbonitriding (*Carbonitriding*) paling cocok untuk baja karbon rendah dan baja paduan karbon rendah. Dalam proses ini, baik Karbon dan Nitrogen berdifusi ke permukaan. Bagian dipanaskan dalam atmosfer hidrokarbon (seperti metana atau propana) dicampur dengan Amonia (NH₃). Prosesnya adalah campuran dari *Carburizing* dan *Nitriding*.

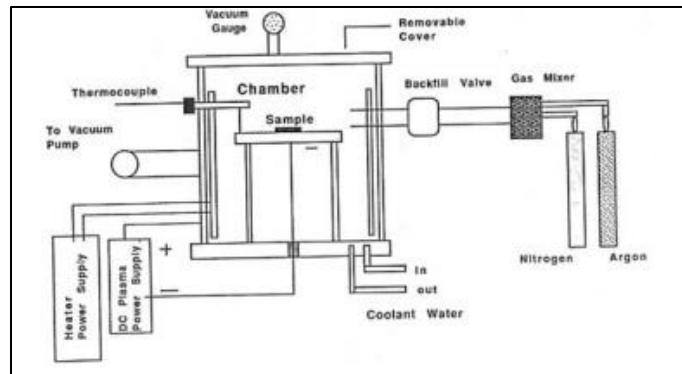
Karburasi melibatkan suhu tinggi (900°C, 1652°F) dan *Nitriding* melibatkan suhu yang jauh lebih rendah (600°C, 1112°F). Carbonitriding dilakukan pada suhu 760-870°C (1400-1598°F), yang lebih tinggi dari suhu transformasi baja yang merupakan daerah *austenit* yang berpusat pada muka. Kemudian didinginkan dalam atmosfer gas alam (bebas oksigen).

Quenching ini kurang drastis dibandingkan air atau minyak sehingga distorsinya lebih sedikit. Namun proses ini tidak cocok untuk bagian presisi tinggi karena distorsi yang melekat. Kekerasan yang dicapai mirip dengan karburasi (60-65 RC) tetapi tidak setinggi *Nitriding* (70 RC). Kedalaman Permukaan adalah dari 0,1 hingga 0,75 mm (0,004 hingga 0,030 in). Permukaan ini kaya akan Nitrida dan Martensit. Tempering diperlukan untuk mengurangi kerapuhan.

4. Nitro Carburizing

Nitrokarburisasi (*Nitro Carburizing*) termasuk juga suatu proses perlakuan panas termokimia. Proses ini biasanya dilakukan kira-kira pada *temperature* 570°C dengan mendifusikan karbon dan nitrogen kedalam permukaan baja, sehingga akan memperoleh lapisan permukaan yang keras, tipis dengan kedalaman 10-25 μm . Lapisan tersebut terdiri dari fasa ϵ -karbonitrida dengan kekerasan permukaan mencapai 500-700 HV yang sangat bermanfaat untuk meningkatkan ketahanan aus *adhesive* dari permukaan baja.

Dibawah lapisan fasa ϵ Fe-N-C tersebut terdapat suatu daerah zone difusi yang dapat mencapai tebal 1 mm, berisikan (*nitride*) nitrida besi atau paduan. Jika setelah perlakuan material tersebut didinginkan dalam air hangat atau minyak, maka sebagian besar nitrogen yang ada dalam zone difusi tersebut tertahan didalam larutan padat akan berpresipitasi dan meningkatkan kekuatan leleh dari material tersebut. Tujuan dari nitrokarburisasi untuk meningkatkan ketahanan baja feritik dan besi tuang terhadap korosi didalam air dan garam netral. Hal ini disebabkan karena sebagian besar penggunaan dari nitrokarburisasi memperluas sifat dari lapisan ϵ -karbonitrida dan proses ini digunakan pada baja karbon rendah, besi tuang dan baja paduan rendah. Sampel dimasukkan ke dalam dapur *fluidized bed* dengan program pada *controllernya* untuk proses *nitrocarburizing* pada suhu dan 750°C, 850°C, 950°C dengan lama waktu tahan sampai 120 menit.



Gambar 2.14 Siklus Proses *Nitro Carburizing*
(Sumber: Usman Sudjadi, 2010)

2.6 Konsep Teori Transformasi Fasa

2.7.1 Pengertian Transformasi Fasa

Transformasi Fasa adalah suatu perubahan yang terjadi pada fasa yang menyebabkan terjadinya perubahan pada struktur, bentuk, sifat dan karakteristiknya (Sialagan & Manaf, 2002). Transformasi fasa dapat dilakukan dengan mengatur temperatur, komposisi dan tekanan yang menyebabkan terjadi perubahan. Perubahan tingkat temperatur yang cepat dapat mempengaruhi peningkatan perkembangan pembentukan struktur mikro.

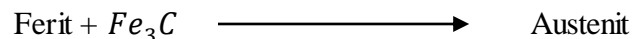
2.7.2 Jenis Transformasi Fasa

Transformasi fasa baja dibagi menjadi menjadi dua jenis yaitu sebagai berikut:

1. Transformasi Pemanasan

Transformasi fasa yang terjadi pada saat pemanasan dapat dipelajari dari diagram keseimbangan (diagram fase) besi karbida baja. Pada temperatur kamar baja karbon rendah terdiri dari butir-butir kristal ferit dan perlit dengan jumlah butir ferit lebih banyak dari butir perlit. Perbandingan jumlah butir ferit dan perlit tersebut sesuai dengan jumlah kadar karbon yang terkandung dalam baja karbon rendah tersebut. Semakin banyak jumlah kadar karbon semakin sedikit jumlah butir ferit dan semakin banyak butir perlitnya.

Pada baja karbon rendah jika dipanaskan hanya sampai temperatur dibawah temperatur krisis A1, maka belum tampak adanya perubahan struktur mikro. Dalam struktur mikro masih terlihat butir ferit dan perlit. Tetapi bila pemanasan dilanjutkan hingga tepat pada temperatur kritis A1, maka perlit akan mengalami reaksi *eutektoid*. Dimana butir ferit dan sementit dari perlit akan bereaksi menjadi austenit. Reaksi eutektoid pada saat pemanasan:



Reaksi *autektoid* ini berlangsung pada temperatur konstan dan temperatur tidak akan naik sebelum reaksi *eutektoid* selesai atau seluruh ferit dan sementit didalam perlit habis menjadi austenit. Setelah perlit habis dan mulai terjadi kenaikan temperatur, maka ferit - *preutektoid* akan mulai mengalami transformasi *allotropik*, ferit yang mempunyai bentuk struktur kristal BCC (*body centre cubic*) akan berubah menjadi austenit yang FCC (*face centre cubic*). Transformasi ini berlangsung bersamaan dengan naiknya temperatur. Makin tinggi temperatur pemanasan makin banyak ferit yang bertransformasi menjadi *austenite*.

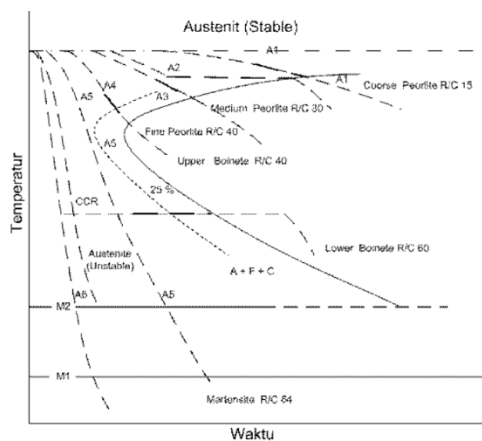
2. Transformasi Pendinginan

Dalam suatu proses perlakuan panas, setelah pemanasan mencapai temperatur yang ditentukan dan diberi waktu penahanan panas (*Holding time*) secukupnya maka dilakukan pendinginan dengan laju tertentu. Struktur mikro yang terjadi setelah pendinginan akan tergantung pada laju pendinginan. Karena sifat mekanik dari baja setelah akhir suatu proses perlakuan panas akan ditentukan oleh laju pendinginan. Transformasi austenit pada pendinginan memegang peranan penting terhadap sifat dari baja karbon.

Austenit dari baja *hypoutektoid* bila didinginkan secara lambat pada temperatur A3 mulai membentuk inti kristal austenit. Transformasi ini terjadi karena perubahan *allotropik* dari besi gamma (austenit) ke alpha (ferrit). Hal ini dikarenakan ferit hanya dapat melarutkan karbon dalam jumlah yang sangat kecil maka kandungan karbon dalam austenit akan semakin besar bila ferit yang tumbuh banyak (dengan makin turunnya temperatur). Besarnya kandungan

karbon dalam temperatur kritis A3, sehingga pada saat temperatur mencapai temperatur kritis A1, komposisi austenit sama dengan komposisi *eutektoid* dan pada waktu itu austenit berdeformasi.

Tumbuhnya perlit diawali dengan tumbuhnya inti sementit pada batas butir austenit. Untuk tumbuhnya sementit diperlukan sejumlah besar karbon yang akan diperoleh dari austenit sekitarnya. Dengan demikian austenit disekitar sementit miskin karbon dan menjadi ferit. Perpindahan atom ini berlangsung secara difusi, oleh karena itu memerlukan waktu yang cukup. Pada proses *case hardening* bila austenit didinginkan secara cepat, maka transformasi sementit (karbida besi) tidak terjadi dan produk transformasi austenit akan berubah menjadi fasa baru yang dikenal sebagai bainit dan martensit. Bainit terbentuk bila austenit didinginkan dengan cepat hingga mencapai temperatur tertentu. Transformasi bainit ini disebabkan sebagian karena proses difusi dan sebagian lagi karena proses tanpa difusi.



Gambar 2.15 Kurva Pendinginan

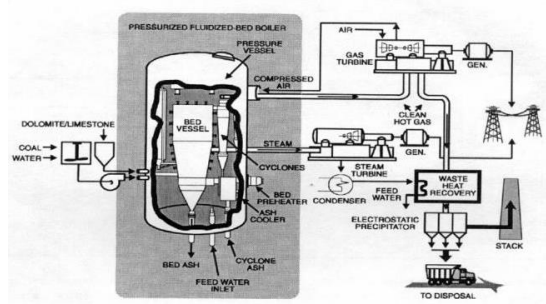
2.7 Konsep Teori *Fluidized Bed Furnance*

2.7.1 Pengertian *Fluidized Bed Furnance*

Teknologi *Fluidized Bed Furnance* saat ini telah dimanfaatkan untuk proses perlakuan termokimia gas dalam menghasilkan kekerasan permukaan baja dan besi cor. Serbuk alumina dimanfaatkan sebagai media pada teknologi ini bertujuan untuk meningkatkan transfer panas dari dinding dapur menuju ke spesimen dengan demikian akan menghasilkan peningkatan kualitas pengeras permukaan. Namun kualitas pengeras permukaan sangat ditentukan oleh paduan besi cor tersebut. Perbedaan unsur paduan bahan akan menghasilkan lapisan pasif yang berbeda pada permukaan masing-masing bahan tersebut sehingga akan mempengaruhi transfer panas dipermukaan spesimen.

Fluidized bed furnace memberikan keuntungan karena permukaan material dipanaskan lebih cepat, menghasilkan pengaruh daerah panas yang kecil, kecermatan pada pengontrolan saat perlakuan permukaan dan pada saat proses perlakuan tidak

berkontaminasi dengan udara luar. Ini dapat terjadi akibat peran serbuk alumina dalam teknologi reaktor *fluidized bed*.



