

SKRIPSI

**PENGARUH WAKTU PROSES DEEP CRYOGENIC TREATMENT
TERHADAP STRUKTUR MIKRO, KEKERASAN DAN KEAUSAN
PADUAN Fe-Cr-Mn**



Disusun Oleh :
Saiful Anwar
210013025

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN S1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL YOGYAKARTA
2021**

HALAMAN PERSETUJUAN
TUGAS AKHIR II
PENGARUH WAKTU PROSES *DEEP CRYOGENIC TREATMENT*
TERHADAP STRUKTUR MIKRO, KEKERASAN DAN KEAUSAN
PADUAN Fe-Cr-Mn

Diajukan sebagai salah satu syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik
Program Studi Teknik Mesin S1
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Disusun Oleh :
Nama Mahasiswa : Saiful Anwar
Nomor Mahasiswa : 210013025
Program Studi : Teknik Mesin S1

Telah diperiksa dan disetujui :

Yogyakarta, Februari 2021

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T.

NIK: 19730079



Anita Susiana, S.T., M.Eng.

NIK: 19730096

Menyetujui

Ka. Prodi Teknik Mesin



Ir. Wartono, M. Eng.

NIP. 196211151994031001



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL YOGYAKARTA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDSUTRI
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN S1

SOAL TUGAS AKHIR

No:13/ITNY/Prodi.TM-S1/TGA/IX/2020

Nama Mahasiswa : Saiful Anwar
Nomor Mahasiswa : 210013025
Soal : Pengaruh Waktu Proses *Deep Cryogenic Treatment*
paduan Fe-Cr-Mn Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan
dan Keausan



Yogyakarta, Februari 2021

Dosen Pembimbing I

Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T.

NIK: 19730079

HALAMAN PENGESAHAN

Dipertahankan di depan dewan penguji tugas akhir II Program Studi Teknik Mesin S1, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, dan disahkan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Hari : Selasa
Tanggal : 9 Februari 2021
Pukul : 13:00 WIB
Tempat : Ruang A18

Disahkan oleh :

Tanda Tangan

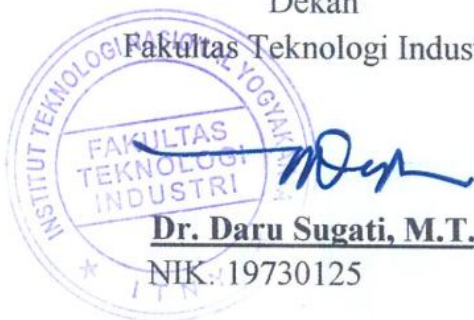
1. Ketua penguji
Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T.

2. Anggota penguji I
Anita Susiana, S.T., M.Eng.

3. Anggota penguji II
Rivan Muhfidin, ST.,M.Sc.

Mengetahui,

Dekan
Fakultas Teknologi Industri,



Ketua Program Studi
Teknik Mesin S1,

Ir. Wartono, M. Eng.
NIP. 196211151994031001

HALAMAN PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak pernah terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah di tulis atau di terbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis bahan acuan dalam naskah ini dan di sebutkan dalam daftar pustaka



Yogyakarta, Februari 2021



Saiful Anwar

PERSEMBAHAN

- ❖ Puji syukur kepada Allah S.W.T yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan tepat waktu
- ❖ Kepada kedua orang tua saya yang selalu mendoakan serta memberikan semangat untuk saya agar tidak lelah dalam menyelesaikan skripsi.
- ❖ Ibu Dr. Ratna Kartikasari, S.T.,M.T., selaku dosen pembimbing 1 dan Ibu Anita Susiana, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing 2 yang telah dengan sabar dan tanpa lelah dalam membimbing dan juga memberi motivasi agar terus bergerak dan maju kedepan.
- ❖ Para sahabat dan teman dekat yang telah memberikan dukungan dan bantuan

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Proses *Deep Cryogenic Treatment* Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Keausan Paduan Fe-Cr-Mn”.

Penyusunan Skripsi ini digunakan untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin S1, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.

Penulisan Skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan bantuan berbagai pihak, untuk itu, perkenankanlah penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kepada Allah SWT yang telah memberikan saya kesehatan dan kekuatan sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi saya dengan baik.
2. Kepada ibu dan ayah saya yang telah memberikan dukungan baik moril maupun materil.
3. Bapak Dr.Ir. H. Ircham, M.T., selaku Rektor Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.
4. Kepada bapak ibu dosen S1 Teknik mesin yang telah memberikan Ilmu selama saya menyelesaikan skripsi saya.
5. Bapak Dr. Daru Sugati, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.
6. Bapak Ir. Wartono, M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin S1 Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.
7. Ibu Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T., selaku Dosen pembimbing I.
8. Ibu Anita Susiana S.T., M.Eng. selaku Dosen pembimbing II.
9. Bapak-Ibu Dosen dan Staf Karyawan ITNY.
10. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi yang telah terselesaikan ini masih belum sempurna, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran semoga skripsi ini

dapat bermanfaat bagi pembaca dan dapat lebih disempurnakan lagi di kemudian hari.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat dijadikan referensi bagi rekan-rekan mahasiswa teknik mesin ITNY dan bagi yang memerlukan pada umumnya.

Yogyakarta, Februari 2021

Penulis

Saiful Anwar

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
SOAL TUGAS AKHIR	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PERNYATAAN	Error! Bookmark not defined.
PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN NOTASI.....	xi
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II	4
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	4
2.1 Tinjauan Pustaka	4
2.2 Dasar Teori.....	6
2.2.1 Baja Karbon.....	6
2.2.2 Klasifikasi Baja Karbon	6
2.2.3 Baja Paduan.....	7
2.2.4 Pengaruh Unsur Paduan Dalam Baja Karbon	8
2.2.5 Baja Tahan Karat.....	10
2.3 Paduan Fe-Cr.....	13
2.6 <i>Proses Deep Cryogenic Treatment (DCT)</i>	14
2.7 Keausan.....	17
2.8 Pengujian Bahan.....	19
2.8.1. Uji Komposisi Kimia.....	20

2.8.3	Uji Kekerasan	22
2.8.4.	Pengujian Keausan	26
2.9.	Hipotesis	27
BAB III	.....	28
METODE PENELITIAN	.....	28
3.1.	Diagram Alir Penelitian.....	28
3.2.	Bahan Penelitian.....	29
3.3.	Alat Penelitian	29
3.4.	Langkah – Langkah Penelitian	30
3.4.1.	Persiapan Spesimen	30
3.4.2	Pengujian Komposisi Kimia	31
3.4.3.	Proses <i>Deep Cryogenic Treatment</i>	32
3.4.4.	Pengujian Struktur Mikro	33
3.4.6.	Pengujian Keausan	37
BAB IV	.....	40
ANALISIS HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	.....	40
4.1	Analisis Hasil Penelitian Pengujian Komposisi Kimia	40
4.2	Analisis Hasil Pengujian Struktur Mikro	41
4.3	Analisis Hasil Pengujian Kekerasan	44
4.3	Analisis Hasil Pengujian Keausan	47
BAB V	.....	50
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	50
5.1	Kesimpulan	50
5.2	Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	.....	51
LAMPIRAN	.....	53

DAFTAR SINGKATAN DAN NOTASI

DCT	=	<i>Deep Cryogenic Treatment</i>
RHN	=	Kekerasan Rockwell (kg/mm^2)
VHN	=	Kekerasan Vickers (kg/mm^2)
HI	=	Dalamnya lekukan, penekanan setelah beban awal (mm)
H	=	Dalamnya lekukan, penekanan tanpa beban (mm)
C	=	Angka skala pembagi mesin Rockwell yaitu 0,002mm
P	=	Gaya tekan (kg)
d	=	Panjang diagonal (mm)
θ	=	Sudut antara intan yang berhadapan (136°)
t	=	Lamanya pengujian (jam)
A	=	Luas specimen uji keausan (mm^2)
W_0	=	Berat awal (gram)
W_1	=	Berat setelah pengujian (gram)
ΔW	=	Hasil selisih berat (gram)
W	=	Volume yang tergores (mm^3)
W_s	=	Niali keausan spesifik ($\text{mm}^3/\text{kg.m}$)
B	=	Tebal goresan (mm)
r	=	Jari-jari disc (mm)
b	=	Lebar goresan (mm)
I	=	Jarak pengausan (m)

ABSTRAK

Baja paduan Fe-Cr-Mn merupakan salah satu tipe baja tahan karat austenitik dikarenakan memiliki fasa *austenite* pada temperature kamar, keberadaan unsur mangan menjadi faktor utama penstabil *austenite*. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh waktu proses *deep cryogenic treatment* terhadap struktur mikro, kekerasan, dan ketahanan aus paduan Fe-Cr-Mn.

Benda uji yang digunakan untuk penelitian ini adalah paduan Fe-Cr-Mn berbentuk silinder dengan diameter 13mm, proses yang dilakukan yaitu *deep cryogenic treatment* dengan mencelupkan benda uji kedalam tabung liquid yang sudah terisi nitrogen cair dengan temperatur -196°C , pencelupan dilakukan dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam kemudian dikembalikan disuhu kamar, pengujian yang dilakukan adalah pengujian kekerasan, foto struktur mikro dan pengujian ketahanan aus.

Hasil uji komposisi kimia diperoleh Fe sebesar 71,28%, Cr sebesar 14,37% dan Mn sebesar 8,83%. Paduan Fe-Cr-Mn mempunyai struktur *ferit* dan *austenite*, harga kekerasan yang diperoleh dari pengujian *Vickers* pada spesimen *raw material* sebesar $335,49\text{ kg/mm}^2$, DCT 1 jam $303,35\text{ kg/mm}^2$, DCT 2 jam $365,85\text{ kg/mm}^2$, DCT 3 jam $359,21\text{ kg/mm}^2$, DCT 4 jam $433,30\text{ kg/mm}^2$ dan DCT 5 jam $465,18\text{ kg/mm}^2$. Hasil uji keausan dengan metode *Ogoshi* pada spesimen *raw material* diperoleh $0,00027\text{ mm}^3/\text{kg.m}$, DCT 1 jam $0,00030\text{ mm}^3/\text{kg.m}$, DCT 2 jam $0,00023\text{ mm}^3/\text{kg.m}$, DCT 3 jam $0,00023\text{ mm}^3/\text{kg.m}$, DCT 4 jam $0,00021\text{ mm}^3/\text{kg.m}$ dan DCT 5 jam $0,00019\text{ mm}^3/\text{kg.m}$. Semakin lama proses *deep cryogenic treatment* angka kekerasan semakin tinggi dan nilai keausan semakin kecil

Kata kunci : *deep cryogenic treatment*, paduan Fe-Cr-Mn, DCT

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Didalam dunia teknik diperlukan material atau bahan untuk membentuk suatu komponen, salah satu jenis material atau bahan jenis logam yang digunakan adalah baja. Untuk memperoleh baja dengan karakteristik tertentu seperti kekerasan, sifat mekanik, sifat kimia dan lainnya maka dilakukan pemaduan bahan seperti menambahkan unsur kromium (Cr), mangan (Mn) dll. Kromium (Cr) merupakan salah satu unsur logam dengan tingkat ketahanan korosi yang baik, unsur ini dapat dijadikan unsur paduan ataupun hanya sebagai pelapis permukaan baja. Sedangkan mangan (Mn) disamping sebagai penyeimbang austenit, penambahan unsur mangan (Mn) ke dalam paduan akan memperbaiki sifat *workability* dan *ductility*. Kandungan unsur ini akan membentuk struktur mikro pada bahan, dan struktur mikro ini mempengaruhi sifat mekanik baja tersebut. Sedangkan untuk memperoleh kekerasan tertentu salah satu proses yang dilakukan adalah perlakuan panas dengan mengendalikan laju pendinginannya.

Baja paduan Fe-Cr-Mn merupakan salah satu tipe baja tahan karat (ASTM Internasional, 2004). Baja tahan karat adalah paduan berbasis besi dengan kadar kromium tidak kurang dari 10,5% Cr. Ada beberapa tipe baja tahan karat seperti baja tahan karat austenitik, baja tahan karat feritik, baja tahan karat martensitik dll. Paduan Fe-Cr-Mn adalah salah satu paduan baja tahan karat yang termasuk dalam seri baja tahan karat austenitik. Paduan ini dikatakan baja tahan karat austenitik dikarenakan memiliki fasa austenit pada temperatur kamar. Keberadaan unsur mangan menjadi faktor utama penstabil austenit. Kelebihan seri baja tahan karat austenitik yaitu memiliki kekuatan yang tinggi pada temperatur yang tinggi (ASM Metal Handbook 2005)

Deep cryogenic treatment (DCT) adalah proses perlakuan material pada suhu kriogenik (-196°C). Proses ini bertujuan untuk mengurangi tekanan sisa akibat proses *heat treatment* dan meningkatkan ketahanan aus. Dengan membekukan komponen hingga suhu -196°C pada peralatan yang menggunakan nitrogen cair, tekanan sisa akan dihilangkan. Temperatur yang super dingin juga

menyebabkan perubahan tambahan pada logam yang membuat komponen lebih awet. Dikatakan bahwa proses kriogenik tidak membuat logam lebih keras namun akan tetap menjadi tahan lama. DCT merupakan perlakuan yang diberikan pada baja dengan tujuan untuk menghilangkan *retained austenite* yang terbentuk setelah perlakuan panas konvensional sehingga akan dihasilkan baja dengan struktur mikro martensit dengan persentase austenit sisa yang lebih rendah sehingga akan mendapatkan baja dengan kekerasan dan ketahanan aus yang lebih baik (Patil & Kumar, 2014)

Beberapa aplikasi mensyaratkan paduan Fe-Cr-Mn memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi. *Hardening* adalah satu proses perlakuan panas konvensional yang sering digunakan untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus. *Internal stress* dan *austenite* sisa menjadi permasalahan yang diusahakan dihindari (Baldisera, 2008). Oleh karena itu pada penelitian ini akan dicoba menggunakan proses DCT yang dinyatakan bebas *internal stress* dan *austenite* sisa untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus paduan Fe-Cr-Mn

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang dapat dirumuskan bagaimana pengaruh proses DCT terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan aus pada paduan Fe-Cr-Mn

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh proses DCT terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan aus pada paduan Fe-Cr-Mn

1.4. Batasan Masalah

1. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah paduan Fe-Cr-Mn berbentuk silinder dengan diameter 13 mm
2. Proses perlakuan dingin DCT, direndam pada nitrogen cair dengan temperatur -196°C dengan variasi waktu 1,2,3,4, dan 5 jam
3. Pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi, uji struktur mikro, uji kekerasan, dan uji keausan

1.5. Manfaat Penelitian

1. Sebagai acuan dalam pengaplikasian bahan baja paduan Fe-Cr-Mn
2. Menambah wawasan dalam bidang ilmu pengetahuan teknik bahan dan dapat dijadikan sebagai tambahan pustaka bagi dunia pendidikan dan teknologi bagi mereka yang membutuhkan informasi tentang pemanfaatan bahan baja

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Hussein (2012) dalam penelitiannya yang menggunakan proses *cryogenic treatment* pada baja karbon rendah menyatakan bahwa terjadi peningkatan kekerasan dan ketahanan aus setelah proses *cryogenic treatment*. Liu Hao Huai (2006) melakukan penelitian tentang pengaruh *cryogenic treatment* terhadap sifat $14\text{Cr}_2\text{Mn}_2\text{V}$ *High Chromium Cast Iron* yang dikenai *subcritical treatment*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa proses *cryogenic treatment* kemudian *subcritical Treatment* dapat meningkatkan kekerasan dan ketahanan abrasi HCCI karena austenit yang tertahan banyak diubah menjadi endapan martensit dan karbida sekunder halus.