Gambar 2.16 Skema *Fluidized Bed Furnace*
(Sumber: www.Slideserve.Com)

2.7.2 Supply Gas Dalam *Fluidized Bed Furnace*

Penelitian Rahardjo (2008) dijelaskan bahwa, pada saat melakukan perlakuan panas di *Fluidized Bed Furnance* memakai beberapa jenis gas sesuai dengan proses yang dilakukan, untuk jenis gas yang dipakai dalam *Fluidized Bed Furnance* yaitu:

1. Oksigen (O₂)

Gas oksigen berfungsi sebagai *fluidising* pada waktu pemanasan sampai suhu 500°C dan pendinginan dari suhu 500°C sampai suhu kamar.

2. Nitrogen (N₂)

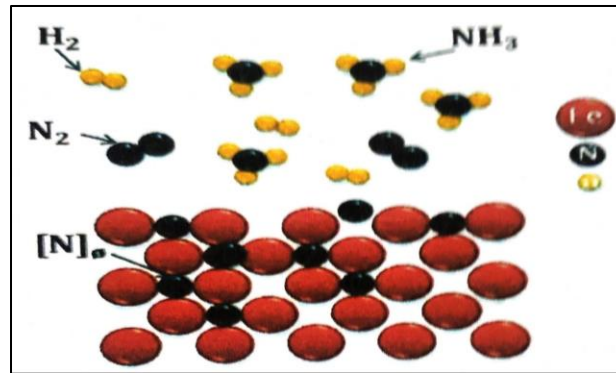
Nitrogen berfungsi sebagai *fluidising* untuk pemanasan dari suhu 500°C sampai suhu proses perlakuan untuk mencegah terjadinya oksidasi pada material atau logam yang dipanaskan karena ditemperatur tersebut getaran atom sangat tinggi yang menyebabkan udara luar masuk ke dalam sistem. Fungsi utama dari nitrogen yaitu untuk memberikan tekanan yang besar dalam sistem agar membantu proses reaksi kimia saat gas proses.

3. Natural Gas (LPG dan Metana)

Berfungsi sebagai gas pembentuk karbon akibat reaksi kimia dengan Fe dan nitrogen untuk membentuk karbida dalam karbon rendah. Gas ini digunakan dalam proses *Carburizing*, *Carbonitriding* dan *NitroCarburizing*.

4. Amonia (NH₃)

Digunakan pada proses *Nitriding*, *Carbonitriding* dan *Nitro Carburizing*. Diamana unsur N dari ammonia (NH₃) membentuk reaksi kimia dengan Fe, Al, Cr, Mo, V supaya membentuk lapisan nitrida dipermukaan logam.



Gambar 2.17 Suplay Gas Dalam *Fluidized Bed Furnace*
(Sumber: Zamzami, 2017)

2.7.3 Media Pemanasan *Fluidized Bed Furnace*

Pada *fluidized bed furnace* yang digunakan penelitian ini menggunakan media pemanasan berupa serbuk *aluminium oxide* (Al_2O_3) berfungsi sebagai partikel pengantar panas ke permukaan logam yang diproses Rahardjo (2016). Serbuk *aluminium oxide* terdiri dari:

1. *Coarse grit* (berwarna hitam kasar), berfungsi sebagai partikel dasar atau partikel sebelum *fine grit* dengan ukuran 64 mm dari dasar tungku.
2. *Fine grit* (berwarna putih halus), berfungsi sebagai partikel pengantar.

2.7.4 Karakteristik *Fluidized Bed Furnace*

Karakteristik yang penting dalam *Fluidized Bed* adalah perpindahan panas yang menghasilkan efisiensi yang tinggi. Gejala fluidisasi disebabkan oleh partikel oksida inert halus, kering dan bertingkah laku seperti zat cair, bila partikel satu dengan yang lainnya terpisah oleh gas yang bergerak melewati *bed*. Suatu *fluidized bed* gas dapat ditinjau sebagai fasa padatan selama menunjukkan batas atas yang teridentifikasi secara jelas. Pada kecepatan aliran gas terlalu tinggi, kecepatan akhir padatan terlewati, batas atas *bed* menghilang dan dalam kondisi demikian padatan terlempar dari dapur oleh aliran gas.

Meskipun sifat padatan dan cairan itu sendiri menentukan mutu dari fluidasi, banyak faktor yang mempengaruhi jumlah dari campuran padatan yang mempunyai sifat tidak sejenis didalam *bed*. Faktor-faktor ini termasuk ukuran dari *bed*, jumlah aliran gas dan jenis dari gas yang digunakan. Didalam menentukan mutu fluidasi, suatu diagram penurunan tekanan (Δp) terhadap (μo) bermanfaat sebagai gambaran, jika pengamatan visual tidak memungkinkan (Smallman & Bishop, 1995).

2.7.5 Parameter *Fluidized Bed Furnace*

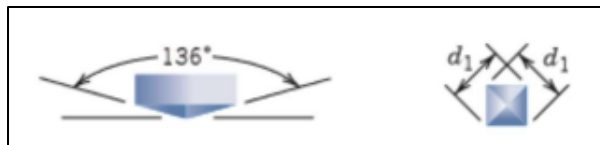
Adanya aliran turbulen dan pergerakan cepat dari fluida (*aluminium* dan *silika*), menyebabkan peningkatan koefisien perpindahan panas. Koefisien perpindahan panas pada *fluidized bed* biasanya atau umumnya antara 120-1200 W/m² C. Ada beberapa faktor-faktor yang mempengaruhi koefisien perpindahan panas yaitu:

1. Diameter partikel
Memberikan pengaruh terhadap perpindahan panas. Pada umumnya diupayakan ukuran partikel sekecil mungkin, namun dibawah ukuran yang ditetapkan akan menyulitkan proses, ukuran optimal partikel yaitu 100 μm .
2. Material *bed*
Yang menentukan sifat fisik dari berbagai material *bed* adalah kerapatan. Kerapatan yang optimal untuk *bed* berkisaran antara 1280-1600 kg/m^3 . Material yang lebih rapat menghasilkan koefisien perpindahan panas rendah dan dibutuhkan tenaga lebih besar untuk fluidisasi. Umumnya material *bed* yang digunakan adalah alumina pada kondisi operasi diatas temperatur 1050°C, maka material *bed* yang digunakan adalah *pitch coke* yang sama seperti alumina tidak memeberikan pengaruh bahaya pada kesehatan dan lingkungan.
3. Kecepatan fluidisasi gas
Kecepatan fluidisasi optimal akan menghasilkan kecepatan perpindahan panas maksimal. Biasanya berkisar antara 2-3 kali kecepatan fluidisasi minimum. Kecepatan fluidisasi yang terlalu tinggi menyebabkan komsumsi dari gas fluida juga tinggi dan perpindahan panas rendah. Sedangkan kecepatan fluidisasi terlalu rendah akan menyebabkan perpindahan panas berkurang.

2.8 Pengujian Yang Digunakan

2.8.1 Uji Kekerasan Vickers (Micro-Vickers)

Pengujian kekerasan metode Vickers menggunakan indentor intan berbentuk piramida dengan sudut sebesar 136°



Gambar 2.18 Bentuk Indentor Dan Hasil Indentasi Vickers.
(Sumber: Dieter, 1988).

Vickers Hardness Number (VHN) didapatkan melalui hasil pembagian antara beban yang digunakan dengan luas area indentasi. Luas area indentasi ini didapatkan melalui panjang diagonal hasil indentasinya (Dieter, 1988). Pengujian kekerasan Vickers menggunakan standar ASTM E92. Secara matematis, perhitungan VHN dapat dinyatakan seperti Persamaan 2.6 di bawah ini.

$$VHN \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = \frac{1,854P}{L^2}$$

Dimana:

P : beban yang digunakan.

L : panjang rata-rata diagonal (mm).

2.17.2 Uji Mikrostruktur SEM-EDX / SEM-EDS

Pada dasarnya adalah pengembangan dari SEM (Scanning Electron Microscopy) dengan digabungkan bersama EDX (*Energy Dispersive of X-ray Spectroscopy*). SEM sendiri adalah mikroskop perbesaran tinggi yang mencitrakan permukaan sampel dengan menggunakan pemindaian oleh pancaran elektron. SEM bekerja dengan menembakkan elektron berenergi tinggi (1-20 keV) melewati sampel dan kemudian mendeteksi “*secondary electron*” dan “*backscattered electron*” dan x-ray karakteristik.

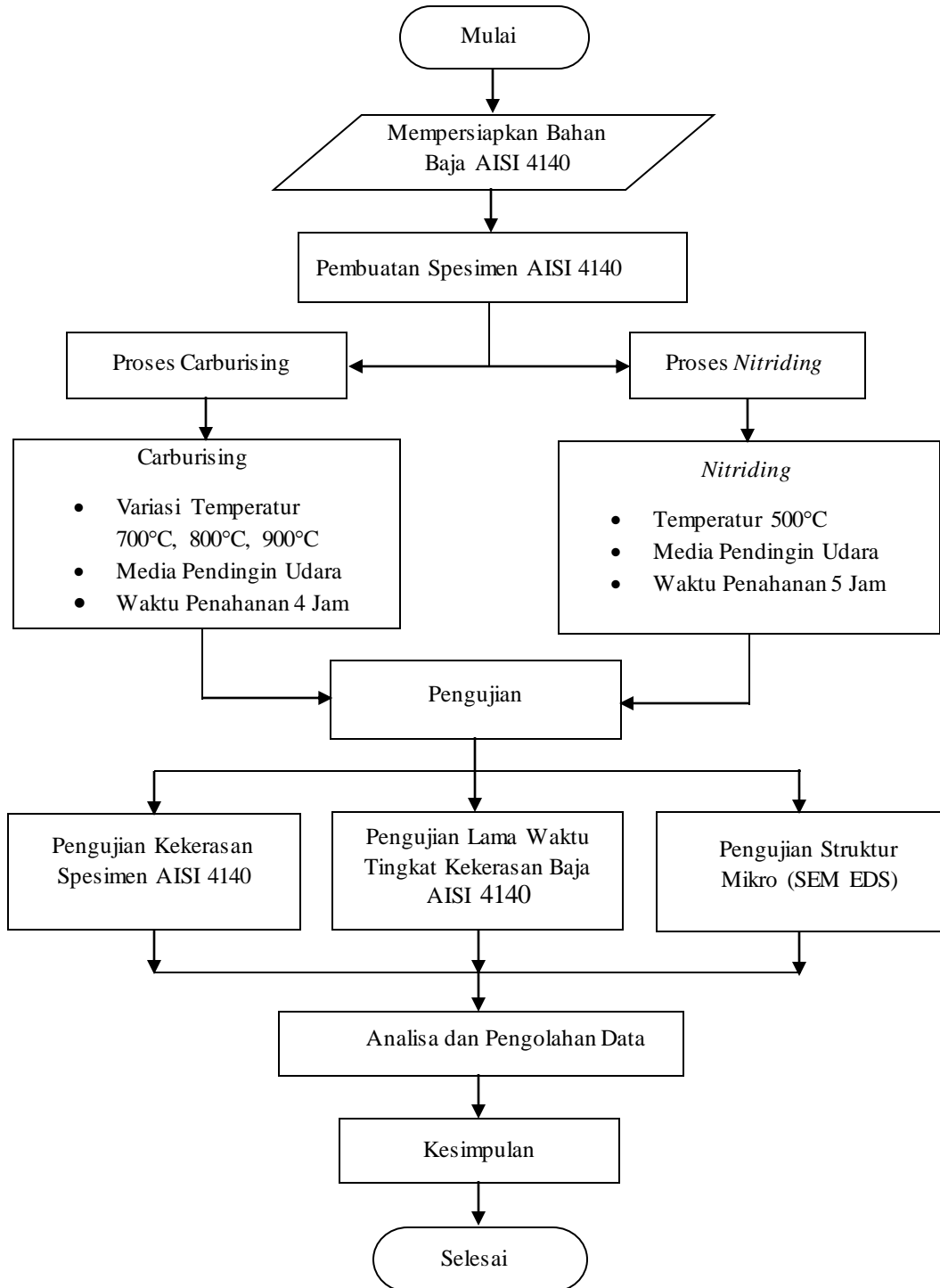
EDX merupakan salah satu teknik untuk menentukan komposisi atom pada sampel. Dasar dari analisis EDX adalah pelacakan dan pengukuran dari sifat-sifat 50 sinar-X yang dibangkitkan oleh elektron-elektron cepat. Kedalaman penetrasi dari berkas elektron ke dalam sampel diberikan oleh persamaan (Feldman *et al*, 1986) :

$$x(\mu m) = \frac{0,1E0^{1,5}}{\rho}$$

Dengan $E0$ adalah tegangan pemercepat berkas elektron (dalam keV), ρ adalah kerapatan dari sampel (dalam g/cm^3). Analisis unsur EDX dilakukan dengan membandingkan rasio intensitas sinar-X dari unsur yang terdapat di dalam sampel dengan elemen yang sama dari sampel standar. Karakteristik dari sinar-X yang dibangkitkan dari masing-masing unsur sebanding dengan konsentrasi dari unsur, probabilitas produksi sinar-X atau tampang lintang ionisasi unsur, dan panjang lintasan dari elektron-elektron.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir

3.2 Penjelasan Diagram Alir

1. Studi Literatur

Studi literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat, serta mengelolah bahan penelitian. Menurut Danial dan Warsiah (2009:80), Studi Literatur adalah merupakan penelitian yang dilakukan oleh peneliti dengan mengumpulkan sejumlah buku buku, majalah yang berkaitan dengan masalah dan tujuan penelitian.