Naravade (2013) melakukan penelitian tentang *Effects Of Cryogenic Treatment, Hardening and Multiple Tempering On Wear Behavior of D6 Tool Steel*. Penelitian menunjukkan bahwa perlakuan *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) menurunkan austenit yang tertahan dan karenanya meningkatkan ketahanan aus dan kekerasan. Karena distribusi karbida yang lebih homogen serta menghilangkan austenit yang tertahan, *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) menunjukkan lebih banyak peningkatan dalam ketahanan aus dan kekerasan dibandingkan dengan perlakuan panas.

Keausan didefinisikan sebagai hilangnya material dari permukaan benda padat sebagai akibat dari gerakan mekanik (Syafaat, 2008). Laju keausan material baja dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya faktor nilai kekerasan (*hardness*) dari material baja tersebut. Yifeng yao (2018) melakukan penelitian bahwa efek DCT pada sifat mekanik dan struktur mikro baja GB 35 CrMoV, dan menemukan bahwa semakin lama waktu *cryogenic treatment* maka semakin tinggi kekerasan dan semakin rendah rasio keausan. Chakradhar (2019) mengatakan presipitat karbida yang terbentuk menurunkan tegangan internal pada fasa martensit dan meminimalisir terjadinya *micro-crack*. Distribusi karbida yang seragam merupakan hal yang mempengaruhi tingginya kekerasan dan ketahanan abrasi yang terjadi.

Robinowicz (1995) menyebutkan keausan merupakan faktor penting dalam mengurangi fungsi permesinan termasuk membatasi usia pakai dan *performance* berbagai komponen mesin, hal ini mengakibatkan peningkatan biaya dan perawatan. Pengurangan fungsi suatu komponen mesin 70% disebabkan oleh kerusakan pada permukaan logam yang meliputi keausan (55%), korosi (15%). Mekanisme keausan yang dominan adalah keausan adhesif (25%) dan abrasi (20%), sedangkan sisanya disebabkan oleh mekanisme keausan yang lain. Varghese (2019) menyatakan bahwa terbentuknya presipitat karbida merupakan hal yang juga mempengaruhi peningkatan sifat mekanik material setelah melalui proses kriogenik.

Ratna Kartikasari, dkk (2012) mengatakan Baja tahan karat konvensional adalah baja tahan karat *austenitik* (paduan Fe-Cr-Ni) yang paling banyak digunakan dalam industri. Kelemahan dari baja tahan karat adalah biaya produksi yang tinggi dan cadangan yang terbatas, sehingga perlu dicari paduan baru yang dapat menggantikan baja tahan karat konvensional. Sistem paduan Fe-Al-Mn sangat menarik sebagai kandidat potensial untuk menggantikan baja tahan karat konvensional, dimana Al dan Mn masing-masing menggantikan Cr dan Ni.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Baja Karbon

Baja merupakan salah satu jenis logam ferro dengan unsur karbon (C) 1,7%, disamping itu baja juga mengandung unsur unsur lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silicon (Si), mangan (Mn), dan sebagainya yang jumlahnya dibatasi. Sifat baja pada umumnya sangat dipengaruhi oleh prosentase karbon dan struktur mikro. Struktur mikro pada baja karbon sangat dipengaruhi oleh perlakuan panas dan komposisi baja. Karbon dengan unsur campuran lain dalam baja membentuk karbida yang dapat menambah kekerasan, ketahanan gores dan ketahanan suhu baja. Perbedaan persentase karbon dalam campuran logam baja karbon menjadi salah satu cara mengklasifikasikan jenis baja.

2.2.2 Klasifikasi Baja Karbon

Ada banyak baja karbon dan keperluannya juga bermacam-macam, sehingga perlu diklasifikasikan dengan mengelompokkan masing-masing jenisnya seperti Baja St 37, St 42, St 50, St 60. Namun ada juga yang mengelompokkan menurut komposisi kimia yang dikenal dengan baja karbon rendah, baja karbon sedang, baja karbon tinggi, baja paduan rendah, dan baja paduan tinggi.

Baja karbon adalah baja yang memiliki unsur besi dan karbon serta unsur kimianya dalam batas-batas tertentu yang tidak banyak berpengaruh terhadap sifatnya. Unsur-unsur ini biasanya merupakan ikatan yang berasal dari proses pembuatan besi/baja, seperti mangan, silikon, dan beberapa unsur pengotor yakni Belerang, *Phospor*, Oksigen, Nitrogen dan lain-lain yang biasanya ditekan sampai kadarnya sangat kecil.

Menurut Smallman (1991), baja karbon digolongkan menjadi 3 kategori sebagai berikut :

1. Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Mempunyai kadar karbon sampai 0,25% sangat luas penggunaannya, sebagai baja konstruksi umum, untuk baja profil rangka bangunan, baja tulang beton, rangka kendaraan, mur-baut, pelat, pipa dan lain-lain. Baja ini kekuatannya relatif rendah, lunak, dan keuletannya tinggi, mudah untuk dibentuk, jenis baja ini tidak dapat dikeraskan kecuali dengan *case hardening*.

2. Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*)

Mempunyai kadar karbon antara 0,25%-0,55%, bersifat lebih kuat dan lebih keras dibandingkan baja karbon rendah dan dapat dikeraskan. Penggunaannya hampir sama dengan baja karbon rendah tapi memerlukan kekuatan dan ketangguhan yang lebih tinggi, juga banyak digunakan sebagai baja konstruksi mesin, seperti untuk poros, roda gigi, rantai dan lain-lain.

3. Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*)

Mempunyai kadar karbon lebih dari 0,55%, bersifat lebih kuat dan lebih keras lagi dibandingkan dengan kedua jenis sebelumnya, namun keuletan dan ketangguhannya rendah. Baja ini biasa digunakan sebagai perkakas yang biasanya memerlukan sifat tahan aus, misalnya untuk mata bor, *reamer*, tap, perkakas tangan dan lain-lain.

2.2.3 Baja Paduan

Baja paduan adalah campuran antara baja karbon dengan unsur-unsur lain yang akan mempengaruhi sifat-sifat baja itu, misalnya sifat kekerasan dan sebagainya yang bertujuan memperbaiki kualitas dan kemampuannya. Bentuk dan jenisnyapun bermacam-macam sehingga penggunaannya sangat luas maka berbagai pihak sering membuat klasifikasi menurut keperluan masing-masing. Untuk baja paduan terdiri dari 3 jenis (Smallman, 1991) :

1. Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steel*)

Merupakan baja paduan dengan kadar unsur paduan rendah yakni kurang dari 5%. Mempunyai kekuatan dan ketangguhan lebih tinggi dibandingkan baja karbon dengan kadar yang sama, atau mempunyai keuletan yang lebih tinggi dari pada baja karbon dengan kekuatan yang sama. Kekerasan dan sifat tahan korosi pada umumnya lebih baik sehingga banyak digunakan sebagai konstruksi mesin.

2. Baja Paduan Sedang (*Medium Alloy Steel*)

Merupakan baja paduan dengan kadar unsur paduan antara 5%-10% mempunyai sifat keuletan yang lebih tinggi tanpa pengurangan kekuatan tarik, kemungkinan retak saat dicelup pada minyak atau udara setelah terjadi pemanasan kurang.

3. Baja Paduan Tinggi (*High Alloy Steel*)

Merupakan baja paduan dengan kadar unsur paduan lebih dari 10% dan mempunyai sifat khusus tertentu seperti baja tahan karat (*Stainless Steel*), baja perkakas (*Tools Steel*) misalnya *high speed steel* (HSS), baja tahan panas (*Heat Resisting steel*) dan lain-lain.

2.2.4 Pengaruh Unsur Paduan Dalam Baja Karbon

Penambahan unsur-unsur paduan didalam baja karbon akan mempengaruhi sifat-sifat dari baja karbon sehingga membuat baja karbon menjadi berkualitas tinggi. Unsur-unsur antara lain :

1. Belerang dan fosfor (S dan P)

Kadar belerang yang terlalu tinggi mengakibatkan baja karbon bersifat rapuh apabila dalam keadaan panas. Sedangkan kadar fosfor yang terlalu tinggi akan mengakibatkan baja bersifat rapuh apabila berada dalam keadaan dingin. Presentase belerang dan fosfor yang diberikan pada baja karbon antara 0,04 % S dan 0,08 % P.

2. Silisium (Si)

Terkandung dalam jumlah kecil di dalam semua bahan besi dan dibutuhkan dalam jumlah yang lebih besar pada jenis tertentu. Meningkatkan kekuatan, kekerasan, dan kemampuan diperkakas secara keseluruhan, kekenyalan, ketahanan terhadap panas dan ketahanan terhadap korosi (karat), menurunkan tegangan.

3. Mangan (Mn)

Semua baja mengandung mangan karena sangat dibutuhkan dalam proses pembuatan baja. Kandungan mangan lebih kurang 0,6 % masih belum dapat sebagai paduan dan tidak mempengaruhi sifat baja, dengan kata lain mangan tidak memberikan pengaruh yang besar pada struktur baja dalam jumlah rendah. Dengan bertambahnya kandungan mangan maka suhu kritis menurun secara seimbang. Mangan membuat butiran lebih halus, penambahan unsur mangan dalam baja dapat meningkatkan kuat tarik tanpa mengurangi regang, sehingga baja dengan penambahan mangan memiliki sifat kuat dan kenyal (Amanto, 1999)

4. Vanadium (V)

Mempunyai dampak mirip dengan molybdenum (Mo) dalam baja, namun tanpa mengurangi regangan, meningkatkan kekuatan, batas rentang, keuletan panas, dan

ketahanan leleh, menurunkan kepekaan terhadap sengatan panas yang melewati batas pada perlakuan panas.

5. Molybdenum (Mo)

Kebanyakan dipadu dengan baja dalam ikatan dengan Cu, Ni, dan V meningkatkan kekuatan tarik, batas rentang, kemampuan temper menyeluruh, ketahanan panas, dan batas kelelahan, menurunkan tegangan dan kerapuhan pelunakan, mempunyai kekuatan tinggi serta mampu menambah ketahanan uap tinggi pada temperatur tinggi.

6. Tantalum (Ta)

Sangat tahan korosi terkecuali terkena asam sulfur. Baja *chrom* anti karat memperbaiki ketahanan korosi antara butir, penyetabilan karbida sehingga dapat dilas baik dengan tantalum (Ta), titik leburnya 3150°C, merupakan unsur campuran dari logam yang keras.

7. Titanium (Ti)

Memiliki kekuatan yang sama seperti baja, mempertahankan sifatnya sampai suhu 400°C. Oleh karena itu merupakan paduan kawat las, karbit. Titanium memiliki kekerasan dan titik lebur yang tinggi, juga merupakan unsur logam keras. Titanium memiliki ketahanan korosi yang baik hampir serupa dengan ketahanan korosi, tahan karat dan merupakan logam yang aktif tetapi membentuk lapisan pelindung yang halus pada permukaan yang mencegah korosi kedalam.

8. Kobalt (Co)

Kobalt digunakan sebagai bubuhan terhadap baja olah cepat dan baja keras. Magnet permanen juga mengandung kobalt. Unsur ini mampu meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, ketahanan panas dan korosi, daya hantar listrik dan kejenuhan magnetik.

9. Nikel (Ni)

Nikel mempunyai pengaruh yang sama seperti mangan, yaitu menurunkan suhu kritis dan kecepatan pendinginan kritis, memperbaiki kekuatan tarik atau menaikkan sifat kenyal, tahan panas, jika pada baja paduan terdapat unsur nikel sekitar 25% maka baja dapat tahan terhadap korosi. Unsur yang mempunyai bentuk kisi FCC (*face centered cubic*) larut dengan baik dalam austenit dan unsur yang mempunyai bentuk kisi BCC (*body centered cubic*) larut dengan baik dalam

ferit. Nikel adalah salah satu yang mempunyai bentuk kisi FCC, yang larut lebih baik dalam austenit daripada dalam ferit, sehingga mempengaruhi penurunan kecepatan transformasi dan meningkatkan mampu kerasnya. Unsur nikel yang bertindak sebagai peningkat tahan karat (korosi) disebabkan nikel bertindak sebagai lapisan penghalang yang melindungi permukaan baja (Armanto, 1999).

10. Chromium (Cr)

Sifat unsur kromium (Cr) dapat menurunkan kecepatan pendinginan kritis (Cr sejumlah 1,5 % cukup meningkatkan kekerasan dalam minyak). Penambahan kromium pada baja menghasilkan struktur yang lebih halus dan membuat sifat baja dapat dikeraskan (*hardenability*) lebih baik karena kromium dan karbon dapat membentuk karbida. Kromium dapat menambah kekuatan tarik dan keplastisan serta berguna dalam membentuk lapisan pasif untuk melindungi baja dari korosi serta tahan terhadap suhu tinggi. Kromium mempunyai kisi bcc yang lebih baik larut dalam ferit (Amanto, 1999).

11. Wolfram (W)

Merupakan unsur paduan terpenting bagi baja olah cepat dan logam keras. Berkat titik leburnya yang tinggi maka logam ini digunakan untuk kawat normalisasi dan daya sayat, menurunkan sedikit regangan.