2. Persiapan Spesimen Baja AISI 4140

Melakukan pembelian Baja AISI 4140 yang sudah di potong dengan ukuran 1,5 cm / spesimen untuk dilakukan proses pengujian.

3. Pengujian Variasi

Untuk variasi pengujiannya melakukan uji kekerasan dan struktur mikro, dimana tujuan dilakukannya uji kekerasan untuk menambah kekerasan pada permukaan baja. Sedangkan struktur mikro untuk mengetahui kandungan yang terdapat pada baja yang akan diuji, spesimen yang akan di uji sudah dihaluskan permukaannya agar terlihat kandungannya.

4. Pengolahan Data dan Pembahasan

Proses pengolahan data dilakukan dengan cara membandingkan 27 spesimen dengan metode taguchi, kekerasan yang ada pada permukaan baja AISI 4140 dengan proses *carburising* dan *nitriding* variabel suhu 700°C, 800°C, 900°C. Dengan media pendingin udara. Dimana setelah di *carburising* dan *nitriding* dengan media pendingin yang akan terlihat perubahan kekerasannya. Setelah di uji kekerasan akan dilakukan uji struktur mikro dimana untuk mengetahui seberapa dalam kandungan ferrit, martensit, sementit, perlit dan martensit setelah dilakukan perlakuan panas pada permukaan baja.

5. Kesimpulan

Proses penarikan kesimpulan adalah proses akhir dari penelitian yang berisi kesimpulan dari komparasi kualitas material hasil pengujian dengan pengaruh variasi temperature dan variasi pendingin terhadap permukaan baja dengan proses *Carburizing* dan *nitriding*

3.3 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Waktu penelitian dimulai dari bulan Juni 2022 hingga Juli 2022. Penelitian dilakukan di Kampus Institut Teknologi Nasional Malang di Laboratorium Kampus 2 Institut Teknologi Nasional dan pengujian dilakukan di Universitas Merdeka di Laboratorium Material Universitas Merdeka Malang.

3.4 Perencanaan Penelitian

Tabel 4.1 Setting level Taguchi

Level	Ketebalan Baja	Variasi Temperatur	Penahanan Waktu
1	1,5 cm	700°C	180 Menit
2	1,5 cm	800°C	180 Menit
3	1,5 cm	900°C	180 Menit

Pada rencana penelitian terdapat beberapa variabel yang digunakan yaitu:

1. Variabel bebas adalah variabel yang ditentukan sebelum penelitian
2. Variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi yang dilakukan tanpa ada perlakuan panas dan sesudah dilakukan perlakuan panas.
3. Variabel tetap adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas.
4. Variabel tetap pada penelitian ini adalah variasi media pendinginan udara.
5. Variabel kontrol adalah variabel yang besarnya dikendalikan selama penelitian.
6. Variabel kontrol pada penelitian ini adalah variasi pemanasan 700°C, 800°C, 900°C.

3.5 Komponen Penelitian

Pada bagian komponen penelitian ini merupakan sumber pribadi dari penulis yang bertujuan untuk membantu penulis dalam memberikan suatu skema alat dan bahan yang akan dibutuhkan dalam proses *Carburizing* dan *nutriding*

3.5.1 Alat

1. *Fluidized bed furnace*

Alat ini digunakan sebagai tempat proses *surface hardening* berupa *nitrocarburizing* pada material baja paduan rendah AISI 4140 yang akan dilakukan penelitian. Proses penelitian dilaksanakan di laboratorium material jurusan Teknik Mesin ITN Malang.



Gambar 3.2 *Fluidized Bed Furnace*
(Sumber: Reinaldo, 2022)

2. *Wire Cutting*

Alat dipakai untuk pemotongan specimen pengujian agar sesuai dengan ukuran sampel uji. Untuk mengetahui lapisan yang ada setelah proses penelitian.



Gambar 3.3 Mesin *Wire Cutting*
(Sumber: Reinaldo, 2022)

3. *Grinding-Polish*

Digunakan untuk preparasi permukaan sampel. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 di bawah ini:



Gambar 3.4 Mesin *Grinding-Polish*.
(Sumber: Future-Tech, 2011).

4. Uji Kekerasan

Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan material. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 di bawah ini:



Gambar 3.5 Mesin HBRV *Universal Hardness Tester* 187.5A
(Sumber: Aria Narendra Adhi, 2020)

5. Mikro Struktur

Untuk melihat tebal lapisan yang terbentuk pada permukaan baja yang telah di *nitroCarburizing*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 di bawah :

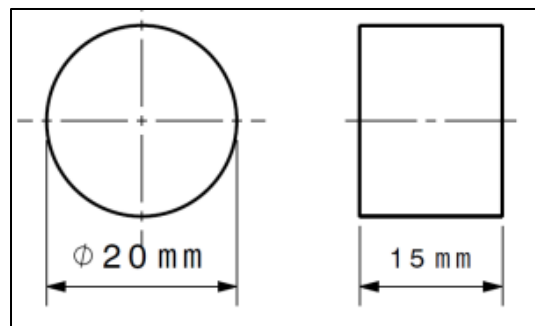


Gambar 3.6 Mikroskop optik Olympus BX51M
(Sumber: Aria Narendra Adhi, 2020)

3.5.2 Bahan

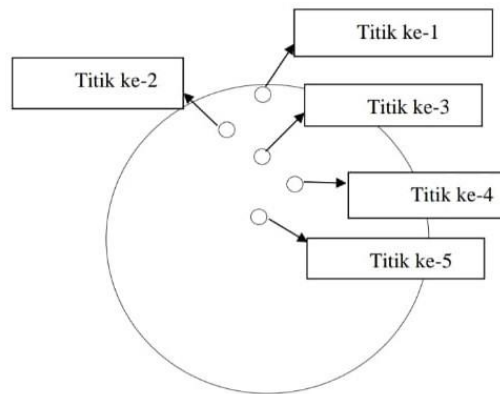
Material yang akan diuji yaitu baja paduan rendah AISI 4140. Spesimen dilakukan pemotongan sesuai dengan kapasitas dari alat uji dan juga untuk memudahkan dalam waktu pengujian, yakni:

1. Gambar 3.7 merupakan ukuran spesimen uji yang akan dipakai pada penelitian kali ini, spesimen yang awalnya berbentuk silinder tabung dipotong menggunakan mesin *wire cutting* untuk dijadikan sesuai ukuran yang tertera pada gambar diatas.



Gambar 3.7 Ukuran spesimen pengujian
(Sumber: Dokumen Penulis)

2. Gambar 3.8 merupakan titik pengujian yang diambil saat proses pengujian kekerasan dengan metode vickers.



Gambar 3.8 Titik pengujian Struktur Mikro yang diambil.
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

3. Gambar 3.9a pada bagian kiri merupakan spesimen uji yang belum diproses atau yang tidak diproses. Gambar 3.9b pada bagian kanan terlihat spesimen uji yang sudah dilakukan proses penelitian berupa karburasi dan nitridasi. Terlihat perbedaan dari keduanya yaitu warna dari spesimen uji itu sendiri, yang tidak diproses berwarna putih mengkilap dan yang sebaliknya setelah proses terlihat lebih gelap atau bahkan dapat terlihat hitam.



Gambar 3.9 A. Sebelum proses dan B. Sesudah proses
(Sumber: Dokumen Penulis)

3.6 Waktu dan Tempat Penelitian

Dalam tempat pelaksanaan penelitian terbagi menjadi 2 yaitu untuk proses perlakuan panas carburizing dan nitriding dilakukan di laboratorium metalurgi jurusan Teknik mesin ITN Malang, sedangkan untuk pengujian mikro Vickers dan SEM-EDX dilakukan di Universitas Negeri Malang. Proses penelitian dimulai dari bulan November 2021 sampai selasi proses pengujiannya.

3.7 Prosedur Penelitian

3.7.1 Sampel Penelitian

Dalam penelitian ini bahan yang akan diteliti yaitu baja paduan rendah AISI 4140, spesimen dipotong sesuai ukuran yang sudah ditentukan sesuai kapasitas mesin uji.

3.7.2 Proses Perlakuan Panas Carburizing

Pada proses *carburizing* dilakukan pada *fluidized bed furnace* dengan variasi temperatur proses 700°C, 800°C dan 900°C, waktu penahanan untuk tiap proses yang dipakai yaitu 4 jam serta media pendingin yaitu udara . Pada proses ini ada 3 spesimen yang dimasukkan kedalam tungku setiap holding time akan ditarik 1 spesimen untuk diikutkan proses quenching.

3.7.8 Proses Perlakuan Panas Nitriding

Pada proses nitriding semua spesimen yang telah di carburizing dengan variasi temperatur dimasukkan sekaligus pada *fluidized bed furnace* dengan temperatur proses 500°C, waktu penahanan yang dipakai yaitu 5 jam. Media pendingin yang dipakai yaitu udara.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

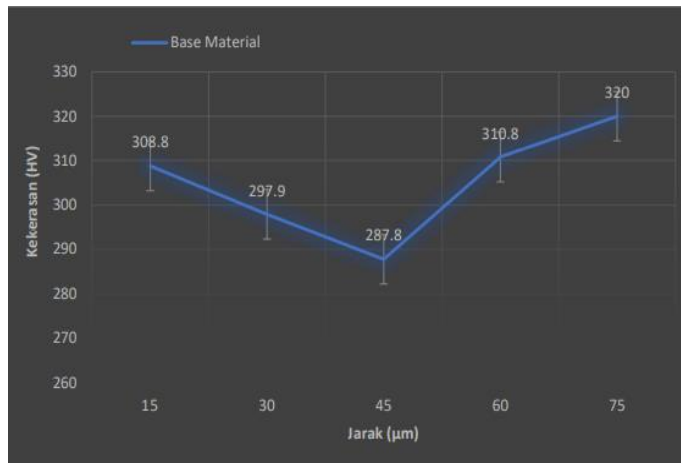
4.1 Data Hasil Pengujian

4.1.1 Data Hasil Pengujian Distribusi Kekerasan

Dari proses kombinasi antara *Carburizing* dan *Nitriding* yang dilakukan menggunakan fluidized bed furnace dapat di evaluasi dengan melakukan pengujian kekerasan dengan maksud untuk mengetahui kedalaman difusi permukaan dengan menggunakan metode pengujian micro-vickers. Data diambil sebanyak lima titik untuk mengetahui sejauh mana difusi karbon dan juga nitrogen pada permukaan Baja AISI 4140. Data hasil pengujian kekerasan permukaan dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4.1 Nilai Kekerasan Base Material

Kode Spesimen	Titik Pengujian	Jarak (μm)	Kekerasan (HV)	Nilai Rata-Rata (HV)
AISI 4140 Tanpa Perlakuan (<i>Base Material</i>)	Titik ke-1	15 μm	308.8	305.06
	Titik ke-2	30 μm	297.9	
	Titik ke-3	45 μm	287.8	
	Titik ke-4	60 μm	310.8	
	Titik ke-5	75 μm	320.0	



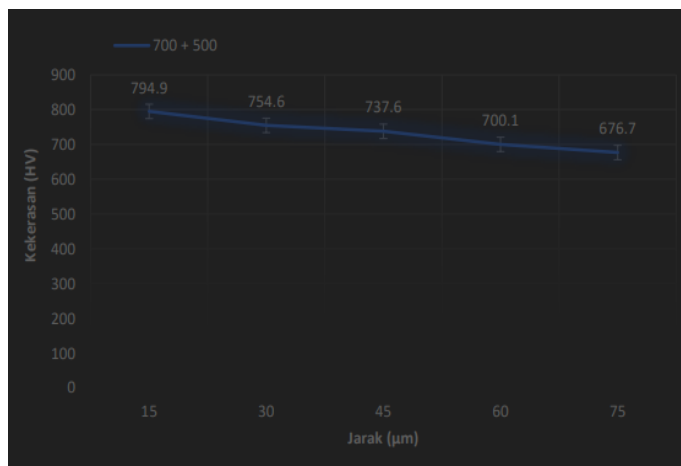
Grafik 4.1 Hubungan Antara Kekerasan Dengan Jarak *Base Material*

Dari hasil pengujian distribusi kekerasan dengan metode pengujian micro-vickers didapatkan kekerasan pada material awal atau material tanpa perlakuan sebesar 308,8 HV pada jarak 15 μm , 297,9 HV pada jarak 30 μm , 287,8 HV pada jarak 45 μm , 310,8 HV pada jarak 60 μm , dan 320 HV pada jarak 75 μm . Dari grafik diatas menunjukkan bahwa nilai kekerasan yang tinggi terletak pada titik ke-5 pada jarak 75 μm yaitu sebesar 320 HV. Maka hal tersebut sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa nilai kekerasan baja paduan rendah AISI 4140 ialah sebesar ± 300 HV. Dari setiap titik pengujian didapatkan

penurunan maupun kenaikan hal ini dikarenakan pada baja AISI 4140 tanpa perlakuan memiliki nilai kekerasan antara ± 300 HV.

Tabel 4.2 Nilai Kekerasan Kombinasi *Carburizing* (700°C) dan *Nitriding* (500°C)

Kode Spesimen	Titik Pengujian	Jarak (μm)	Kekerasan (HV)	Nilai Rata-Rata (HV)
AISI 4140 • <i>Carburizing</i> 700°C (4 Jam) • <i>Nitriding</i> 500°C (5 Jam)	Titik ke-1	15 μm	794.9	732.78
	Titik ke-2	30 μm	754.6	
	Titik ke-3	45 μm	737.6	
	Titik ke-4	60 μm	700.1	
	Titik ke-5	75 μm	676.7	



Grafik 4.2 Hubungan Antara Kekerasan Dengan Jarak *Carburizing* (700°C) Dan *Nitriding* (500°C)

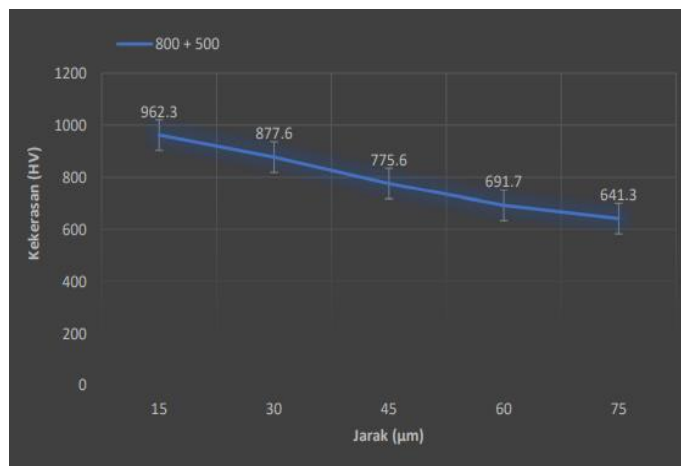
Dari hasil pengujian distribusi kekerasan dengan metode pengujian micro-vickers didapatkan kekerasan pada material yang telah melalui proses berupa kombinasi *Carburizing* 700°C dan *Nitriding* 500°C sebesar 794.9 HV pada jarak 15 μm , 754.6 HV pada jarak 30 μm , 737.6 HV pada jarak 45 μm , 700.1 HV pada jarak 60 μm , dan 676.7 HV pada jarak 75 μm . Dari grafik diatas menunjukkan bahwa nilai kekerasan yang tinggi terletak pada titik ke-1 pada jarak 15 μm yaitu sebesar 794.9 HV. Hal ini menunjukkan bahwa kekerasan pada permukaan atau kekerasan paling pinggir akan ditemukan jauh lebih besar daripada kekerasan yang terletak dekat pada sumbu spesimen. Hal tersebut sesuai dengan apa yang dimaksud dengan pengerasan permukaan (*surface hardening*).

Dari setiap titik pengujian antara 15 μm , 30 μm , 45 μm , 60 μm , dan 75 μm menunjukkan grafik yang menurun hal ini dikarenakan titik pengujian pada titik 15 μm merupakan titik pengujian paling tepi, pengujian pada titik paling tepi merupakan hasil yang sangat keras dikarenakan penelitian ini merupakan penelitian surface hardening atau perlakuan panas pada permukaan dengan tujuan untuk merubah sifat keras dan tahan aus pada permukaan material. Sesuai dengan gambar 4.2 yang merupakan gambar titik pengujian yang diambil semakin lama titik mengujian semakin menuju bagian inti dari

material, sehingga pada titik 75 μm memiliki nilai kekekrasan yang lebih kecil daripada titik 15 μm .

Tabel 4.3 Nilai Kekerasan Kombinasi *Carburizing* (800°C) dan *Nitriding* (500°C)

Kode Spesimen	Titik Pengujian	Jarak (μm)	Kekerasan (HV)	Nilai Rata-Rata (HV)
AISI 4140 • <i>Carburizing</i> 800°C (4 Jam) • <i>Nitriding</i> 500°C (5 Jam)	Titik ke-1	15 μm	962.3	789.7
	Titik ke-2	30 μm	877.6	
	Titik ke-3	45 μm	775.6	
	Titik ke-4	60 μm	691.7	
	Titik ke-5	75 μm	641.3	



Grafik 4.3 Hubungan Antara Kekerasan Dengan Jarak *Carburizing* (800°C) Dan *Nitriding* (500°C)

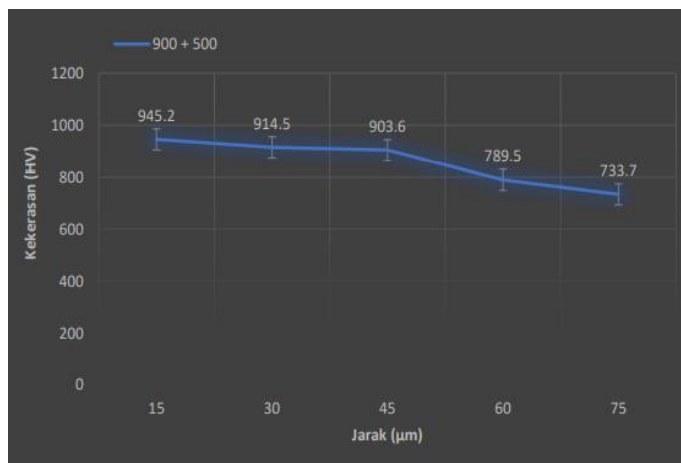
Dari hasil pengujian distribusi kekerasan dengan metode pengujian micro-vickers didapatkan kekerasan pada material yang telah melalui proses berupa kombinasi *Carburizing* 800°C dan *Nitriding* 500°C sebesar 962.3 HV pada jarak 15 μm , 877.6 HV pada jarak 30 μm , 775.6 HV pada jarak 45 μm , 691.7 HV pada jarak 60 μm , dan 641.3 HV pada jarak 75 μm . Dari grafik diatas menunjukkan bahwa nilai kekerasan yang tinggi terletak pada titik ke-1 pada jarak 15 μm yaitu sebesar 962.3 HV. Hal ini menunjukkan bahwa kekerasan pada permukaan atau kekerasan paling pinggir akan ditemukan jauh lebih besar daripada kekerasan yang terletak dekat pada sumbu spesimen. Hal tersebut sesuai dengan apa yang dimaksud dengan pengerasan permukaan (*surface hardening*).

Dari setiap titik pengujian antara 15 μm , 30 μm , 45 μm , 60 μm , dan 75 μm menunjukkan grafik yang menurun hal ini dikarenakan titik pengujian pada titik 15 μm merupakan titik pengujian paling tepi, pengujian pada titik paling tepi merupakan hasil yang sangat keras dikarenakan penelitian ini merupakan penelitian *surface hardening* atau perlakuan panas pada permukaan dengan tujuan untuk merubah sifat keras dan tahan aus pada permukaan material. Sesuai dengan gambar 4.3 yang merupakan gambar titik pengujian yang diambil semakin lama titik mengujian semakin menuju bagian inti dari

material, sehingga pada titik 75 μm memiliki nilai kekekrasan yang lebih kecil daripada titik 15 μm .

Tabel 4.4 Nilai Kekerasan Kombinasi *Carburizing* (900°C) dan *Nitriding* (500°C)

Kode Spesimen	Titik Pengujian	Jarak (μm)	Kekerasan (HV)	Nilai Rata-Rata (HV)
AISI 4140 • <i>Carburizing</i> 900°C (4 Jam) • <i>Nitriding</i> 500°C (5 Jam)	Titik ke-1	15 μm	945.2	857.3
	Titik ke-2	30 μm	914.5	
	Titik ke-3	45 μm	903.6	
	Titik ke-4	60 μm	789.5	
	Titik ke-5	75 μm	733.7	



Grafik 4.4 Hubungan Antara Kekerasan Dengan Jarak *Carburizing* (900°C) Dan *Nitriding* (500°C)

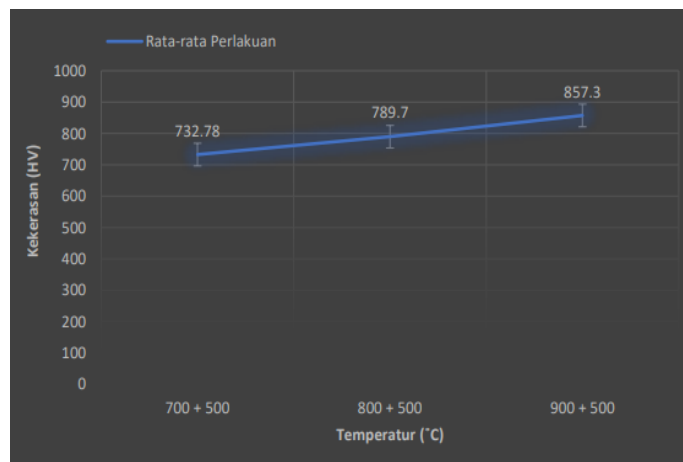
Dari hasil pengujian distribusi kekerasan dengan metode pengujian micro-vickers didapatkan kekerasan pada material yang telah melalui proses berupa kombinasi *Carburizing* 900°C dan *Nitriding* 500°C sebesar 945.2 HV pada jarak 15 μm , 914.5 HV pada jarak 30 μm , 903.6 HV pada jarak 45 μm , 789.5 HV pada jarak 60 μm , dan 733.7 HV pada jarak 75 μm . Dari grafik diatas menunjukkan bahwa nilai kekerasan yang tinggi terletak pada titik ke1 pada jarak 15 μm yaitu sebesar 945.2 HV. Hal ini menunjukkan bahwa kekerasan pada permukaan atau kekerasan paling pinggir akan ditemukan jauh lebih besar daripada kekerasan yang terletak dekat pada sumbu spesimen. Hal tersebut sesuai dengan apa yang dimaksud dengan pengerasan permukaan (*surface hardening*).