2.2.5 Baja Tahan Karat

Baja tahan karat merupakan baja paduan yang mengandung sedikitnya 11.5 % krom berdasar beratnya. Baja tahan karat memiliki sifat tidak mudah terkorosi sebagaimana logam baja yang lain. Baja tahan karat berbeda dari baja biasa dari kandungan kromnya. Baja karbon akan terkorosi ketika berada pada udara yang lembab. Besi oksida yang terbentuk bersifat aktif dan akan mempercepat korosi dengan adanya pembentukan oksida besi yang lebih banyak lagi. Baja tahan karat memiliki persentase jumlah krom yang memadai sehingga akan membentuk suatu lapisan pasif kromium oksida yang akan mencegah terjadinya korosi lebih lanjut (Sendriks, 1979).

Meskipun seluruh kategori baja tahan karat didasarkan pada kandungan krom, namun unsur paduan lainnya dapat ditambahkan untuk memperbaiki sifat-sifat baja tahan karat sesuai penggunaannya. Kategori baja tahan karat berbeda dengan baja lain yang didasarkan pada persentase kadar karbon, tetapi didasarkan

pada struktur metalurginya. Dalam penggunaannya baja tahan karat selain dibutuhkan sebagai logam yang tahan terhadap korosi juga dibutuhkan sifat tambahan guna meningkatkan sifat mekaniknya. Peningkatan sifat mekanik ini tergantung pada sejumlah unsur yang terkandung dalam paduan baja tahan karat.

Berikut kegunaan unsur-unsur tambahan dalam baja tahan karat:

1. Chromium (Cr), berguna untuk membentuk lapisan pelindung untuk melindungi dari korosi.
2. Nikel (Ni), sebagai penstabil austenit, meningkatkan sifat mekanik, meningkatkan ketahanan korosi pada lingkungan asam mineral.
3. Mangan (Mn), untuk membantu fungsi Ni.
4. Molybdenum (Mo), sebagai penstabil lapisan pelindung dalam lingkungan yang mengandung banyak ion klorida (Cl) seperti pada lingkungan air laut (NaCl).
5. Karbon (C), untuk meningkatkan kemampuan dapat dikeraskan (*herdanability*) dari material baja tahan karat.
6. Nitrogen (N), dapat membentuk *duplex* baja tahan karat dengan meningkatkan terbentuknya austenit sehingga meningkatkan sifat mekanik baja tahan karat.

Ada lima golongan utama baja tahan karat seperti austenitik, feritik, martensitik, *duplex* dan baja tahan karat pengerasan prespitasi.

a. Baja tahan karat austenitik

Baja tahan karat austenitik memiliki struktur *face-centered cubic* (fcc). Struktur ini dapat menggunakan secara bebas unsur-unsur penyebab austenit seperti nikel, mangan, dan nitrogen. Baja ini *nonmagnetic* di kondisi anil dan dapat dikeraskan hanya dengan pengerjaan dingin (*cold working*). Kandungan kromium biasanya bervariasi antara 16% sampai 26%. *Molybdenum*, tembaga, silikon, *aluminium*, *titanium*, dan *niobium* dapat ditambahkan, untuk mendapatkan sifat-sifat yang dibutuhkan seperti tahan akan oksidasi. Ketahanan korosi baja tahan karat ini baik, mampu bentuk dan mampu lasnya juga baik, maka banyak dipakai dalam industri kimia. Selain itu juga banyak digunakan pada bahan konstruksi, perabot dapur, turbin, mesin jet, komponen berputar, konstruksi kapal, reaktor nuklir, dan sebagainya.

b. Baja tahan karat feritik

Baja tahan karat feritik merupakan baja dengan paduan kromium 10,5%-30% dan karbon kurang dari 0,12%. Baja tahan karat feritik memiliki struktur mikro *ferrite* dan bersifat *ferromagnetic*. Baja tahan karat *ferritic* memiliki tingkat kekuatan yang baik dan memiliki sifat mampu bentuk yang cukup.

Baja tahan karat ini biasanya dibentuk menjadi plat tipis sebagai bahan untuk bagian dalam suatu konstruksi, peralatan dapur, komponen trim mobil bagian dalam, dan lain lain. Pada lingkungan korosi yang ringan tidak terjadi karat, tetapi bila berada pada air larutan netral maka dapat terjadi korosi lubang *crevice* bila terdapat sedikit ion klor, atau bila ada struktur berbentuk *crevice*. Karena baja ini mengandung $\geq 15\%$ Cr maka bersifat getas pada 457 °C karena pemanasan yang lama pada 600-650 °C terjadi kegetasan, sehingga perlu dihindari penggunaan pada daerah temperatur ini.

c. Baja tahan karat martensitik

Baja tahan karat martensitik dibuat dengan mengubah baja paduan dari fase *austenite* ke *martensite*. Perubahan menjadi *martensite* terjadi bila baja paduan dipanaskan pada kisaran suhu 800-1400°C dan di *-quench* menuju suhu ruang. Baja tahan karat jenis ini mengandung *chromium* kurang dari 17% dan karbon hingga 1%. Baja tahan karat martensitik biasanya digunakan sebagai bahan pembuatan pisau kualitas tinggi dan *ball bearing*.

d. Baja tahan karat Duplex

Baja tahan karat *duplex* merupakan baja dengan paduan *chromium*, *nickel* dan *molybdenum* yang memiliki campuran (*duplex*) struktur mikro dengan persentase *ferrite* dan *austenite* hampir sama (keduanya sekitar 50%). Sifat tahan karat dari baja tahan karat *duplex* mirip dengan baja tahan karat *austenitic*. Baja tahan karat *duplex* memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada baja tahan karat *austenitic*.

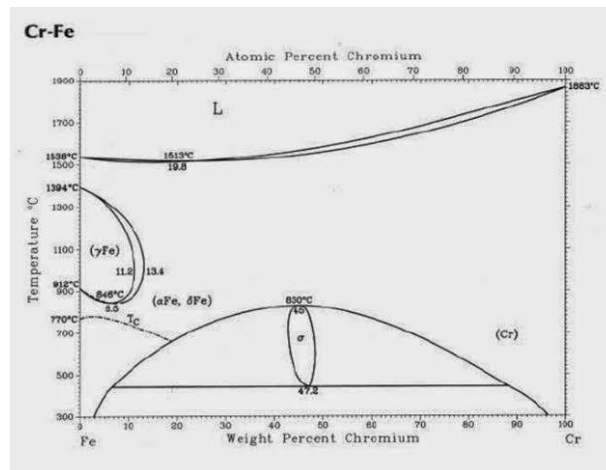
e. Baja Tahan karat Pengerasan Presipitasi

Baja tahan karat presipitasi adalah baja tahan karat yang keras dan kuat akibat dari dibentuknya suatu endapan dalam struktur mikro logam, sehingga gerakan deformasi menjadi terhambat dan memperkuat material baja tahan karat.

Pembentukan ini disebabkan oleh penambahan unsur tembaga (Cu), titanium (Ti), niobium (Nb) dan aluminium (Al). Proses penguatan umumnya terjadi saat dilakukan pengerjaan dingin (*cold work*).

2.3. Paduan Fe-Cr

Paduan Fe-Cr adalah jenis baja tahan karat paling sederhana yang berstruktur dasar *ferrite*. Hal ini dapat kita pahami dengan mempelajari diagram kesetimbangan fase Fe-Cr yang diperlihatkan pada Gambar 2.1. Kromium adalah unsur penstabil *ferrite*. Kromium dengan struktur BCC (sama dengan *Ferrite*) akan memperluas daerah fase *alpha* dan mempersempit daerah fase *gamma*. Akibatnya terbentuk *loop austenite* yang membatasi daerah FCC dan BCC

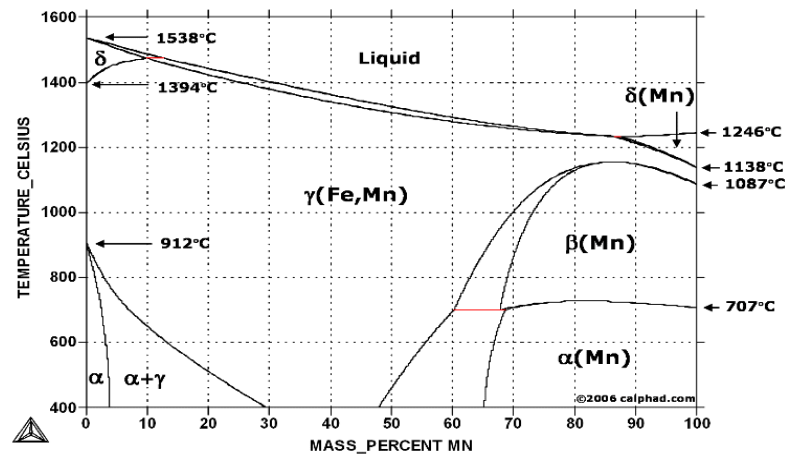


Gambar 2.1 Diagram fasa Fe-Cr (Kubaschewski, 1982)

2.4. Paduan Besi Mangan (Fe-Mn)

Menurut Davidson dkk (1988) penambahan bahan Mn pada baja tahan karat konvensional dalam jumlah besar akan menurunkan sifat-sifat paduan, tetapi dalam jumlah yang sedang akan mempunyai pengaruh yang menguntungkan, karena Mn akan berinteraksi dengan S membentuk Mn-sulfida yang akan berperan dalam meningkatkan ketahanan korosi, khususnya terhadap *pitting corrosion*. Sistem paduan Fe dengan 28-30% Mn, 8-10% Al dan 0,8-1% C diatas 850°C mempunyai struktur austenit lewat jenuh, dengan pemanasan 350-700°C struktur austenit akan terdekomposisi membentuk fasa (Fe,Mn) 3A1C yang akan meningkatkan kekuatan luluh secara signifikan. Fungsi penambahan Mangan (Mn) pada paduan besi adalah untuk menetralkan pengaruh dari kandungan sulfur

di dalam paduan besi. Sulfur dalam paduan besi menyebabkan paduan menjadi getas karena akan membentuk besi sulfida. Umumnya kadar penambahan mangan di dalam paduan besi sekitar 5 kali dari kadar sulfur yang terkandung didalam besi. Sehingga, jika kadar sulfur di dalam besi sekitar 0,1% maka jumlah mangan yang ditambahkan pada paduan seharusnya 0,5%. Jika penambahan mangan mencapai lebih dari 1% akan menyebabkan mangan menjadi penstabil karbida walaupun sangat lemah (Chastain, 2004).



Gambar 2.2. Diagram Fasa Fe-Mn (Honeycombe, 1995).

2.5. Paduan Fe-Cr-Mn

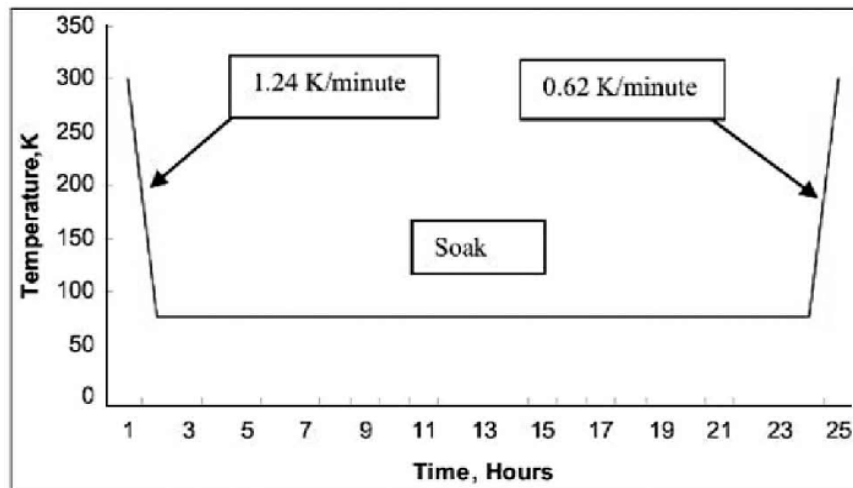
Baja tahan karat adalah paduan besi dengan kadar kromium minimal 10,5%. Kromium akan membentuk lapisan tipis yang disebut oksida kromium pada permukaan baja tahan karat. Oksida ini akan mencegah kerusakan akibat terjadinya korosi. Paduan baja tahan karat Fe-Cr-Mn tergolong baja tahan karat austenitik. Paduan ini pertama digunakan tahun 1930-an ketika di Jerman sulit mendapatkan nikel dan akhirnya dicari untuk penstabil austenit. Awal kemunculan paduan Fe-Cr-Mn adalah seri 205 dan pada pertengahan 1950-an seri 201 dan 202 mulai muncul. Ilmuan logam Jerman menemukan mangan dan nitrogen sebagai pengganti nikel, paduan Fe-Cr-Mn memiliki komposisi 16-18% Cr, 5,5-7,5% Mn, dan 3,5-5,5% Ni

2.6. Proses Deep Cryogenic Treatment (DCT)

Menurut Ramji (2010) *Deep cryogenic treatment* merupakan suatu proses pendinginan suatu bahan baja, baja tahan karat dan lain-lain dari temperatur kamar sampai dengan temperatur -320°F (-196°C) kemudian pada temperatur

tersebut ditahan selama waktu tertentu dan dilanjutkan dengan penghangatan sampai temperatur kamar.

Suprpto (2016) meneliti dampak kriogenik terhadap karakteristik keausan pahat ADI (*Austemper Ductile Iron*) terjadi penurunan keausan sebesar 77%. Proses kriogenik bertujuan untuk peningkatan sifat mekanik seperti kekerasan, ketahanan aus, ketahanan *fatigue*. SCT (*sub-zero cryo treatment*) adalah proses pendinginan yang dilakukan terhadap sampel pada temperatur -80°C (196°K) dan kemudian dilanjutkan pada temperatur kamar.



Gambar 2.3.Diagram *deep cryogenic treatment* (Nadig, 2014)

Unit *cryogenic treatment* dirancang dan dikembangkan dengan kemampuan berbagai tingkat pendinginan. Unit *cryogenic treatment* ini memiliki fitur bahwa sampel uji didinginkan ke suhu -196°C oleh pendinginan tidak langsung tanpa menyebabkan guncangan termal dengan semprotan nitrogen cair. Sistem *cryogenic treatment* menggabungkan ruang *cryogenic treatment* dan sistem suplai nitrogen cair tambahan untuk memasok kuantitas nitrogen cair yang terkontrol ke ruang untuk mempertahankan laju pendinginan, perendaman dan pemanasan.