Dari setiap titik pengujian antara 15 μm , 30 μm , 45 μm , 60 μm , dan 75 μm menunjukkan grafik yang menurun hal ini dikarenakan titik pengujian pada titik 15 μm merupakan titik pengujian paling tepi, pengujian pada titik paling tepi merupakan hasil yang sangat keras dikarenakan penelitian ini merupakan penelitian *surface hardening* atau perlakuan panas pada permukaan dengan tujuan untuk merubah sifat keras dan tahan aus pada permukaan

material. Sesuai dengan gambar 4.4 yang merupakan gambar titik pengujian yang diambil semakin lama titik mengujian semakin menuju bagian inti dari material, sehingga pada titik 75 μm memiliki nilai kekekrasan yang lebih kecil daripada titik 15 μm .

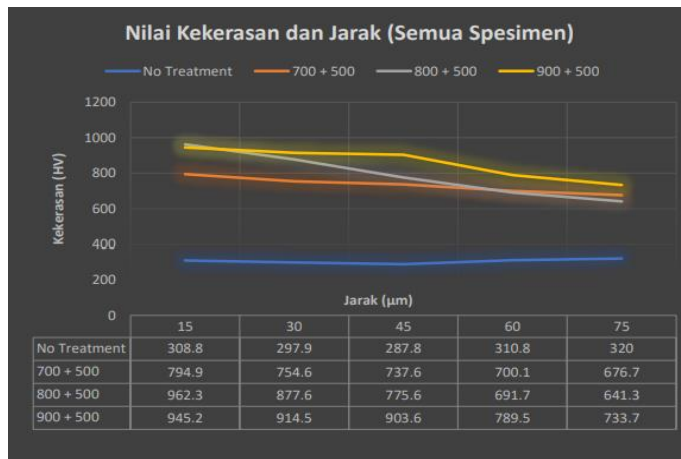
Tabel 4.5 Nilai Rata-Rata Kekerasan

Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Nilai Rata-Rata (HV)
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Carburizing</i> (700°C) • <i>Nitriding</i> (500°C) 	732.78
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Carburizing</i> (800°C) • <i>Nitriding</i> (500°C) 	789.7
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Carburizing</i> (900°C) • <i>Nitriding</i> (500°C) 	857.3



Grafik 4.5 Hubungan Nilai Rata-Rata Kekerasan Dan Variasi Temperatur

Dari perhitungan rata-rata dengan variasi temperatur *Carburizing* didapatkan kekerasan pada material baja paduan rendah AISI 4140 sebesar 732.78 HV pada temperatur *Carburizing* 700°C dan *Nitriding* 500°C , 789.7 HV pada *Carburizing* 800°C dan *Nitriding* 500°C , dan 857.3 HV pada *Carburizing* 900°C dan *Nitriding* 500°C . Dari grafik diatas, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur *Carburizing* semakin tinggi juga nilai kekerasan yang didapat.

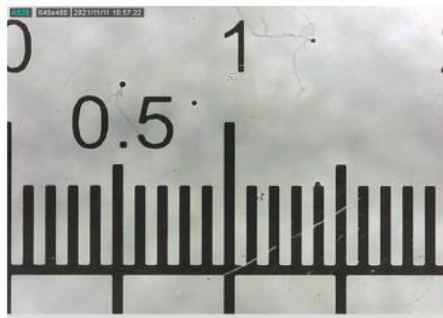


Grafik 4.6 Hubungan nilai kekerasan dan jarak untuk semua spesimen

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa terdapat perubahan yang cukup signifikan pada material tanpa perlakuan dengan material yang diberi perlakuan, terutama pada perlakuan karburasi pada temperatur $800^{\circ}\text{C} + 500^{\circ}\text{C}$ dan $900^{\circ}\text{C} + 500^{\circ}\text{C}$.

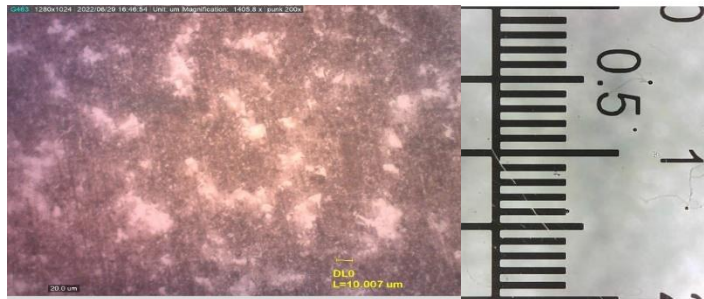
4.1.2 Data Hasil Pengujian Mikroskop-Optik

Dari hasil pengujian mikroskop-optik pada semua spesimen yang telah melalui proses kombinasi *carburizing* dan *nitriding*, dapat diketahui tebal lapisan yang terbentuk dengan cara karbon dan nitrogen yang terdifusi saat proses berlangsung. Tebal lapisan dapat menunjukkan sejauh mana difusi yang terjadi pada setiap spesimen yang diproses dengan variasi temperatur masing-masing dan juga *holding time*, kedua hal itu merupakan faktor yang mempengaruhi difusi yang terjadi.



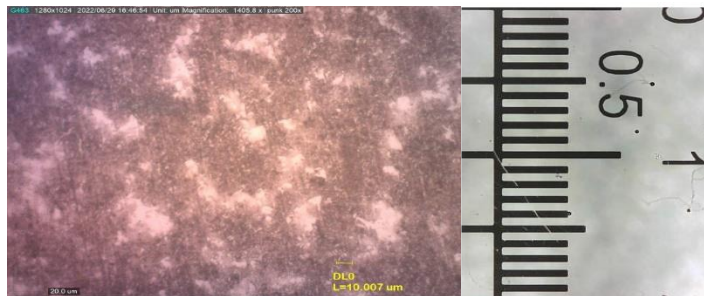
Gambar 4.1 Ukuran Sebagai Acuan Mikroskop-Optik

Gambar 4.2 merupakan ukuran yang digunakan dengan perbesaran 200x pada pengujian mikroskop optik kali ini. Dari panjang dan lebar juga sama yaitu 2 cm. Gambar 4.2 merupakan gambar hasil pengamatan dengan mikroskop optik pada proses karburasi dengan temperatur 700°C menggunakan waktu penahanan 3 jam dan proses nitridasi dengan temperatur 500°C menggunakan waktu penahanan 5 jam didapatkan ketebalan lapisan 0,04 mm atau sebesar 40 μm .



Gambar 4.2 Tebal Lapisan Mikroskop-Optik 700°C + 500°C Pembesaran 200x

Gambar 4.3 merupakan gambar hasil pengamatan dengan mikroskop optik pada proses karburasi dengan temperatur 900°C menggunakan waktu penahanan 3 jam dan proses nitridasi dengan temperatur 500°C menggunakan waktu penahanan 5 jam didapatkan ketebalan lapisan 0,49 mm atau sebesar 490 μm .



Gambar 4.3 Tebal Lapisan Mikroskop-Optik 900°C + 500°C Pembesaran 200x

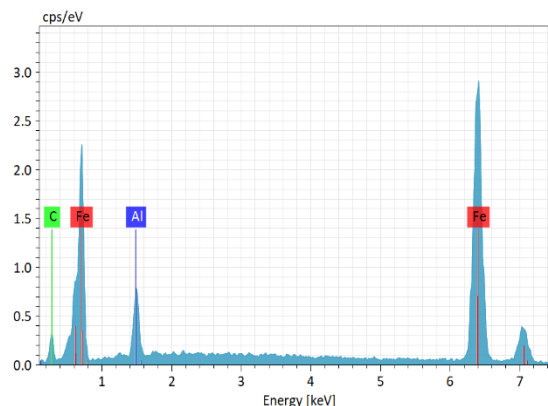
4.1.3 Data Hasil Pengujian SEM-EDX/EDS

Dari hasil proses kombinasi karburasi dan nitridasi pada *fluidized bed furnace* maka dapat dievaluasi hasilnya, yang meliputi pengujian EDX/EDS yang bertujuan untuk mengetahui struktur mikro meliputi unsur yang terkandung pada baja AISI 4140 yang telah melalui proses *surface hardening* berupa kombinasi *carburizing* dan *nitriding*.



Gambar 4.4 Pengamatan SEM untuk mengambil titik uji EDS (700°C + 500°C)

Gambar 4.4 merupakan hasil dari pengujian SEM. Pada penelitian kali ini gambar hasil pengujian SEM hanya digunakan untuk menentukan titik sampel uji EDS saja. Hal ini dikarenakan adanya kendala saat proses preparasi spesimen uji. Alat yang digunakan berupa mesin preparasi mengalami kendala kerusakan sehingga spesimen uji pada bagian tepi kurang bisa terpoles dengan baik. Dari hal itu juga yang menyebabkan kendala proses etsa jadi kurang baik, dan hasil pengujian SEM berupa gambar 4.4 tidak bisa digunakan sebagai acuan untuk mencari ketebalan lapisan. Maka penulis menggunakan jalan tengah berupa pengujian mikroskop optik sebagai acuan untuk mencari ketebalan lapisan yang terbentuk.



Grafik 4.7 Komposisi kandungan kombinasi (700°C + 500°C)

Grafik diatas merupakan kandungan komposisi yang terdapat pada spesimen yang sudah di proses kombinasi antara karburasi menggunakan temperatur 700°C dan nitridasi menggunakan temperatur 500°C.

Tabel 4.6 Jumlah kandungan komposisi kombinasi (700°C + 500°C) sampel standart 209

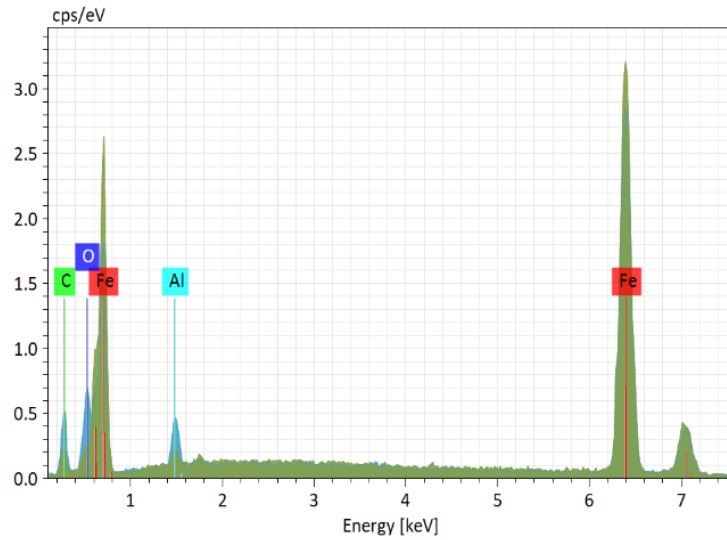
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Fe	26	16188	90.18	85.17	60.34	2.79	3.09
C	6	704	10.38	9.81	32.31	2.63	25.32
Al	13	2024	5.31	5.02	7.36	0.32	6.08
		Sum	105.88	100.00	100.00		

Tabel 4.6 merupakan tabel jumlah kandungan komposisi dari unsur-unsur kimia yang terdapat pada spesimen yang telah melewati proses kombinasi berupa karburasi menggunakan temperatur 700°C dan nitridasi yang menggunakan temperatur 500°C dengan masing-masing menggunakan waktu penahanan karburasi selama 3 jam dan nitridasi selama 5 jam. Dalam tabel tersebut didapatkan kandungan karbon 15,43% massa dan 36,72% atom, selain itu juga didapatkan kandungan nitrogen sebesar 5,40% massa dan 11,03% atom.