Nadig (2014) mengatakan selama proses *cryo treatment* pada baja, partikel karbida keras dan berukuran mikro dilepaskan dalam material dan mereka tersebar secara merata di seluruh volume. Selain itu, austenit baja yang tidak dikonversi berubah menjadi struktur martensit yang kuat. Efek gabungan ini cenderung meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja.

Baldissera (2008) mengatakan Semprotan nitrogen cair yang dikontrol ke ruangan dilakukan menggunakan katup *solenoid* yang diaktifkan oleh kontroller PID.

Menurut Ryan Taylor (2009) *cryogenics institute of New England* mengatakan bahwa proses *cryogenic* tidak membuat logam lebih keras namun akan tetap jadi lebih tahan lama. Ada tiga perubahan yang terjadi pada proses *cryogenic*:

1. *Residual stress relief* (menghilangkan tekanan yang tertinggal), bila suatu material masih mengalami *residual stress* (yang bisa dialami logam saat mengalami pencetakan, pemotongan, di las atau dibubut) setelah *heat treating*, maka proses *cryogenic* akan juga ikut membantu menghilangkan *residual stress*, namun bisa masih menyisakan hingga 10% *residual stress*. Proses kriogenik akan membantu menghilangkan *residual stress* yang tersisa.
2. *Uniformity of the crystalline or microgain structure of the metal* (penyamaan kristalisasi atau struktur partikel mikro pada logam), ketika seongkah baja atau besi cetakan mengeras, mereka dipanaskan hingga atom besi dan atom karbon membentuk tipe kristal yang disebut *austenite*, kristal ini punya bentuk struktur partikel relatif lunak dengan beberapa titik kelemahan. Proses *cryogenic* membuat *austenite* berubah menjadi molekul lebih tahan aus, namun lebih mudah pecah yang dinamakan *martensite*. *Martensite* mempunyai bentuk kristal lebih merata daripada *austenite*. Proses *heat treatment* yang menggunakan suhu hingga 1,500°F akan mengurangi jumlah *austenite* dan menyisakan antara 10 hingga 15% *austenite* di logam, akan ada ruang kosong dan ketidaksempurnaan di logam. Ketika logam mendapat perlakuan *cryogenic*, mereka akan berubah menjadi *martensite*, hingga menyisakan hanya 1% *austenite*. Ini akan membuat logam lebih kuat, lebih awet tanpa ketidaksempurnaan.
3. *Precipitation of Eta carbides* (pembentukan *eta carbides*), pada logam yang mengalami proses *cryogenic* dijumpai juga pembentukan *eta carbides* yang juga bisa meningkatkan sifat anti aus.

Proses *cryogenic treatment* dilakukan pada komponen-komponen sebagai berikut: blok mesin, piston, *crankshaft* atau komponen lain ditempatkan dalam

ruang *cryogenic treatment*, ruang tersebut di isolasi dan temperatur kemudian diturunkan secara perlahan, satu derajat *fahrenheit* per menit, hingga suhu kemudian mencapai -320°F yang bisa dicapai dengan menggunakan nitrogen cair. Kondisi beku sangat dingin ini dipertahankan selama beberapa waktu lalu temperatur dinaikkan lagi secara hati-hati dan perlahan. Material ada yang membutuhkan adanya siklus *heat tempering* sehingga untuk material tersebut temperatur dinaikkan lebih tinggi lagi dan lalu dikembalikan ke suhu ruangan. Pada saat suhu komponen turun dan menjadi sama dengan suhu ruangan, maka struktur mikro yang diinginkan akan terbentuk. Siklus ini dilakukan berulang-ulang sesuai kebutuhan. Pada proses kriogenik fungsi kontrol berperan sangat penting, ruang kriogenik yang di kontrol komputer harus tetap tertutup selama siklus. Untuk bisa memberikan *cryogenic treatment* yang sempurna bisa diperlukan beberapa jam sampai beberapa hari, sehingga dipastikan komponen yang mendapat *treatment* akan lebih kuat dan strukturnya lebih stabil.

Menurut Dan Gathman dari Elgin *industries*, proses kriogenik bisa membenahi kesalahan yang terjadi pada proses *heat treating*. Kunci yang penting dari proses *heat treating* adalah pada saat proses pendinginan. Beberapa baja kekuatan tinggi membutuhkan kontrol atmosfer yang sensitif selama proses. Bila misalkan setelan atmosfer terlalu banyak maka pengerasan komponen di suhu ruangan menjadi tidak sempurna.

2.7. Keausan

Keausan didefinisikan sebagai kehilangan material secara progresif atau pemindahan sejumlah material suatu permukaan dari suatu hasil pergerakan relatif antara permukaan tersebut dan permukaan lainnya. Keausan telah menjadi perhatian praktis sejak lama tetapi hingga beberapa saat lamanya masih belum mendapat penjelasan pada mekanisme kerusakan akibat pembebanan yang berkaitan dengan gesekan (*friction*) dari permukaan material. Keausan bukan sifat dasar material, melainkan respon material terhadap sistem luar / kontak permukaan (Sok, 2006). Keausan adalah penguraian ketebalan permukaan akibat gesekan yang terjadi pada pembebanan dan gerakan. Keausan umumnya dianalogikan sebagai hilangnya materi sebagai akibat interaksi mekanik dua permukaan yang bergerak *slidding* dan dibebani.

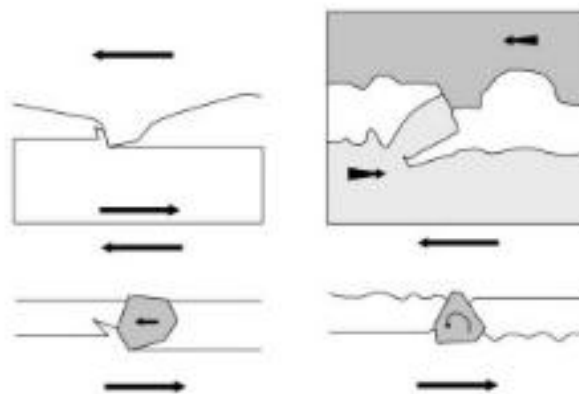
Mekanisme keausan dibedakan menjadi 4 jenis, yaitu:

1. Keausan gesek

Keausan gesek adalah salah satu jenis keausan yang disebabkan oleh terikat atau melekat atau berpindahya partikel dari suatu permukaan material lemah ke material yang lebih keras serta deformasi plastis dan pada akhirnya terjadi pelepasan/pengoyakan salah satu material. Proses bermula ketika benda dengan kekerasan yang lebih tinggi menyentuh permukaan yang lemah kemudian terjadi pengikatan. Pengikatan ini terjadi secara spontan dan dapat terjadi dalam suhu yang rendah atau moderat. *Adhesive wear* sering juga disebut *galling*, *scoring*, *scuffing*, *seizure*, atau *seizing*.

2. Keausan abrasif

Keausan jenis ini terjadi bila suatu partikel keras (*asperity*) dari material tertentu meluncur pada permukaan material lain yang lebih lunak sehingga terjadi penetrasi atau pemotongan material yang lebih lunak. Tingkat keausan pada mekanisme ini ditentukan oleh derajat kebebasan (*degree of freedom*) partikel keras atau *asperity* tersebut.



Gambar 2.4.Metode Keausan Abrasi (Endah, 2016)

3. Keausan lelah

Keausan lelah terjadi akibat interaksi permukaan dimana permukaan yang mengalami beban berulang akan mengarah pada pembentukan retak-retak mikro. Retak-retak mikro tersebut pada akhirnya menyatu dan menghasilkan pengelupasan material. Hal ini akan berakibat pada meningkatnya tegangan gesek.

4. Keausan korosi

Proses kerusakan dimulai dengan adanya perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan. Kontak dengan lingkungan ini menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda dengan material induk. Sebagai konsekuensinya, material akan mengarah kepada perpatahan *interface* antara lapisan permukaan dan material induk dan akhirnya seluruh lapisan permukaan itu akan tercabut.

2.8. Pengujian Bahan

Pengujian bahan material merupakan salah satu cara untuk mengetahui kualitas material. Sifat mekanik material tidak hanya tergantung pada stuktur mikronya. Suatu paduan dengan komposisi kimia yang sama dapat memiliki mikrostruktur yang berbeda dan memiliki kekerasan yang berbeda pula. Pengujian bahan dapat digolongkan menjadi 2 macam, yaitu: Pengujian dengan cara merusak (*Destructive test*) dan tanpa merusak (*Non-Destructive test*).

1. Pengujian *Destructive Test*

Destructive test merupakan pengujian yang dilakukan terhadap suatu material atau spesimen sampai performa material tersebut mengalami kerusakan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui performa material tersebut. Salah satu cara dengan memberikan gaya yang berubah-ubah terhadap material tersebut. Pengujian merusak bahan terdiri dari : pengujian kekerasan, pengujian tarik, pengujian lengkung, pengujian *impact*, pengujian struktur dan pengujian *fatigue*

2. Pengujian *Non-Destructive test*

Non-Destructive test merupakan proses pengujian suatu material untuk mengetahui cacat, retak, atau *discontinuitas* lain pada material tanpa merusak benda yang dilakukan pengujian. NDT dilakukan di awal dan diakhir proses fabrikasi untuk menentukan suatu komponen dapat diterima setelah melalui tahap fabrikasi kedua. NDT dilakukan dalam jangka waktu tertentu. Tujuannya untuk menentukan cacat parsial sebelum *damage tolerance*. Pengujian tanpa merusak terdiri dari: uji visual, uji cairan penetran (*liquid penetrant*), *Eddy current test*, *ultrasonic inspection*, dan *Radiography test*.

2.8.1. Uji Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur yang terdapat pada spesimen logam. Pengujian ini dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu sistem celup dan sistem *spectro*. Pada sistem celup, spesimen yang berupa serbuk dilarutkan ke dalam larutan tertentu untuk mengetahui kandungan unsur yang ingin diketahui (dinyatakan dalam %). Sedangkan pada sistem *spectro*, spesimen dipreparasi terlebih dahulu kemudian ditembakkan sinar *polychromatis* yang diubah menjadi *monochromatic* terhadap spesimen uji, maka *scanner* akan menunjukkan kadar semua unsur yang terkandung di dalam spesimen.

2.8.2. Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro adalah suatu pengujian untuk mengetahui susunan struktur logam pada suatu benda uji atau spesimen dengan perbesaran tertentu. Struktur mikro dan sifat paduannya dapat diamati dengan berbagai cara tergantung pada sifat yang dibutuhkan. Salah satu cara dalam mengamati struktur suatu bahan yaitu dengan teknik *metallographic testing* menggunakan alat mikroskop optik.

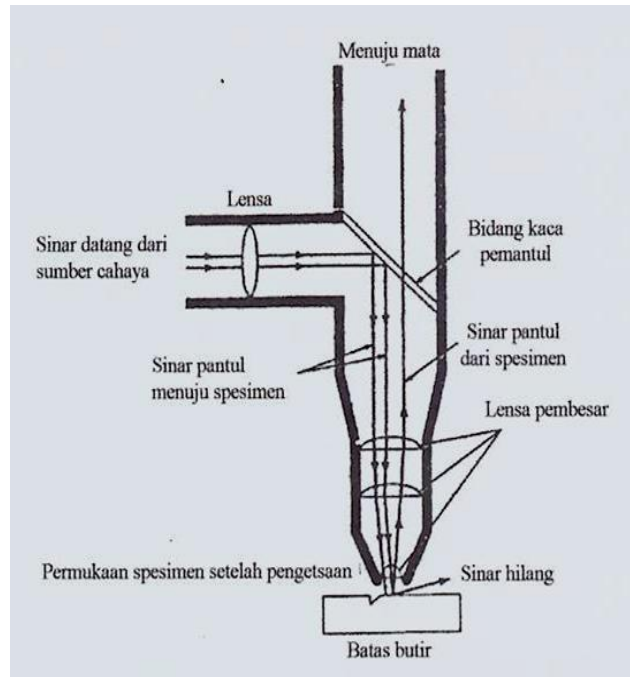
Proses terjadinya perbedaan warna, besar butir, bentuk dan ukuran butir yang mendasari penentuan dari jenis dan sifat fasa pada hasil pengamatan foto mikro adalah diakibatkan adanya proses pengetsaan. Prinsip dari pengetsaan sebenarnya merupakan proses pengikisan mikro terkendali yang menghasilkan alur pada permukaan akibat *crystal faceting* yaitu orientasi kristal yang berbeda, akan terjadi reaksi kimia yang berbeda intensitasnya. Karena fasa-fasa yang terdapat dalam logam memiliki kekerasan yang berbeda maka fasa yang lunak akan terkikis lebih dalam. Akibat adanya perbedaan ini dan bergantung pada arah cahaya pantulan yang tertangkap oleh lensa maka akan tampak bahwa fasa yang lebih lunak akan terlihat lebih terang dan fasa yang lebih keras akan terlihat gelap begitu juga akan terlihat bentuk dan ukuran butirnya sehingga dapat dibedakan fasa-fasa yang terlihat dalam bahan yang akan diuji.

Standar uji yang digunakan dalam pengujian ini adalah ASTM E3 (*Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*), yang berisi tentang persiapan sebelum pelaksanaan foto mikro seperti pemilihan permukaan spesimen, pembuatan ukuran dan pemotongan spesimen, pembersihan dan

penghalusan permukaan spesimen, pelapisan spesimen (resin), proses gerinda dan poles, dan pengetsaan.

Pada standar uji ASTM E 3 hal-hal yang perlu diperhatikan antara lain :

1. Pemilihan spesimen, yaitu memilih letak bagian permukaan mana yang perlu diteliti, misalnya untuk meneliti perbedaan struktur mikro pada bagian tepi, tepi-tengah, dan tengah seperti pada proses dekarburisasi, kedalaman korosi, tebal pelapisan dan sebagainya.
2. Ukuran spesimen yang dipoles umumnya tidak lebih dari 25 mm atau Ø 25 mm jika spesimen bulat. Untuk spesimen yang terlalu kecil harus di-*mounting* (diresin) untuk memudahkan pemegangan pada proses *grinding* dan *polishing* serta peletakan pada mikroskop.
3. Proses pemotongan material harus dijauhkan dari hal-hal yang dapat merusak bagian struktur yang akan diteliti karena pengaruh panas akibat gergaji, gerinda atau alat potong las.
4. Pembersihan spesimen harus dibersihkan dari debu, gemuk, oli dan karat, dengan solven.
5. *Mounting* spesimen dicetak pada plastik resin untuk ukuran spesimen yang kecil. Bahan plastik resin tahan terhadap pengaruh dari bahan etsa, sehingga tidak kusam. Pada bagian permukaan yang diteliti dibiarkan terbuka, sehingga dapat dietsa.
6. Pemolesan permukaan yang kasar harus digerinda atau diamplas dengan ukuran dari kasar hingga halus. Setelah halus kemudian permukaan dipoles dengan kain poles yang berputar sehingga nampak mengkilap.
7. Pengeetsaan dilakukan dengan mengoleskan cairan etsa pada permukaan spesimen. Bahan etsa yang digunakan tergantung dari jenis material benda uji, misalnya *Aquades* dan HNO_3 untuk baja dan $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$ untuk tembaga.