Gambar 4.5 Pengamatan SEM untuk mengambil titik uji EDS (800°C + 500°C)

Gambar 4.5 merupakan hasil dari pengujian SEM. Pada penelitian kali ini gambar hasil pengujian SEM hanya digunakan untuk menentukan titik sampel uji EDS saja. Hal ini dikarenakan adanya kendala saat proses preparasi spesimen uji. Alat yang digunakan berupa mesin preparasi mengalami kendala kerusakan sehingga spesimen uji pada bagian tepi kurang bisa terpolos dengan baik. Dari hal itu juga yang menyebabkan kendala proses etsa jadi kurang baik, dan hasil pengujian SEM berupa gambar 4.5 tidak bisa digunakan sebagai acuan untuk mencari ketebalan lapisan. Maka penulis menggunakan jalan tengah berupa pengujian mikroskop optik sebagai acuan untuk mencari ketebalan lapisan yang terbentuk.



Grafik 4.8 Komposisi kandungan kombinasi (800°C + 500°C)

Grafik 4.8 diatas merupakan kandungan komposisi yang terdapat pada spesimen yang sudah di proses kombinasi antara karburasi menggunakan temperatur 800°C dan nitridasi menggunakan temperatur 500°C.

Tabel 4.7 Jumlah Kandungan Komposisi Kombinasi (800°C + 500°C) sampel standart 203

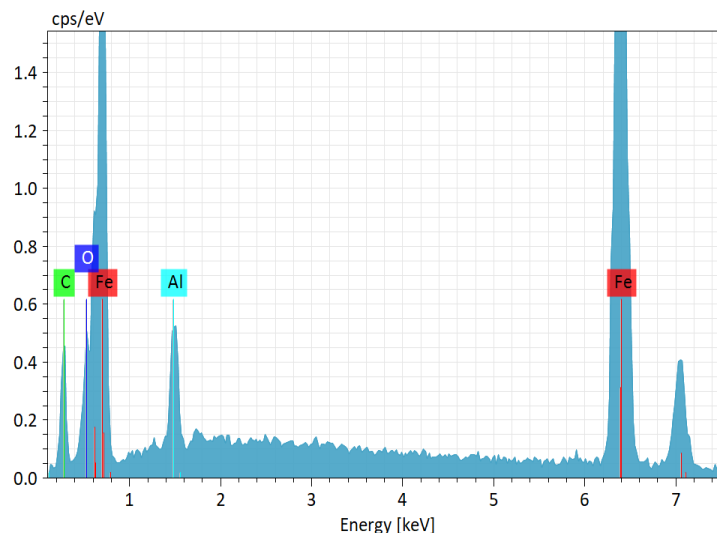
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Fe	26	15917	80.28	76.93	45.36	2.49	3.10
C	6	1199	14.48	13.88	38.05	3.15	21.73
O	8	1537	6.68	6.40	13.18	1.38	20.58
Al	13	1154	2.91	2.79	3.40	0.20	7.04
		Sum	104.36	100.00	100.00		

Tabel 4.7 merupakan tabel jumlah kandungan komposisi dari unsurunsur kimia yang terdapat pada spesimen yang telah melewati proses kombinasi berupa karburasi menggunakan temperatur 800°C dan nitridasi yang menggunakan tempertarur 500°C dengan masing - masing menggunakan waktu penahanan karburasi selama 4 jam dan nitridasi selama 5 jam. Dalam tabel tersebut didapatkan kandungan karbon 16,67% massa dan 39,78% atom, berbeda pada kombinasi temperatur carburizing 700°C dan temperatur nitriding 500°C, pada kombinasi kali ini kadar nitrogen pada permukaan material tidak terlihat.



Gambar 4.6 Pengamatan SEM Untuk Mengambil Titik Uji EDS (900°C + 500°C)

Gambar 4.6 merupakan hasil dari pengujian SEM. Pada penelitian kali ini gambar hasil pengujian SEM hanya digunakan untuk menentukan titik sampel uji EDS saja. Hal ini dikarenakan adanya kendala saat proses preparasi spesimen uji. Alat yang digunakan berupa mesin preparasi mengalami kendala kerusakan sehingga spesimen uji pada bagian tepi kurang bisa terpoles dengan baik. Dari hal itu juga yang menyebabkan kendala proses etsa jadi kurang baik, dan hasil pengujian SEM berupa gambar 4.7 tidak bisa digunakan sebagai acuan untuk mencari ketebalan lapisan. Maka penulis menggunakan jalan tengah berupa pengujian mikroskop optik sebagai acuan untuk mencari ketebalan lapisan yang terbentuk.



Grafik 4.9 Komposisi Kandungan Kombinasi (900°C + 500°C)

Grafik diatas merupakan kandungan komposisi yang terdapat pada spesimen yang sudah di proses kombinasi antara karburasi menggunakan temperatur 900°C dan nitridasi menggunakan temperatur 500°C.

Tabel 4.8 Jumlah kandungan komposisi kombinasi (900°C + 500°C) sampel standart 201

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Fe	26	15169	84.18	80.54	50.49	2.61	3.10
C	6	982	13.37	12.79	37.28	3.07	22.95
O	8	886	4.19	4.00	8.76	1.01	24.04
Al	13	1278	2.79	2.67	3.46	0.19	6.96
		Sum	104.52	100.00	100.00		

Tabel 4.8 merupakan tabel jumlah kandungan komposisi dari unsurunsur kimia yang terdapat pada spesimen yang telah melewati proses kombinasi berupa karburasi menggunakan temperatur 900°C dan nitridasi yang menggunakan tempertarur 500°C dengan masing-masing menggunakan waktu penahanan karburasi selama 4 jam dan nitridasi selama 5 jam. Dalam tabel tersebut didapatkan kandungan karbon 18,09% massa dan 44,65% atom, berbeda pada kombinasi temperatur carburizing 700°C dan temperatur nitriding 500°C, pada kombinasi kali ini kadar nitrogen pada permukaan material tidak terlihat.

4.2 Pembahasan

Setelah melakukan penelitian serta pengujian, adapun data hasil yang dikumpulkan pada subab sebelumnya. Pada subab 4.1.1 didapatkan tiga data hasil pengujian, antara lain adalah data hasil pengujian kedalaman kekerasan dengan metode vickers (micro-vickers), data hasil pengujian mikroskop-optik, dan data hasil pengujian SEM-EDX/EDS. Untuk hasil dari pengujian kedalam kekerasan berbentuk tabel dengan berisi 3 spesimen serta 5 titik pengujianya. Selanjutnya untuk data hasil mikroskop-optik berbentuk gambar dengan perbesaran 200x untuk mengetahui tebal lapisan yang terbentuk. Dan yang terakhir bentuk data dari pengujian EDX/EDS ialah berupa grafik dan tabel tentang kandungan unsur kimia yang terdapat pada spesimen setelah melalui proses kombinasi *Carburizing* dan *Nitriding*.

Pembahasan kali ini mengenai seputar pengaruh apa saja yang terjadi pada kombinasi proses karburasi dan nitridasi pada satu material. Apakah ada lapisan yang terbentuk dapat dilihat pada data sampel pengujian mikroskop optik, untuk kekerasan dapat dilihat pada data hasil pengujian kekerasan yang menunjukkan nilai kekerasan yang paling keras terletak pada titik 1 dan menurun sesuai dengan titik uji yang pengambilannya semakin menuju ke bagian inti. Dan yang terakhir merupakan unsur yang terkandung pada bagian lapisan yang terbentuk untuk mengetahui apakah benar pada setiap lapisan yang terbentuk memiliki nilai kadar karbon dan nitrogen di dalamnya.

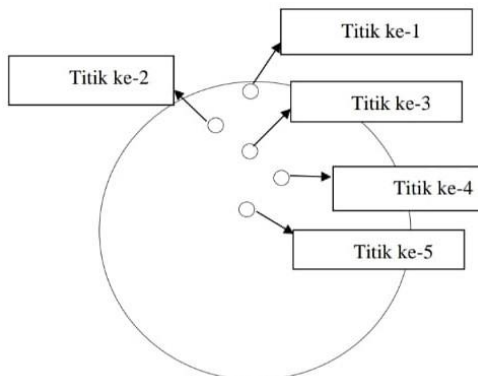
4.2.1 Kedalaman Kekerasan

Pada tabel 4.1 yaitu pada spesimen baja paduan rendah AISI 4140 yang tidak diproses, didapatkan nilai rata-rata kekerasan 305,06 HV. Hal ini sangat berbanding lurus dengan teori dan juga penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh Raharjo, *et al* (2016) yang menunjukkan kekerasan awal pada baja AISI 4140 antara 200-300 HV, hal itu dapat

diketahui dengan data hasil pengujian pada jurnal tabel 1. Penelitian menunjukkan bahwa semakin keras dari titik ke-1 hingga titik ke-5 berarti tujuan dari penelitian yang merupakan surface hardening dapat dikatakan mendekati kebenaran.

Pada grafik 4.2 sampai grafik 4.4 terlihat kekerasan paling tinggi terdapat pada permukaan dan menurun seiring dengan kedalaman difusi dari karbon dan nitrogen. Ini disebabkan karena konsentrasi difusi atom dari karbon pada permukaan jauh lebih besar dari difusi atom pada kedalaman tertentu. Pada saat proses perlakuan, peningkatan temperatur dan media pendingin sangat berpengaruh terhadap kekerasan difusi karbon yang dihasilkan. Hal itu dapat dibuktikan dari penelitian sebelumnya oleh Akbar, *et al* (2019) yang menjelaskan bahwa baja yang dilakukan heat treatment lalu di quenching menggunakan pendingin udara memiliki nilai kekerasan lebih baik daripada media pendingin air atau pun air garam.

Dari penelitian-penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Rahayu, *et al* (2017) menjelaskan bagian sisi permukaan memiliki nilai kekerasan paling tinggi dan menurun seiring dengan meningkatnya kedalaman pada permukaan spesimen uji berupa baja AISI. Hal ini terjadi karena konsentrasi dari atom-atom karbon dan juga nitrogen yang terdifusi pada permukaan baja akan jauh lebih besar dibandingkan dengan daerah pusat sumbu permukaan atau inti baja. Penelitian kali ini terlihat bahwa hasil dari 5 titik pengujian selalu berbeda hal ini dikarenakan perbedaan jarak antara titik uji dengan jarak 15 μm . Dan juga titik ke-1 berada paling pinggir atau tepi selalu menjadi yang terkeras. Maka dari itu perbedaan dan juga penurunan pada grafik yang tercantum menunjukkan dari titik ke-1 hingga titik ke-5 selalu mengalami penurunan sesuai dengan gambar berikut.



Gambar 4.7 Titik pengujian micro-vickers yang diambil (Sumber: Dokumen Penulis)

Dari grafik 4.5 dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu penahanan dan juga semakin tinggi temperatur akan sangat mempengaruhi difusi karbon dan juga nitrogen saat proses kombinasi karburasi dan nitridasi. Terlihat bahwa semakin tinggi temperatur karburasi semakin besar juga nilai rata-rata kekerasan yang akan didapat. Nilai rata-rata kekerasan didapat melalui rumus perhitungan berikut.

$$\sum HV \frac{n HV}{n titik}$$

Keterangan :

- n HV = jumlah semua nilai kekerasan
- n titik = jumlah titik pengujian

Namun pada penelitian kali ini nilai kekerasan yang didapat tidak berdasarkan perhitungan, akan tetapi nilai kekerasan diambil dari pengujian yang dilakukan dengan metode vickers dari alat uji langsung menuju ke monitor komputer yang langsung menunjukkan nilai kekerasan dari titik yang dilakukan dengan dwell 10 detik dan force 500 gram.