Gambar 2.5. Gambar Skema Mikroskop Optik (Van Vlack, 1992)

2.8.3 Uji Kekerasan

Vlack, (1984), kekerasan adalah tahanan yang dilakukan oleh bahan terhadap desakan ke dalam yang tetap, yang disebabkan oleh sebuah alat pendesak dengan bentuk tertentu dibawah pengaruh gaya tertentu.

Uji kekerasan ini berupa pembentukan lekukan pada permukaan logam memakai bola baja yang dikeraskan yang ditekan dengan beban tertentu. Beban diterapkan selama waktu tertentu, biasanya 30 detik, dan diameter lekukan diukur dengan mikroskop, setelah beban tersebut dihilangkan. Pengujian kekerasan bahan logam bertujuan mengetahui angka kekerasan logam tersebut. Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui seberapa besar tingkat kekerasan logam tersebut.

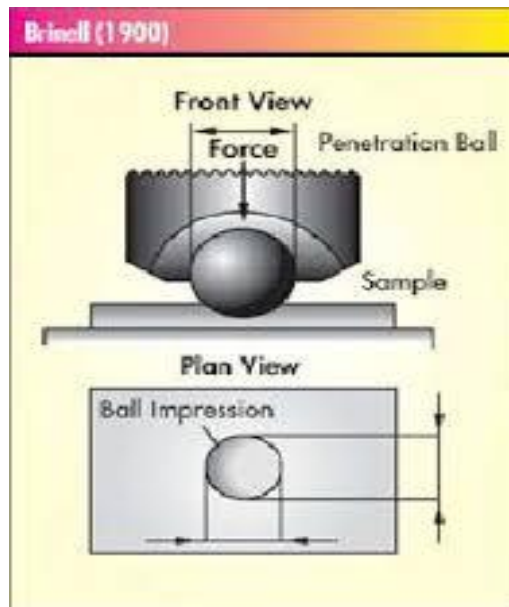
Menurut callister, (2001) kekerasan suatu bahan (baja) dapat diketahui dengan pengujian kekerasan memakai mesin uji kekerasan (*hardness tester*) menggunakan tiga metode atau teknik yang umum dilakukan yaitu metode *brinell*, *rockwell* dan *vickers*.

Pengujian kekerasan dibedakan menjadi 3 macam, yaitu:

1. Metode pengujian *Brinell* (HB/BHN)

Pengujian kekerasan dengan metode *Brinell* bertujuan untuk menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap bola baja

(*indentor*) yang ditekan pada permukaan material uji tersebut (spesimen). Pengujian *Brinell* diperuntukkan untuk material yang memiliki permukaan yang kasar dengan uji kekuatan berkisar 500-3000 kgf. *Indentor* (bola baja) biasanya telah dikeraskan dan *diplasting* ataupun terbuat dari bahan karbida Tungsten. Prinsip dari pengujian kekerasan *Brinell* yaitu dengan menekan *indentor* selama 30 detik. Kemudian diameter hasil *indentansi* diukur dengan menggunakan mikroskop optik. Diameter harus dihitung dua kali pada sudut tegak lurus yang berbeda.



Gambar 2.6. Metode pengujian *Brinell* (Callister, 2001)

Angka kekerasan *Brinell* (BHN) dinyatakan sebagai beban P dibagi luas permukaan lekukan. Menurut Callister (2001) kekerasan *Brinell* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$B = \frac{2F}{\frac{\pi}{2}D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

D : diameter bola (mm)

d : *impression* diameter (mm)

F : *load* (beban) (kg)

HB : *Brinell result* (kg/mm²)

Keuntungan-keuntungan pengujian *Brinell*:

- a. Beban yang digunakan dan bekas yang ditimbulkan akibat penekanan penetrator kecil.
- b. Pembacaan tingkat kekerasan lebih cepat.
- c. Dapat digunakan untuk pengujian benda yang keras.

Kekurangan pengujian *Brinell* yaitu:

- a. Tidak dapat digunakan pada benda yang tipis dan kecil
- b. Butuh ketelitian saat mengukur diameter lekukan hasil indentasi

2. Metode pengujian *Rockwell* (HR/RHN)

Pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell* bertujuan menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap *indentor* berupa bola baja ataupun kerucut intan yang ditekankan pada permukaan material uji tersebut. Penekanan *indentor* tersebut dilakukan dengan menekan beban pendahuluan (beban minor), kemudian ditambah dengan beban utama (beban mayor), kemudian beban mayor dilepaskan sedangkan beban minor masih dipertahankan. Pengujian *Rockwell* ada tiga jenis yaitu: HRA, HRB, dan HRC.

Kesalahan dalam pengujian *Rockwell* disebabkan beberapa faktor, yaitu:

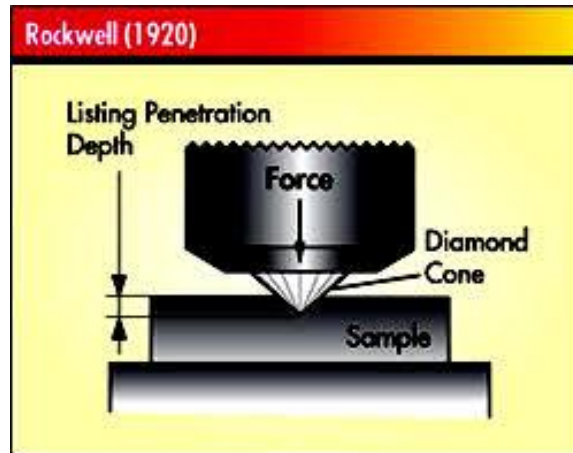
1. Mesin uji *Rockwell*
2. Operator
3. Benda uji

Kelebihan pada uji kekerasan metode *Rockwell* yaitu:

1. Dapat digunakan untuk bahan yang sangat keras.
2. Dapat dipakai untuk batu gerinda sampai plastik.
3. Cocok untuk semua material yang keras dan lunak.

Kelemahan dari uji kekerasan metode *Rockwell* antara lain:

1. Tingkat ketelitian rendah.
2. Tidak stabil apabila terkena guncangan.
3. Penekanan bebannya tidak praktis.



Gambar 2.7. Pengujian Kekerasan *Rockwell* (Callister, 2001).

Uji Kekerasan *Rockwell* dirumuskan dengan :

$$RHN = P - \frac{(H_1 - H)}{C} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

RHN : kekerasan *Rockwell*.

H₁ : dalamnya lekukan, penekanan setelah beban awal (mm).

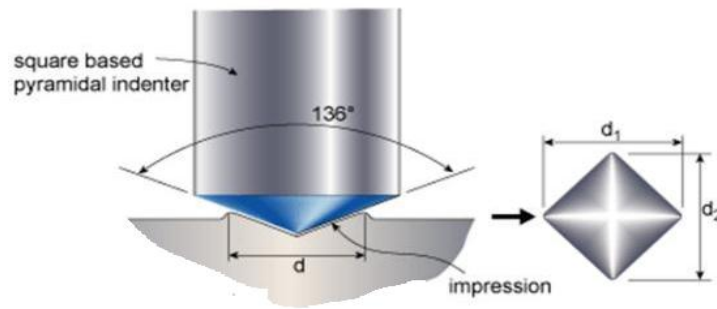
H : dalamnya lekukan, penekanan tanpa beban (mm).

C : angka skala pembagi mesin *Rockwell*, yaitu 0,002 mm.

3. Metode Pengujian *Vickers*

Metode pengujian *Vickers* dilakukan dengan cara menekan benda uji atau spesimen dengan indenter intan yang berbentuk piramida dengan alas segi empat dan besar sudut dari permukaan-permukaan yang berhadapan 136°C. Penekanan oleh *indenter* akan menghasilkan suatu jejak atau lekukan pada permukaan benda uji.

Kekerasan indentasi merupakan pengukuran yang didasarkan pada kedalaman atau lebar goresan yang dibuat oleh suatu indenter pada permukaan logam dengan beban tertentu. Pada saat teknik pengukuran dengan indentasi merupakan teknik pengukuran yang banyak dilakukan karena mudah untuk dilakukan dan tidak merusak spesimen secara berlebihan.



Gambar 2.8. Pengujian Kekerasan *Vickers* (Callister, 2001)

Menurut Callister (2001) kekerasan *Vickers* dirumuskan dengan:

$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{(1,854)P}{d^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

P = Gaya tekan (kg)

d = Panjang diagonal rata-rata (mm)

θ = Sudut antara intan yang berhadapan (136°)

Kelebihan pengujian metode *Vickers*:

- a. Skala kekerasan yang kontinyu untuk rentang yang luas, dari yang sangat lunak dengan nilai 5 maupun yang sangat keras dengan nilai 1500 karena *indenter* intan yang sangat keras.
- b. Dianjurkan untuk pengujian material yang sudah di proses *case hardening*, dan proses pelapisan dengan logam lain yang lebih keras.
- c. Dapat dilakukan pada benda-benda pada ketipisan 0.006 inci.

Kelemahan Pengujian metode *Vickers* yaitu:

- a. Membutuhkan waktu yang cukup lama untuk menentukan nilai kekerasan sehingga jarang dipakai untuk kebutuhan rutin.
- b. Waktu yang diperlukan untuk pengujian lebih lama.

2.8.4. Pengujian Keausan

Yuwono (2008) mengatakan keausan (*wear*) adalah hilangnya material secara progresif atau pemindahan sejumlah material dari suatu permukaan sebagai suatu hasil pergerakan relatif antara permukaan tersebut dan permukaan lainnya. Ada empat jenis keausan yaitu keausan gesek, keausan abrasif keausan lelah, dan keausan korosi. Salah satu pengujian keausan yaitu dengan menggunakan metode

Reiken Ogoshi, dimana benda uji memperoleh beban gesek dari cincin yang berputar (*revolving disc*). Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antar permukaan yang berulang-ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan benda uji. Besarnya jejak permukaan dari material tergesek yang dijadikan dasar penentuan tingkat keausan pada material. Semakin besar dan dalam jejak keausan maka semakin tinggi volume material yang terlepas dari benda uji. Pengujian keausan yang dilakukan menggunakan mesin uji keausan horizontal dengan rumusan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Selisih berat } \Delta W = W_0 - W_1 \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\text{Laju keausan} = \frac{\Delta W}{A.t} = \frac{\text{Gram}}{\text{mm}^2 \times \text{jam}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan:

- t = lamanya pengujian (jam)
- A = luas spesimen uji keausan (mm²)
- W₀ = berat awal (gram)
- W₁ = berat setelah pengujian (gram)
- ΔW = hasil selisih berat (gram)

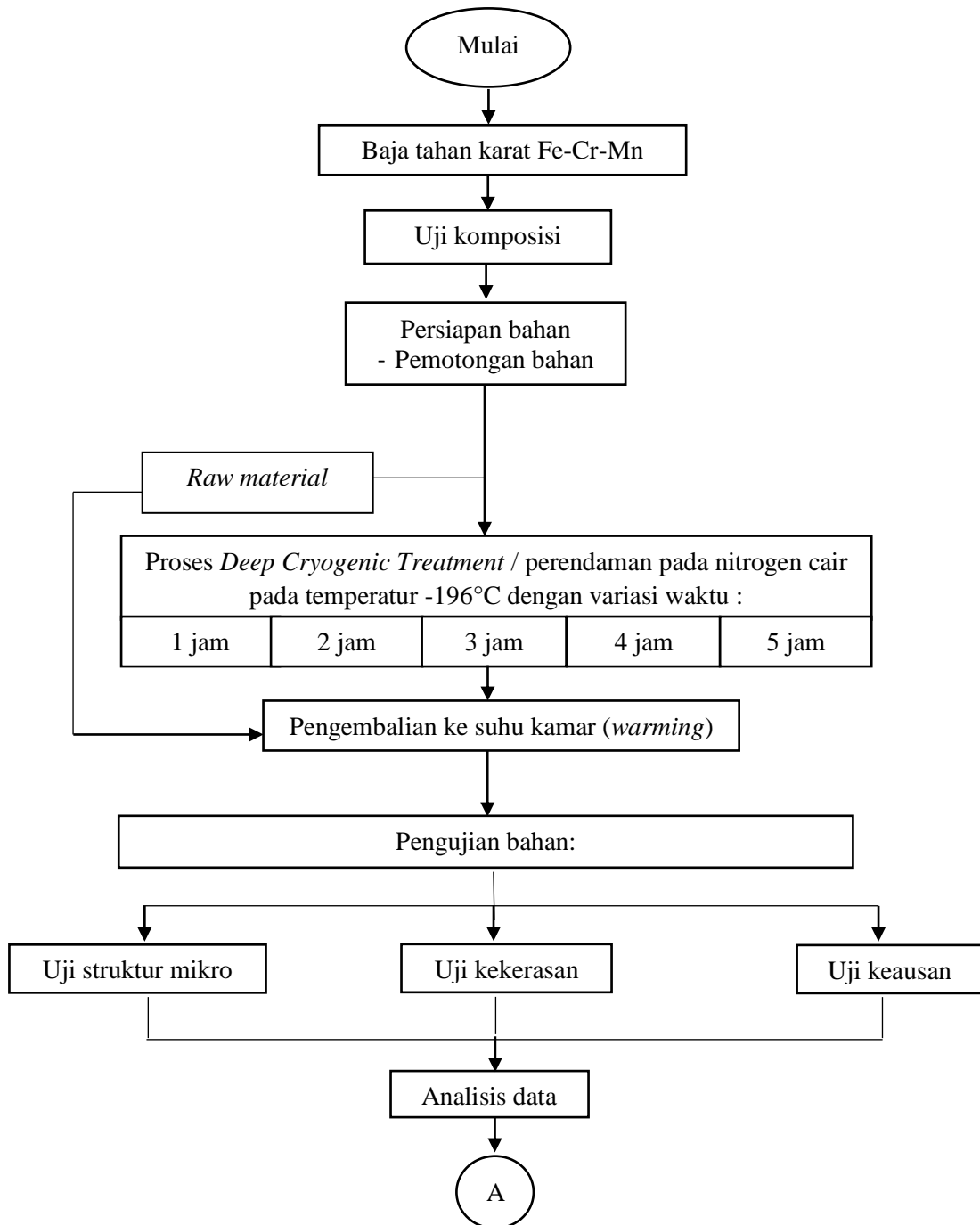
2.9. Hipotesis

Berdasarkan teori dan tinjauan pustaka maka dapat diambil hipotesis sebagai berikut:

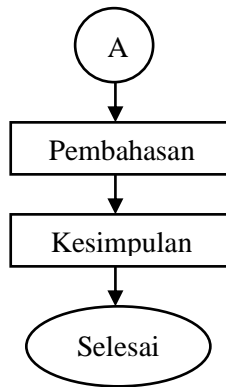
1. Semakin lama waktu perendaman proses *Deep cryogenic treatment* (DCT) pada baja paduan Fe-Cr-Mn maka struktur mikro akan membentuk presipitasi karbida yang lebih halus serta mengubah struktur austenit menjadi martensit.
2. Semakin lama waktu perendaman proses *Deep cryogenic treatment* (DCT) pada baja paduan Fe-Cr-Mn maka kekerasan semakin meningkat.
3. Semakin lama waktu perendaman proses *Deep cryogenic treatment* (DCT) pada baja paduan Fe-Cr-Mn maka ketahanan terhadap aus semakin meningkat.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Lanjutan

3.2. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Baja paduan Fe-Cr-Mn berbentuk silinder dengan diameter 13mm dan tebal 5mm (Gambar 3.2).
2. Nitrogen cair.
3. *Autosol* dan kain bludru.
4. Bahan Etsa *Aqua Regia* (alkohol 95 %, HNO_3 + HCl dengan perbandingan 1:3).
5. Alkohol 70%.
6. Amplas dengan nomor (100 *mesh* dan 180 *mesh*).