Pada hasil pengujian distribusi kekerasan (kedalaman kekerasan) menggunakan metode micro-vickers didapatkan hasil yang berbanding lurus dengan hasil penelitian Rahayu, *et al* (2017), dikarenakan kekerasan lapisan yang terbentuk paling tinggi pada permukaan dan menurun seiring dengan kedalaman permukaan pada spesimen uji sehingga penelitian yang dilakukan penulis mendekati kebenaran. Dari penelitian Negara (2016) menjelaskan bahwa karbon yang mampu berdifusi semakin rendah dengan semakin jauhnya dari permukaan. Maka dari itu nilai distribusi kekerasan semakin rendah seiring dengan meningkatnya kedalaman pada baja AISI 4140 yang telah di karburasi.

Dari media pendinginan sendiri penelitian kali ini menggunakan udara dengan kadar 99% dan berbanding lurus dengan penelitian Akbar, *et al* (2019) yang membahas tentang nilai kekerasan menggunakan media pendingin udara lebih baik daripada menggunakan media pendingin air, air garam, oli sehingga penelitian kali ini mendekati kebenaran. Dari hasil pengujian distribusi kekerasan (kedalaman kekerasan) diperoleh nilai rata-rata kekerasan yang paling tinggi pada temperatur 900°C + 500°C sebesar 733,7 HV dan nilai tertinggi pada temperatur 800°C + 500°C dijarak 15 µm sebesar 962,3 HV, dimana kekerasan difusi karbon dan nitrogen semakin meningkat sesuai dengan meningkatnya temperatur. Meningkatnya disebabkan oleh terjadinya reaksi kimia antara atom karbon dengan besi dan atom nitrogen dengan besi sehingga konsentrasi dari kedua atom pada permukaan spesimen berasal dari difusi saat proses perlakuan panas permukaan karburasi dan nitridasi yang membentuk lapisan baru.

Hal diatas belum mencapai nilai yang dapat dikatakan optimal, karena lapisan yang terbentuk lebih dominan lapisan karbon dan Arthur, (1986) mengatakan lapisan nitridasi biasanya memiliki nilai kekerasan 900-1100 HV, ketahanan abrasiv yang sangat baik dan memberikan peningkatan pada ketahanan leleh pada material. Dan dapat dikatakan lebih optimal dari penelitian sebelumnya Negara (2016) nilai kekerasan yang didapat lebih besar pada suhu 900°C dan holding time sekitar 3 jam.

4.2.2 Mikroskop-Optik

Gambar 4.1 merupakan gambar yang menjelaskan tentang ukuran dari gambar (panjang x lebar), yaitu sebesar 0,2 mm atau 200 μm . Jadi ukuran dari 1 gambar penuh untuk foto mikroskop-optik sendiri ditentukan oleh perbesaran yang diminta, untuk ukuran 0,2 mm merupakan perbesaran 200x. Mengapa memilih untuk menggunakan foto mikroskop-optik, dikarenakan pada pengujian SEM tidak dapat dilihat seberapa tebal lapisan yang terbentuk sehingga dalam penelitian kali ini mencari lapisan menggunakan uji mikroskop-optik. Memilih perbesaran 200x, karena apabila perbesaran dilakukan 500x – 900x fokus gambar akan menjadi pecah. Sehingga tidak akan menemukan hasil yang akan dicari.

Pada gambar 4.2 yang merupakan kombinasi temperatur karburasi 700°C dan nitridasi 500°C dapat dilihat adanya lapisan karbon dan juga nitrogen yang terbentuk pada permukaan. Lapisan ini terbentuk karena atom karbon serta nitrogen yang berdifusi akan bereaksi dengan atom besi sehingga membentuk senyawa FeC dan FeN yang terlihat seperti lapisan/garis hitam. Pada gambar 4.2 terbentuk lapisan sebesar 40 μm atau sebesar 0,04 mm. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian dapat membentuk 2 lapisan berupa lapisan karbon dan nitrogen yang berfungsi menguatkan permukaan luar baja paduan rendah AISI 4140. Pada gambar ini terlihat pula ada bagian putih yang merupakan pantulan cahaya saat proses pengujian, dan ada juga lapisan hitam yang merupakan lapisan karbon dan abu-abu yang membentuk fasa pearlit dan juga ferrit.

Pada gambar 4.3 dan gambar 4.4 dapat dilihat adanya lapisan karbon yang terbentuk pada permukaan, tanpa adanya lapisan nitrogen. Hal ini dikarenakan lapisannya yang terlalu tipis yang menyebabkan sulitnya untuk diidentifikasi. Lapisan ini terbentuk karena atom-atom karbon yang berdifusi akan bereaksi dengan atom besi sehingga membentuk senyawa FeC yang terlihat seperti lapisan/garis hitam. Pada gambar 4.3 terbentuk lapisan sebesar 380 μm atau sebesar 0,38 mm. Pada gambar 4.4 terbentuk lapisan sebesar 490 μm atau sebesar 0,49 mm. Pada gambar ini terlihat pula ada bagian putih yang merupakan pantulan cahaya saat proses pengujian, dan ada juga lapisan hitam yang merupakan lapisan karbon dan abu-abu yang membentuk fasa pearlit dan juga ferrit.

Menurut Amstead (1979) mengatakan bahwa “proses karburisasi media gas digunakan untuk memperoleh lapisan tipis antara 0,1-0,75 mm”. Pada penelitian kali ini dengan kombinasi temperatur 700°C + 500°C masih dapat dikatakan belum optimal. Sedangkan pada kombinasi temperatur 800°C + 500°C dan 900°C + 500°C dapat dikatakan berhasil karena memiliki tebal lapisan yang diantara 0,1-0,75 mm, yaitu sebesar 0,38 mm dan 0,49 mm. Pada gambar ini terlihat pula ada bagian putih yang merupakan pantulan cahaya saat proses pengujian, dan ada juga lapisan hitam yang merupakan lapisan karbon dan abu-abu yang membentuk fasa pearlit dan juga ferrit.

4.2.3 SEM-EDX/EDS

Pada gambar 4.5 sampai 4.7 merupakan hasil uji SEM berupa foto yang digunakan untuk pengambilan titik sampel yang diuji EDX untuk menentukan kandungan unsur

yang terkait didalamnya. Adapun grafik yang menunjukkan seberapa besar kandungan unsur paduan pada setiap kombinasi antara temperatur karburasi dan nitridasi. Grafik 4.7 hingga 4.9 menunjukkan kandungan yang berbeda dari setiap kombinasi perlakuan, hal ini menunjukkan bahwa perbedaan temperatur sangat mempengaruhi perbedaan kandungan unsur yang dimiliki.

Tabel 4.6 merupakan jumlah kandungan unsur yang terdapat pada permukaan baja AISI 4140 yang telah melalui proses kombinasi antara temperatur karburasi 700°C dan nitridasi 500°C. Pada tabel ini menunjukkan hasil pengujian EDS/EDX dengan unsur karbon sebesar 15,43% massa dan 36,72% atom. Teridentifikasi juga kandungan nitrogen sebesar 5,40% massa dan 11,03% atom. Jika dikomparasikan dengan diagram FeN, diperoleh senyawa Fe₄N dan Fe₃N. Namun karena untuk AISI 4140 mempunyai komposisi unsur-unsur paduan tinggi maka senyawa-senyawa yang terbentuk juga mengikuti komposisi tersebut. Dari komposisi tersebut kemungkinan terjadi senyawa Fe₂N, Fe₃N, Fe₄N. Hal itu sama dengan isi dari penelitian yang dilakukan oleh Rahayu, *et al* (2017).

Hal ini menunjukkan pada proses karburasi dengan temperatur 700°C dan 500°C nitridasi memiliki jawaban bahwa terbentuknya kedua lapisan. Akan tetapi hal penelitian kali ini masih belum dapat dikatakan optimal dikarenakan menurut Amstead (1979) mengatakan bahwa “proses karburisasi media gas digunakan untuk memperoleh lapisan tipis antara 0,1-0,75 mm”. Dan lapisan yang terbentuk hanya 0,04 mm atau sebesar 40 µm.

Tabel 4.7 merupakan jumlah kandungan unsur yang terdapat pada permukaan baja AISI 4140 yang telah melalui proses kombinasi antara temperatur karburasi 800°C dan nitridasi 500°C. Pada tabel ini menunjukkan hasil pengujian EDS/EDX dengan unsur karbon sebesar 16,67% massa dan 39,78% atom. Sedangkan untuk nitrogen tidak teridentifikasi, hal ini dapat terjadi dikarenakan lapisan yang terbentuk terlalu tipis sehingga pada saat proses pengujian tidak terdeteksi. Hasil komposisi kimia menunjukkan bahwa unsur terkandung adalah unsur besi Fe dengan campuran logam Fe dan karbon (C). Hal ini dapat disebabkan oleh pengambilan titik uji yang bukan tepat pada partikel keramik nitrid.

Untuk yang terakhir merupakan tabel 4.8 merupakan jumlah kandungan unsur yang terdapat pada permukaan baja AISI 4140 yang telah melalui proses kombinasi antara temperatur karburasi 900°C dan nitridasi 500°C. Pada tabel ini menunjukkan hasil pengujian EDS/EDX dengan unsur karbon sebesar 18,09% massa dan 44,65% atom. Sedangkan untuk nitrogen tidak teridentifikasi, hal ini dapat terjadi dikarenakan lapisan yang terbentuk terlalu tipis sehingga pada saat proses pengujian tidak terdeteksi atau dapat disebabkan oleh pengambilan titik uji yang bukan tepat pada partikel keramik nitrid. Hasil komposisi kimia menunjukkan bahwa unsur terkandung adalah unsur besi Fe dengan campuran logam Fe dan karbon (C).