3.3. Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Alat uji komposisi kimia milik PT. Itokoh Ceperindo Klaten (Gambar 3.3)
2. Tabung nitrogen cair (Gambar 3.4).
3. Mesin amplas milik Laboratorium Material Teknik, Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (Gambar 3.6)
4. Alat uji struktur mikro (mikroskop optik) (Gambar 3.7) milik Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta dengan spesifikasi :

- Merek : *Olympus Metallurgical System Microscope*
- Model : BX60M
- Buatan : Jepang

- Tahun : 2000
- 5. Alat uji kekerasan *Vickers* (Gambar 3.8) milik Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta, dengan spesifikasi:
 - Merk : *Schmierplan/Lubriktion plan*
 - Model : *LA-H 250 RC. 16-02/Hardness TesterDIATestory*
 - Tahun : 2000
- 6. Alat uji keausan (Gambar 3.9) milik Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta.
- 7. Timbangan digital, milik Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta.

3.4. Langkah – Langkah Penelitian

3.4.1. Persiapan Spesimen

Dimensi benda uji disesuaikan dengan pengujian yang dilakukan untuk menghasilkan data yang maksimal.

1. Mempersiapkan bahan paduan baja Fe-Cr-Mn.
2. Benda uji dibubut hingga berdiameter 13 mm.
3. Pemotongan menggunakan mesin bubut dengan ketebalan benda uji 5 mm.
4. Pemotongan dilakukan hingga sejumlah 12 buah.



Gambar 3.2. Baja Fe-Cr-Mn

3.4.2 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung di dalam spesimen tersebut. Pengujian komposisi kimia dilakukan di PT. Itokoh Ceperindo menggunakan alat *spectrometer*.



Gambar 3.3.Alat uji komposisi *spectrometer*

Langkah-langkah pengujian komposisi kimia adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen uji sebanyak 1 (satu) buah.
2. Membersihkan permukaan spesimen dengan menggunakan amplas sampai halus.
3. Menyiapkan alat uji komposisi kimia *spectrometer*.
4. Memasang spesimen uji diatas landasan. Benda uji harus menutupi lubang pada alat uji, bila terjadi kebocoran maka mesin uji tidak bekerja dengan benar, karena pada waktu penembakan gas argon tidak boleh ada kebocoran.
5. Menghidupkan mesin. Membuka aliran gas argon, memutar tuas berlawanan arah dengan jarum jam. Mengatur tekanan gas argon sampai jarum pada regulator menunjukkan tekanan pada nilai 1,5 bar. Membuka keran merah yang berada di bagian belakang *spectrometer* untuk mengalirkan gas argon bagian dalam *spectrometer*, memutar 90° berlawanan arah jarum jam. Menaikkan empat tuas saklar di bagian depan, menghidupkan tombol pengatur pompa tunggu hingga indikator menunjukkan angka 30 sampai 40 psi. Pada tahap ini terjadi penyemburan gas berupa gas argon dengan suhu 400°C-800°C selama kurang dari 30 detik.
6. Menghidupkan komputer berturut-turut yaitu CPU, monitor, dan *printer*.

7. Menunggu sampai alat konstan ± 1 sampai dengan 2 jam.
8. *Spectrometer* siap untuk dioperasikan yaitu spesimen uji ditempatkan pada dudukan benda kerja dan ditembakkan energi tinggi melalui elektroda *wolfram (spark)* sehingga memberikan pancaran sinar keluar dari permukaan logam dan sinar yang terpancar bersifat polikromatik ini diterima oleh lensa cembung, kemudian diteruskan kedalam ruang vakum untuk selanjutnya diuraikan menjadi sinar monokromatik.
9. Hasil pembakaran selama ± 30 detik berupa cahaya yang berwarna yang kemudian menuju optik dan dibiaskan berupa warna unsur dan ditangkap oleh detektor dalam jumlah persen. Hasil konsentrasi unsur dapat ditampilkan di monitor.
10. Melihat pada layar komputer hasil dari penembakan spesimen uji dan bisa dicetak (*printer*) komputer pada kertas yang sudah disediakan atau disimpan di *hardware*.

3.4.3. Proses *Deep Cryogenic Treatment*

Proses *deep cryogenic treatment* dilakukan pada spesimen uji yang berjumlah 10 spesimen, dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam. Alat yang digunakan pada proses *deep cryogenic treatment* adalah tabung nitrogen cair.

Langkah-langkah proses *deep cryogenic treatment* adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan tabung nitrogen cair.
2. Memasukkan spesimen didalam tabung nitrogen cair.
3. Memasukkan *thermometer* untuk mengecek suhu nitrogen cair.
4. Menyalakan *stopwatch* untuk mengetahui lama perendaman setiap spesimen mulai dari 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam.
5. Mengambil spesimen yang telah direndam di nitrogen cair.
6. Mengembalikan suhu spesimen pada suhu kamar (*warming*).



Gambar 3.4. Tabung nitrogen cair

3.4.4. Pengujian Struktur Mikro

Proses pengujian ini merupakan langkah untuk mengetahui struktur mikro dengan menggunakan pemotretan/pengambilan foto menggunakan alat optik khusus yang disebut dengan mikroskop. Tahap-tahap yang perlu dilakukan sebelum melakukan pengujian struktur mikro, yaitu :

a. *Sectioning* (Pemotongan)

Pemotongan ini dipilih sesuai dengan arah yang akan diperiksa dari logam tersebut sesuai dengan ukuran tertentu, serta memudahkan dalam proses pengujian.

b. *Mounting* (Pemasangan)

Proses *mounting* diperlukan jika sampelnya kecil atau mempunyai bentuk yang tidak beraturan sehingga pada proses penggerindaan material mudah dipegang.



Gambar 3.5. Hasil *mounting* (resin)

c. *Grinding* (Pengamplasan kasar)

Tahapan ini dilakukan untuk menghaluskan permukaan dan menghilangkan kerak pada permukaan spesimen. Amplas yang sering digunakan adalah ukuran 100 *mesh* dan 180 *mesh*.

d. *Polishing* (Pemolesan)

Proses pemolesan menggunakan kain bludru dan autosol. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan permukaan spesimen yang rata dan mengkilap, tidak boleh ada goresan yang merintanginya selama pengujian.



Gambar 3.6. Mesin polishing and grinding

e. *Etching* (pengetsaan)

Pada permukaan logam yang telah dipoles akan didapatkan permukaan yang halus dan mengkilap seperti cermin. Permukaan logam tersebut kemudian dietsa dengan cara mencelupkan atau mengoles selama beberapa detik. Setelah benda uji mengalami proses *polishing*, maka dilakukan pengetsaan, dimana permukaan benda uji dicelup dengan waktu 10 detik menggunakan Aqua Regia (alkohol 95 %, HNO_3 + HCl dengan perbandingan 1:3), setelah itu dibersihkan dengan media air dan alkohol 70 %, kemudian dikeringkan dengan udara hangat, tujuannya agar terhindar dari oksidasi udara sekitar.

Setelah spesimen uji dietsa maka spesimen uji dipasang pada anvil untuk di foto. Pemasangan ini harus tegak lurus terhadap lensa pengujian untuk mendapatkan hasil yang baik. Mengatur fokus pada mikroskop optik pada daerah

atau titik yang akan diambil gambarnya. Langkah selanjutnya adalah melakukan pemotretan dengan perbesaran 200 kali.



Gambar 3.7. Alat uji struktur mikro (mikroskopik optik).

Cara penggunaan “*inverted metallurgy microscope*”

- 1) Mikroskop dinyalakan “ON” pada ‘*power switch*’.
- 2) Meletakkan spesimen pada ‘*stage*’.
- 3) Memilih cahaya yang sesuai dengan memutar “*Light Intensity Control Knob*”.
- 4) Memilih perbesaran lensa “*Objective*” dengan memutar “*revolving nosepiece*”.
- 5) Melihat gambar pada “*Eyepieces*” yaitu pada lensa okuler.
- 6) Membuat gambar menjadi fokus dengan memutar “*coarse faces*” dan “*fine focus*”.
- 7) Memilih lokasi yang akan diinginkan dengan memutar “*stage prive control knob*”.
- 8) Untuk melakukan pemotretan :
 - a) Mempersiapkan camera.
 - b) Memilih spesifik gambar yang akan diambil dengan “*photo unit adjusterroll*”.
 - c) Menekan “*Expose*” untuk melakukan pemotretan.
- 9) Kemudian ulangi langkah pengujian seperti diatas untuk benda uji selanjutnya.

3.4.5. Pengujian Kekerasan

Pada penelitian ini pengujian kekerasan menggunakan pengujian kekerasan *Vickers*. Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta.



Gambar 3.8.Alat uji kekerasan *Vickers*.

Langkah-langkah pengujian kekerasan *Vickers* adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen uji sebanyak 12 (dua belas) spesimen.
2. Menghidupkan mesin uji.
3. Memasang spesimen pada meja alat uji dan mengatur posisinya sesuai dengan daerah yang akan di uji.
4. Memfokuskan daerah yang akan di uji melalui layar monitor alat uji dengan cara memutar *handle*.
5. Mengatur beban yang akan digunakan dengan mengatur *stick* beban alat uji pada beban yang telah ditentukan yaitu 300 gram.
6. Setelah didapat fokus daerah yang akan di uji, selanjutnya *handle* penetrator digeser kesamping pada posisi alat uji tepat diatas daerah uji, kemudian dilepas.
7. Menunggu sampai *handle* penetrator tidak lagi bergerak yang berarti pengujian telah selesai.
8. Mengembalikan *handle* penetrator pada posisi semula.

9. Mengukur besar injakan hasil uji dan catat hasilnya.
10. Kemudian langkah pengujian seperti diatas untuk benda uji selanjutnya.

3.4.6. Pengujian Keausan

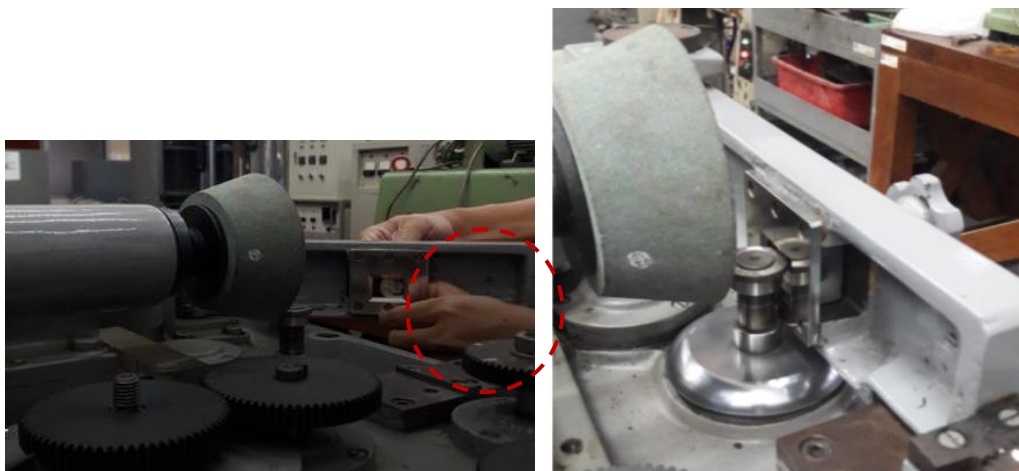
Pada penelitian ini menggunakan pengujian keausan dengan metode Ogoshi. Pengujian keausan dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta.



Gambar 3.9. Alat uji keausan.