BAB V

KESIMPULAN & SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat ditarik garis kesimpulan sebagai berikut:

1. Mekanisme kegagalan pengujian kekerasan pada baja AISI 4140. Dilakukan dengan 3 metode yaitu: Pengujian kekerasan, Pengujian lama waktu tingkat kekerasan, Pengujian struktur mikro
2. Lama tingkat kekerasan baja AISI 4140 pada proses carburizing adalah 4 jam dan proses nitriding 5 jam
3. Seiring dengan penambahan temperatur saat proses karburasi dan juga menggunakan media pendingin udara menambah kekerasan yang sangat spesifik dan nilai kekerasan permukaan lapisan yang paling tepi semakin tinggi.
4. Dari hasil penelitian perlakuan panas kombinasi karburasi dan nitridasi didapatkan kandungan karbon, ketebalana lapisan, dan juga nilai kekerasan semakin meningkat dalam bentuk data yang didapatkan dari pengujian yang dilakukan. Untuk hasil dari proses nitridasi berupa unsur dan lapisan nitrida hanya terlihat pada kombinasi karburasi 700°C dan nitridasi 500°C.
5. Pada penelitian kali ini, ketebalan lapisan dari setiap perlakuan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur karburasi. Akibat dari difusi karbon yang sangat baik daripada difusi nitrogen.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian serta pengujian diantaranya

1. Dapur yang digunakan berupa fluidized bed furnace perlu dikalibrasi ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal dari penelitian heat treatment.
2. Pada penelitian yang akan datang disarankan untuk menambah waktu penahanan (holding time) agar mendapatkan lapisan yang tebal dan kekerasan yang diinginkan dapat mencapai titik optimal sesuai dengan material dan dapur yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Firman, M., Herlina, F., & Hatif Martadinata, M. (2016). Analisa Kekerasan Baja St 42 Dengan Perlakuan Panas Menggunakan Metode Taguchi. *Jurnal Teknik Mesin UNISKA Universitas Islam Kalimantan Muhammad Arsyad Al Banjari Jln. Adhyaksa (Kayutangi)*, 01(022), 1–9.
- Heydarzadeh Sohi, M., Ebrahimi, M., Honarbakhsh Raouf, A., & Mahboubi, F. (2010). Effect of plasma nitrocarburizing temperature on the wear behavior of AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 205(SUPPL. 1), S84–S89. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.04.054>.
- Marušić, K., Otmačić, H., Landek, D., Cajner, F., & Stupnišek-Lisac, E. (2006). Modification of carbon steel surface by the Tenifer® process of nitrocarburizing and post-oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3415–3421. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.231>.
- Motorcu, A. R. (2010). The optimization of machining parameters using the taguchi method for surface roughness of an AISI 8660 hardened alloy steel. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 56(6), 391–401.
- Supriyanto, Y. (2018). *Analisis Sifat Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Aisi 4140 Hasil Karburasi Plasma Dengan Variasi Tekanan*.
- Zhang, C. S., Yan, M. F., Sun, Z., Wang, Y. X., You, Y., Bai, B., Chen, L., Long, Z., & Li, R. W. (2014). Optimizing the mechanical properties of M50NiL steel by plasma nitrocarburizing. *Applied Surface Science*, 315(1), 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.093>.
- Gunawan, E. (2017). Analisa Pengaruh Temperatur Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Pada Baja Karbon Rendah (St41) Dengan Metode Pack Carburizing. *Teknika: Engineering and Sains Journal*, 1(2), 117. <https://doi.org/10.51804/tesj.v1i2.133.117-124>
- Isworo, H., & Sumantri, D. (2020). Pengaruh Holding Time Dan Media Pendingin Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja St41 Pada Proses Carburizing Arang Tempurung Kelapa. *Elemen : Jurnal Teknik Mesin*, 7(2), 157–166. <https://doi.org/10.34128/je.v7i2.124>
- J. M. Manulaita, N., & A. Patty, A. (2011). Analisa Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah (S35C) dengan Pengaruh Waktu Penahanan (Holding Time) Melalui Proses Pengarbonan Padat (Pack Carburizing) dengan Pemanfaatan Cangkang Kerang Sebagai Katalisator. *Teknologi*, 8(2), 927–935.
- N & Mikro, S. (2020). J-Proteksion : Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin PENGARUH HEAT TREATMENT DAN VARIASI QUENCHING PADA JENIS. 4(2), 43–46.
- Noviatiningrum, N., Sidi, P., K, H. B., Teknik, S., Teknik, J., & Kapal, P. (n.d.). Analisa Pengaruh Temperatur dan Waktu Pemanasan , serta Cara Pendinginan pada Proses Carburizing Terhadap Kekerasan Baja Karbon Rendah. 260–270.
- Rahardjo, T., Mesin, J. T., & Industri, F. T. (2008). Proses nitriding untuk peningkatan sifat mekanik permukaan material dies. *Flywheel*, 1, 49–60.
- Rahayu, S., Setiawan, N., Virdhian, S., & Suhendi, E. (2017). Pengaruh Proses Powder Nitriding Terhadap Perubahan Kekerasan Dan Tebal Lapisan Difusi Pada Pahat Bubut High Speed Steel. *Metal Indonesia*, 39(1), 20. <https://doi.org/10.32423/jmi.2017.v39.20-26>
- Sari, N. H. (2017). Perlakuan Panas Pada Baja Karbon: Efek Media Pendinginan Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(4), 263. <https://doi.org/10.22441/jtm.v6i4.2091>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Biodata Penulis

A. Biodata Penulis



Nama : Raynhard Neno
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Tempat/Tanggal Lahir : Kupang, 16 Juni 1999
Agama : Kristen Protestan
Alamat : Jl. Pelabuhan Ferry, RT 003/RW 002, Desa Bolok, Kec. Kupang Barat, Kab. Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur
No. Telp/HP : 082237823251
Email : Raynhardneno1999@gmail.com
Nama Ayah : Onisimus Neno
Nama Ibu : Silpa Neno Anin

B. Riwayat Pendidikan

1. Tahun 2005-2011 menamatkan pendidikan di SD GMT Bolok.
2. Tahun 2011-2014 menamatkan pendidikan di SMP Swasta Plus Mentari.
3. Tahun 2014-2017 menamatkan pendidikan di SMK Negeri 2 Kupang.
4. Tahun 2018-sekarang akan menamatkan pendidikan di Program Studi Teknik Mesin S-1 Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Nasional Malang.

Lampiran 2. Surat Bimbingan Skripsi



PT. BNI (PERSERO) MALANG
BANK NIAGA MALANG

PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Malang, 01 Maret 2022

Nomor : ITN-123 /LTA/2022
Lampiran :
Perihal : BIMBINGAN SKRIPSI

Kepada : Yth Sdr. Ir. Wayan Sujana, MT
Dosen Institut Teknologi Nasional
di MALANG

Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam Skripsi untuk saudara mahasiswa :

Nama : REYNHART NENO

Nim : 1811109

Jurusan : Teknik Mesin

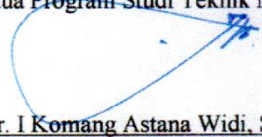
Program studi : Teknik Mesin (S1)

Maka dengan ini pembimbingan Skripsi tersebut kami serahkan sepenuhnya kepada saudara selama 6 (enam) bulan terhitung mulai bulan :

Maret 2022 S/d Agustus 2022

Adapun tugas tersebut untuk menempuh Ujian Akhir Program Sarjana S1. Demikian agar maklum dan atas perhatian serta bantuannya kami ucapkan banyak terima kasih.


Ketua Program Studi Teknik Mesin S1

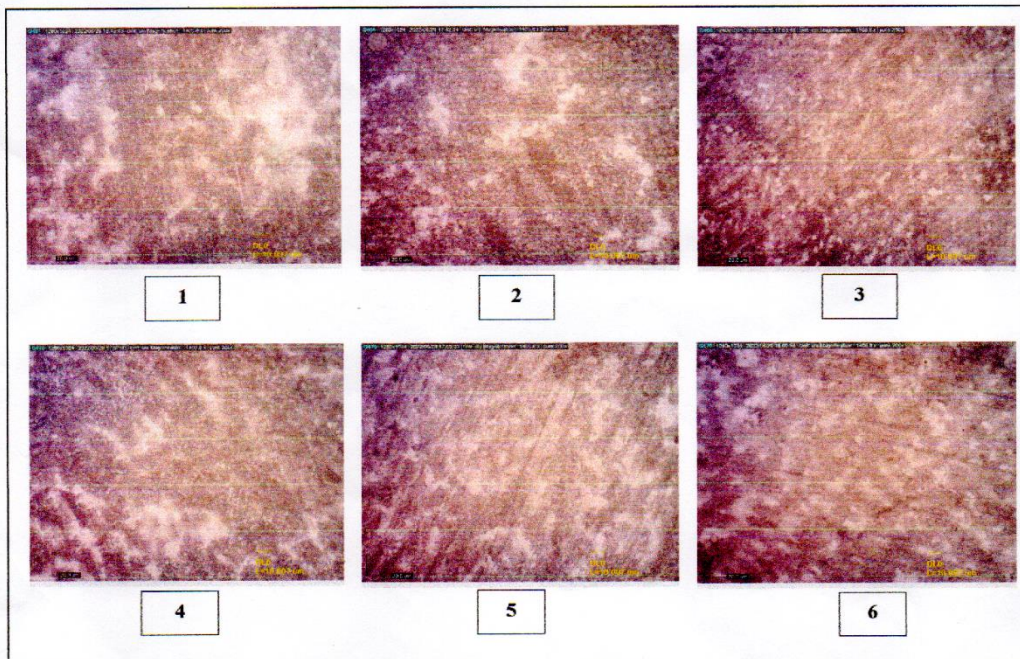

Dr. I Komang Astana Widi, ST, MT
NIP. P 1030400405

Tembusan Kepada Yth :

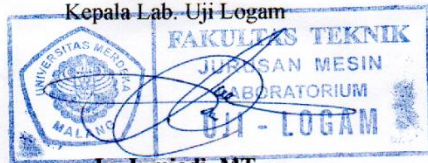
1. Bapak/Ibu Dekan FTI ITN Malang
2. Mahasiswa yang bersangkutan
3. Arsip

Lampiran 3. Lembar Data Pengamatan Struktur Mikro

	LABORATORIUM UJI LOGAM JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS MERDEKA MALANG	
	LEMBAR DATA PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO	
Nama : Raynhard Neno NIM : 1811109 Institusi : ITN		
Hari / tanggal : 29-06-2022 Pukul : 10.00 WIB Standar Uji : ASTM (Mikrostruktur)		Jenis Mesin : Mikroskop Logam Pembesaran foto : 200 x Jenis etsa : Nital (5 ml HNO ₃ + 95 ml Alkohol 95%) Jenis bahan : Baja



Mengetahui,
Kepala Lab. Uji Logam



Ir. Jumiadi, MT

Dosen Pembimbing



Pungky Eka Setyawan, ST., MT

Lampiran 3. Dokumentasi Alat dan Bahan yang Digunakan



Gambar 1. *Fluidized Bed Furnace*



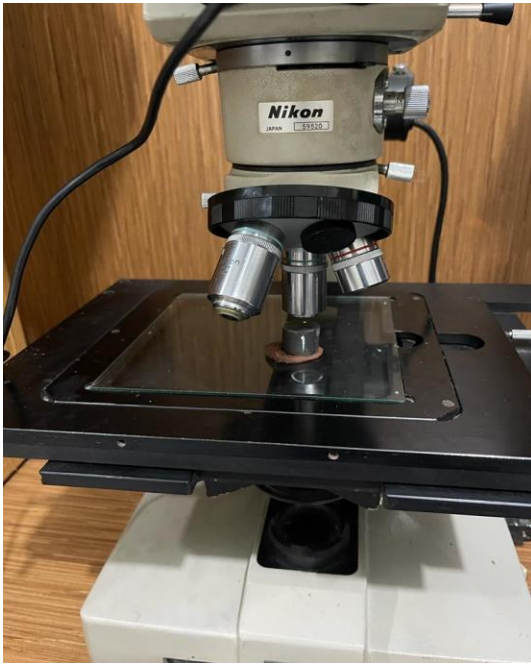
Gambar 2. *Wire Cutting*



Gambar 3. Mesin HBRV *Universal Hardness Tester 187.5A*



Gambar 4. Mikroskop Optik Olympus BX51M



Gambar 5. (Keterangan Nama Gambar)

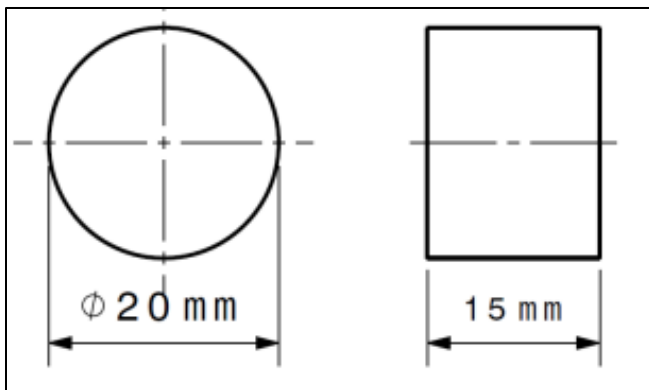


A.



B.

Gambar 6. Spesimen Sebelum dan Sesudah Diproses



Gambar 7. Ukuran Spesimen Pengujian