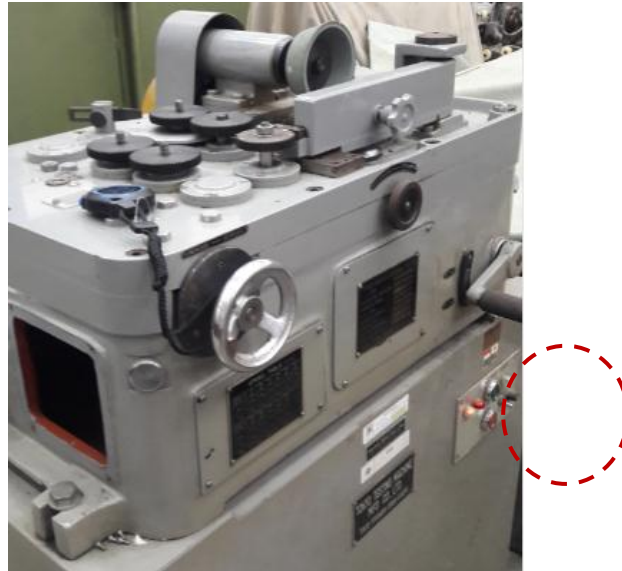
Langkah-langkah pengujian keausan adalah sebagai berikut:

1. Spesimen uji diresin sehingga ukuran menjadi 20 mm x 30 mm dengan ketebalan 10 mm
2. Spesimen diampelas dengan amplas *grade 100 mesh* dan *180 mesh* hingga rata dan halus
3. Spesimen uji dipasang di alat uji keausan (*universal wear*) seperti terlihat pada Gambar 3.10



Gambar 3.10. Pemasangan spesimen uji

4. Memilih roda gigi dengan perbandingan 72:72 agar diperoleh pembebanan 6,36 kg
5. Menghidupkan alat uji dengan menekan tombol *ON* seperti terlihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11. Universal Wear

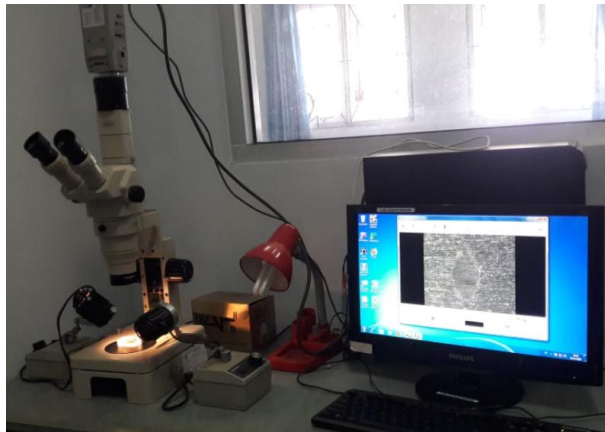
6. Menyalakan mesin uji hingga 60 detik yang dimonitor dengan *stopwatch* seperti terlihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12. Stopwatch

7. Mematikan mesin dengan menekan tombol *OFF*.
8. Mengambil spesimen uji dari alat uji

9. Mengukur lebar goresan bekas uji keausan dengan *stereozoom microscope*, seperti terlihat pada Gambar 3.13



Gambar 3.13. Pengukuran lebar goresan

10. Memasukkan lebar goresan ke dalam rumus laju keausan

BAB IV

ANALISIS HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Hasil Penelitian Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur pada benda uji. Data hasil dari pengujian komposisi kimia dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi kimia paduan Fe-Cr-Mn

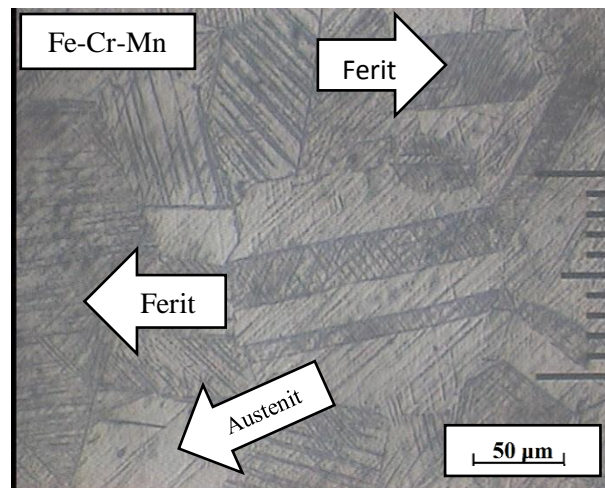
NO	UNSUR	(% Berat)
1	C	0,120
2	Si	0,455
3	Mn	8,838
4	P	0,051
5	S	0,018
6	Cr	14,37
7	Mo	0,087
8	Ni	0,581
9	Cu	1,065
10	Al	0,052
11	Co	0,089
12	Nb	0,037
13	Ti	0,012
14	V	0,050
15	Fe	74,18
Total		100

Hasil pengujian komposisi paduan Fe-Cr-Mn (Tabel 4.1), menunjukkan bahwa jumlah kandungan (Cr) 14,37% dan unsur mangan (Mn) 8,83%. Jumlah unsur paduan utamanya 23,20% sehingga paduan ini termasuk baja paduan tinggi (Smallman, 1991). Penambahan unsur (Cr) membuat sifat keras baja (*hardenability*) menjadi lebih baik karena kromium dan karbon dapat membentuk karbida. Kromium juga mampu membentuk lapisan pasif untuk melindungi baja dari korosi serta tahan terhadap suhu tinggi (Amanto, 1999). Penambahan unsur mangan (Mn) dalam sistem paduan membuat butiran lebih halus, meningkatkan

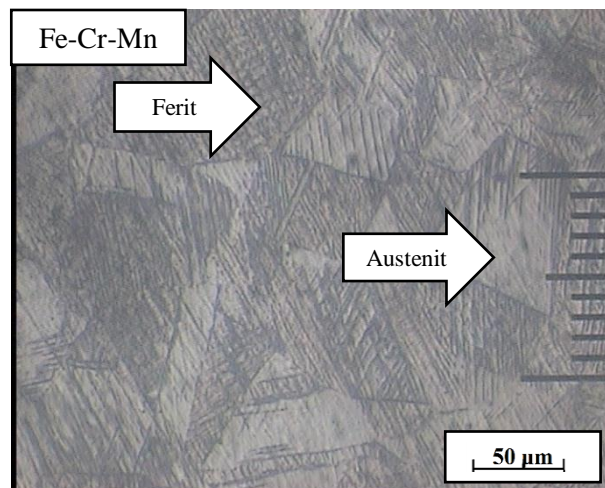
kekuatan tarik tanpa mengurangi regangan, sehingga baja menjadi semakin kuat dan ulet (Amanto, 1999).

4.2 Analisis Hasil Pengujian Struktur Mikro

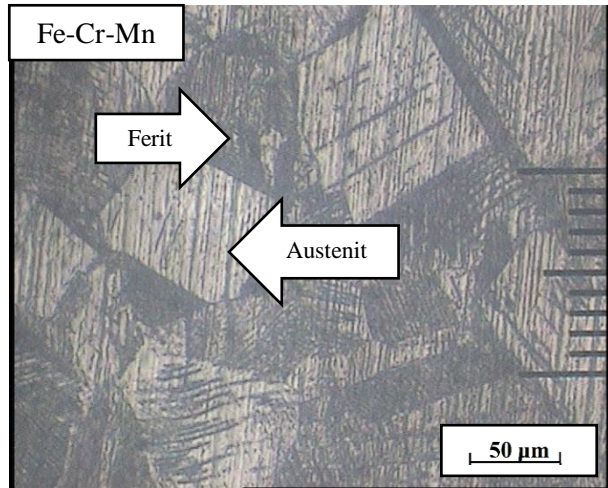
Pengujian struktur mikro dilakukan dengan pengamatan pada benda uji menggunakan mikroskop optik setelah benda uji dietsa. Zat kimia yang digunakan untuk etsa adalah *aqua regia*. Benda uji tersebut terdiri dari spesimen *raw material* dan spesimen setelah proses *deep cryogenic treatment* selama variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan menggunakan perbesaran 200x pada seluruh spesimen. Hasil pengujian struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 4.1 – 4.6.



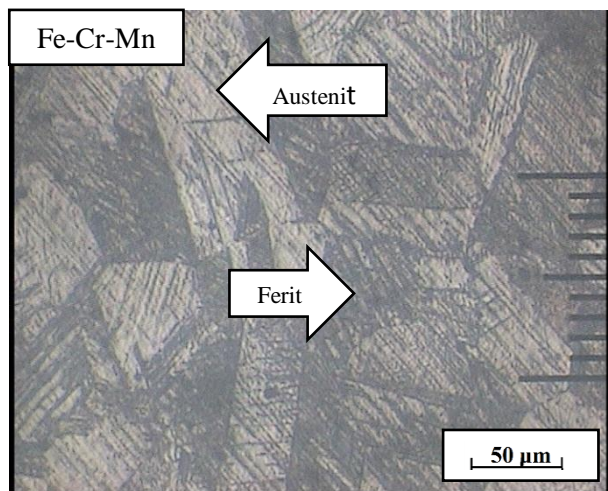
Gambar 4.1 Foto mikro *raw material* paduan Fe-Cr-Mn



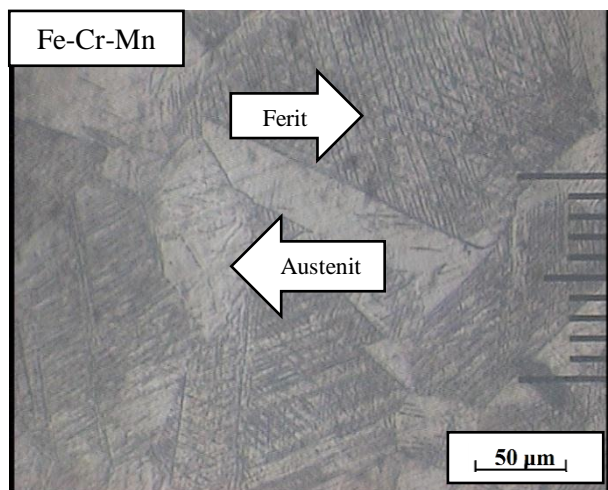
Gambar 4.2 Foto mikro paduan Fe-Cr-Mn proses DCT 1 jam



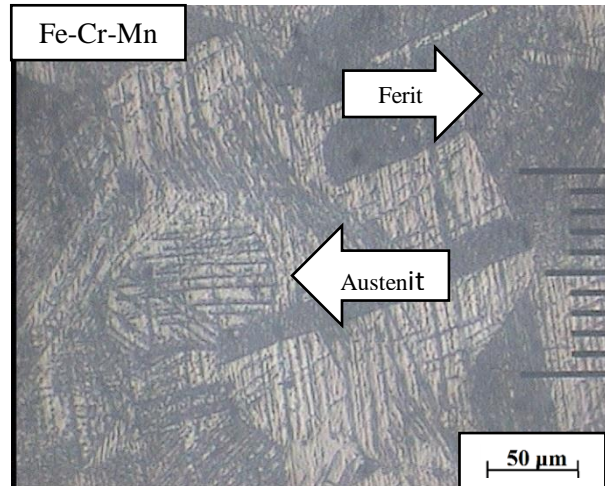
Gambar 4.3 Foto mikro paduan Fe-Cr-Mn proses DCT 2jam



Gambar 4.4 Foto mikro paduan Fe-Cr-Mn proses DCT 3 jam



Gambar 4.5 Foto mikro paduan Fe-Cr-Mn proses DCT 4 jam



Gambar 4.6 Foto mikro paduan Fe-Cr-Mn proses DCT 5 jam

Hasil pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200x menunjukkan paduan Fe-Cr-Mn memiliki struktur *austenite* dan ferit. Hal ini disebabkan karena adanya unsur Mn yang ditambahkan pada Fe-Cr mampu menstabilkan *austenite*. Daerah *austenite* terlihat lebih terang dibandingkan daerah ferit, hal ini disebabkan karena perbedaan besar butir pada bagian tersebut, sedangkan unsur Cr yang terkandung dalam paduan Fe-Cr-Mn merupakan pembentuk dan penstabil ferit.

Semakin tinggi temperatur butir austenit semakin membesar, ini terlihat pada spesimen *raw material* yang masih didominasi *ferit* yang terlihat lebih gelap, pada spesimen proses DCT 1 jam terlihat unsur *austenite* sudah mulai tumbuh, pada spesimen dengan proses DCT 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam memperlihatkan struktur mikro yang terlihat adalah struktur *austenite* yang tumbuh secara homogen ditandai dengan warna terang pada daerah tersebut, hal ini dikarenakan butir *austenite* semakin membesar. Berdasarkan analisis hasil uji struktur mikro pada Gambar 4.1 - 4.6 dapat diambil kesimpulan bahwa paduan Fe-Cr-Mn termasuk kategori *duplex stainless steel*. Hal ini dibuktikan oleh terbentuknya dua fasa struktur mikro yaitu struktur *austenite* dan juga struktur ferit

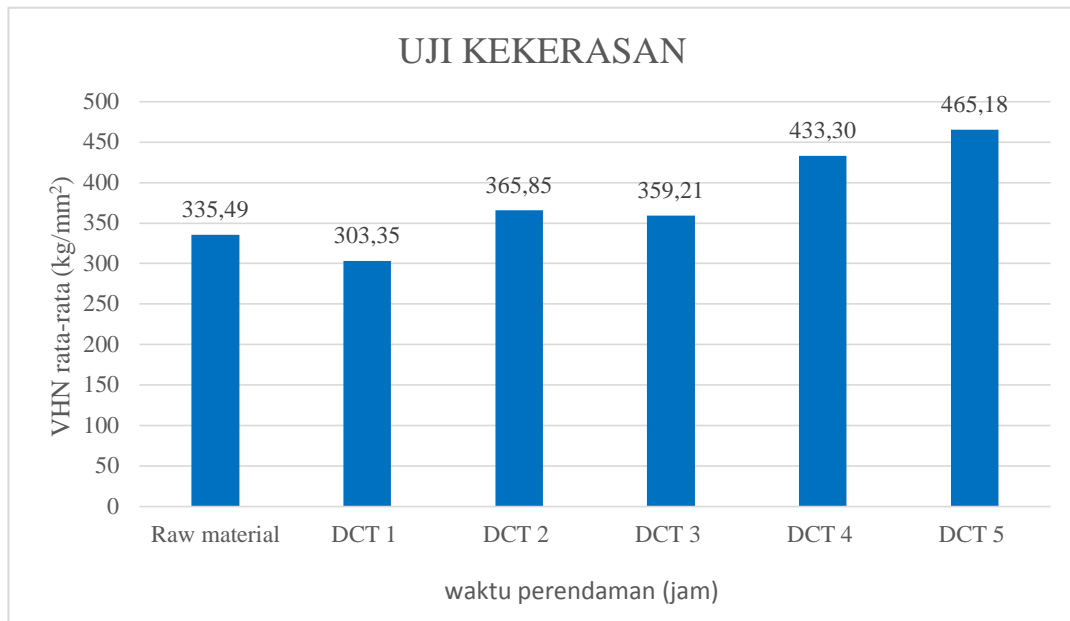
4.3 Analisis Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode uji kekerasan *Vickers*. Harga kekerasan yang diperoleh dengan cara menghitung beban yang diberikan dibagi rata-rata diagonal bekas pijakan piramida intan pada posisi yang diuji. Untuk menghitung hasil uji kekerasan *Vickers* (VHN) dapat digunakan rumus kekerasan berdasarkan Persamaan 4.1, hasil uji kekerasan bisa dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers* Paduan Fe-Cr-Mn

Variasi	Titik Uji	D1 (mm)	D2 (mm)	D rata-rata (mm)	Kekerasan (VHN)	Kekerasan rata rata (VHN)	Kekerasan rata rata total.(VHN)
Raw 1	1	0.41	0.43	0.42	315.31	320.40	335,49
	2	0.41	0.42	0.42	322.95		
	3	0.41	0.42	0.42	322.95		
Raw 2	1	0.40	0.40	0.40	347.63	350.58	
	2	0.39	0.40	0.40	356.48		
	3	0.40	0.40	0.40	347.63		
DCT 1jam_1	1	0.43	0.43	0.43	300.81	308.02	303,35
	2	0.43	0.42	0.43	307.93		
	3	0.42	0.42	0.42	315.31		
DCT 1jam_2	1	0.44	0.44	0.44	287.29	298.68	
	2	0.43	0.42	0.43	307.93		
	3	0.43	0.43	0.43	300.81		
DCT 2jam_1	1	0.40	0.40	0.40	347.63	359.66	365,85
	2	0.39	0.39	0.39	365.68		
	3	0.39	0.39	0.39	365.68		
DCT 2jam_2	1	0.39	0.39	0.39	365.68	372.05	
	2	0.38	0.39	0.39	375.24		
	3	0.38	0.39	0.39	375.24		
DCT 3jam_1	1	0.40	0.41	0.41	339.09	336.56	359,21
	2	0.41	0.42	0.42	322.95		
	3	0.39	0.41	0.40	347.63		
DCT 3jam_2	1	0.38	0.39	0.39	375.24	381.87	
	2	0.38	0.38	0.38	385.18		
	3	0.38	0.38	0.38	385.18		
DCT 4jam_1	1	0,35	0,36	0,36	441,37	437,28	433,30
	2	0,36	0,36	0,36	429,17		
	3	0,35	0,36	0,36	441,34		
DCT	1	0,36	0,36	0,36	429,17	429,33	

4 jam_2	2	0,36	0,37	0,37	417,49		
	3	0,35	0,36	0,36	441,34		
DCT 5 jam_1	1	0,34	0,35	0,35	467,30	462,88	465,18
	2	0,35	0,35	0,35	454,04		
	3	0,35	0,34	0,35	467,30		
DCT 5 jam_2	1	0,34	0,34	0,34	481,14	467,49	
	2	0,34	0,35	0,35	467,30		
	3	0,35	0,35	0,35	454,04		



Gambar 4.7. Diagram Kekerasan Rata-Rata Paduan Fe-Cr-Mn.

Contoh perhitungan uji kekerasan *Vickers* pada spesimen DCT 2 jam dengan pembebanan 30 kgf.

$$VHN = 1,8544 \frac{F}{d^2} \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana:

VHN : angka kekerasan *Vickers*

F : beban (kg)

D : diagonal (mm)

$$d = \frac{(d1+d2)}{2} \dots \dots \dots (4.2)$$

Titik 1

$$d = \frac{(d1+d2)}{2} = \frac{0,40 \text{ mm} + 0,40 \text{ mm}}{2} = 0,40 \text{ mm}$$

$$VHN=1,8544\frac{F}{d^2}=1,8544\frac{30\text{ kg}}{(0,40\text{ mm})^2}= 347,63\text{ kg/mm}^2$$

Titik 2

$$d=\frac{(d1+d2)}{2}=\frac{0,39\text{ mm}+0,39\text{ mm}}{2}=0,39\text{ mm}$$

$$VHN=1,8544\frac{F}{d^2}=1,8544\frac{30\text{ kg}}{(0,39\text{ mm})^2}= 365,68\text{ kg/mm}^2$$

Titik 3

$$d=\frac{(d1+d2)}{2}=\frac{0,39\text{ mm}+0,39\text{ mm}}{2}=0,39\text{ mm}$$

$$VHN=1,8544\frac{F}{d^2}=1,8544\frac{30\text{ kg}}{(0,39\text{ mm})^2}= 365,68\text{ kg/mm}^2$$

$$VHN_{\text{rata-rata}}=\frac{315,31\text{ kg/mm}^3+322,95\text{ kg/mm}^2+322,95\text{ kg/mm}^2}{3}= 359,66\text{ kg/mm}^2$$

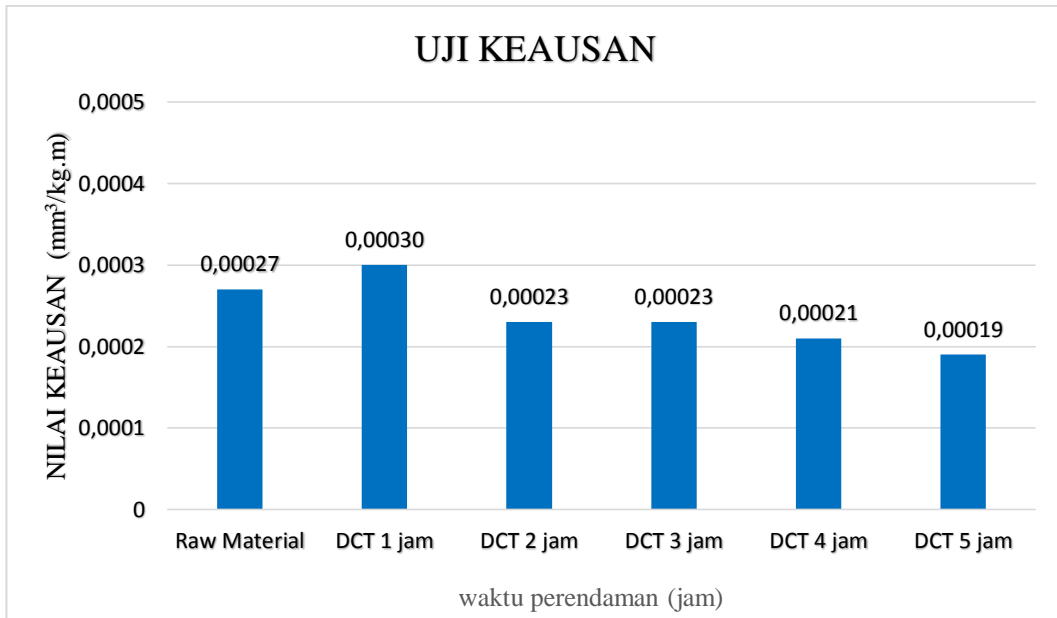
Pengujian kekerasan yang dilakukan pada setiap spesimen menghasilkan angka kekerasan *Vickers* (VHN) yang bervariasi (Tabel 4.2). Angka kekerasan yang digunakan merupakan angka rata-rata dari 3 titik pengujian yang dilakukan tiap spesimen. Gambar 4.7 menunjukkan hasil uji kekerasan pada spesimen Fe-Cr-Mn, pada spesimen *raw material* diperoleh harga kekerasan sebesar 335,49 kg/mm², kemudian pada proses DCT selama 1 jam diperoleh harga kekerasan sebesar 303,35 kg/mm² dimana pada proses DCT 1 jam mengalami penurunan kekerasan sebesar 32,14 kg/mm² atau 9,58%. Pada proses DCT 2 jam diperoleh harga kekerasan sebesar 365,85 kg/mm² dimana disini mengalami kenaikan harga kekerasan sebesar 62,5 kg/mm² atau 17,08%, pada proses DCT 3 jam diperoleh harga kekerasan sebesar 359,21 kg/mm², spesimen mengalami penurunan harga kekerasan sebesar 6,64 kg/mm² atau 1,81%, pada spesimen dengan proses DCT 4 jam diperoleh harga kekerasan sebesar 433,30 kg/mm², spesimen mengalami penurunan harga kekerasan sebesar 74,09 kg/mm² atau 17,09%, pada spesimen dengan proses DCT 5 jam diperoleh harga kekerasan sebesar 465,18 kg/mm² dimana disini mengalami kenaikan harga kekerasan sebesar 31,88 kg/mm² atau 6,85%. Dari hasil uji kekerasan tersebut angka kekerasan tertinggi ada pada spesimen dengan proses *deep cryogenic treatment* dengan perendaman selama 5 jam.

4.3 Analisis Hasil Pengujian Keausan

Pengujian keausan dilakukan menggunakan metode *Ogoshi*, yaitu benda uji memperoleh beban gesek dari cincin yang berputar (*revolving disc*). Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antar permukaan yang berulang-ulang yang akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan benda uji. Hasil pengujian keausan menggunakan metode *Ogoshi* dengan gaya tekan 6,36 kg dengan jarak pengausan 15 m, setiap spesimen dilakukan pengujian pada 3 gesekan yang berbeda. Hasil pengujian keausan dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Keausan

Variasi spesimen	Titik uji	Tebal Disc (B;mm)	Jari-jari Disc (r;mm)	Panjang Wear (b;mm)	Volume Tergores (W;mm)	Keausan (Ws;mm ³ /kg.m)	Keausan rata-rata (Ws;mm ³ /kg.m)
Raw	1	3,45	13,6	0,93	0,01690	0,00027	0,00027
	2	3,45	13,6	0,93	0,01690	0,00027	
	3	3,45	13,6	0,96	0,01848	0,00029	
DCT 1 JAM	1	3,45	13,6	0,96	0,01848	0,00029	0,00030
	2	3,45	13,6	0,96	0,01848	0,00029	
	3	3,45	13,6	0,98	0,02016	0,00032	
DCT 2 JAM	1	3,45	13,6	0,90	0,01541	0,00024	0,00023
	2	3,45	13,6	0,90	0,01541	0,00024	
	3	3,45	13,6	0,87	0,01401	0,00022	
DCT 3` JAM	1	3,45	13,6	0,90	0,01541	0,00024	0,00023
	2	3,45	13,6	0,87	0,01401	0,00022	
	3	3,45	13,6	0,90	0,01541	0,00024	
DCT 4 JAM	1	3,45	13,6	0,87	0,01401	0,00022	0,00021
	2	3,45	13,6	0,87	0,01401	0,00022	
	3	3,45	13,6	0,84	0,01270	0,00020	
DCT 5 JAM	1	3,45	13,6	0,84	0,01270	0,00020	0,00019
	2	3,45	13,6	0,84	0,01270	0,00020	
	3	3,45	13,6	0,82	0,01147	0,00018	



Gambar 4.8. Diagram Laju Keausan Paduan Fe-Cr-Mn

Untuk menghitung hasil uji keausan dapat digunakan dengan rumus sebagai berikut:

$$W = \frac{B \cdot b^3}{12 \cdot r} \dots \dots \dots (4.3)$$

Dimana:

- W = Volume yang tergores (mm³)
- B = Tebal goresan (mm)
- b = Lebar goresan (mm)
- r = Jari-jari disc (mm)

$$W_s = \frac{1,5 \cdot W}{P \cdot I} \dots \dots \dots (4.4)$$

Dimana:

- Ws = Nilai Keausan Spesifik (mm³/kg.m)
- W = Volume yang tergores (mm³)
- P = Beban (kg)
- I = Jarak pengausan (m)

Contoh perhitungan hasil uji keausan pada pada spesimen DCT 2 jam

$$W = \frac{B \cdot b^3}{12 \cdot r} = \frac{3,45 \times 0,90^3}{12 \times 13,6} = 0,01541 \text{ mm}^3$$

$$W_s = \frac{1,5 \cdot W}{P.l} = \frac{1,5 \times 0,01541 \text{ mm}^3}{6,36 \times 15} = 0,00023 \text{ mm}^3/\text{kg.m}$$

Berdasarkan hasil uji keausan pada spesimen proses *raw material* didapat angka sebesar 0,00027 mm³/kg.m kemudian pada spesimen proses DCT 1 jam diperoleh angka sebesar 0,00030 mm³/kg.m dimana disini mengalami peningkatan laju keausan sebesar 0,00003 mm³/kg.m. Pada spesimen dengan proses DCT 2 jam diperoleh angka sebesar 0,00023 mm³/kg.m, spesimen mengalami penurunan laju keausan sebesar 0,00007 mm³/kg.m, pada spesimen dengan proses DCT 3 jam diperoleh angka sebesar 0,00023 mm³/kg.m, angka keausan sama dengan spesimen proses DCT 2 jam, pada proses DCT 4 jam diperoleh angka sebesar 0,00021 mm³/kg.m, spesimen mengalami penurunan laju keausan sebesar 0,00002 mm³/kg.m, pada proses DCT 5 jam diperoleh angka sebesar 0,00019 mm³/kg.m, spesimen mengalami penurunan laju keausan sebesar 0,00002 mm³/kg.m

Pada tabel 4.3 hasil pengujian keausan angka paling kecil menunjukkan spesimen paling tahan aus, spesimen paling tahan aus adalah spesimen proses DCT 5 jam dengan tingkat keausan rata-rata sebesar 0,00019 mm³/kg.m dan spesimen dengan ketahanan aus paling rendah adalah spesimen proses DCT dengan perendaman selama 1 jam dengan tingkat keausan rata-rata sebesar 0,00030 mm³/kg.m. Berdasarkan data yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa kekerasan berbanding dengan tingkat keausan, semakin keras spesimen maka laju keausanya semakin kecil dan semakin lama proses *deep cryogenic treatment* spesimen semakin tinggi angka kekerasannya dan semakin kecil angka keausanya

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa paduan Fe-Cr-Mn mengandung unsur utama besi (Fe) sebesar 71,18 %, unsur paduan kromium (Cr) sebesar 14,37 %, Mangan (Mn) 8,83 %. Jumlah unsur paduan utamanya sebesar 23,20 % sehingga paduan Fe-Cr-Mn termasuk baja paduan tinggi.
2. Foto struktur mikro menunjukkan bahwa paduan Fe-Cr-Mn memiliki struktur *austenit* dan ferit sehingga termasuk kategori *duplex stainless steel*. Proses *Deep Cryogenic Treatment* menyebabkan terjadinya homogenisasi dan perubahan besar butir struktur austenit dan ferit. Semakin lama waktu perendaman *Deep Cryogenic Treatment* maka besar butir struktur austenit mengalami pertumbuhan menjadi semakin besar.
3. Hasil uji kekerasan paduan Fe-Cr-Mn dengan metode *Vickers* menunjukkan bahwa nilai kekerasan tertinggi paduan Fe-Cr-Mn pada spesimen proses *Deep Cryogenic Treatment* dengan waktu perendaman 5 jam sebesar 465,18 kg/mm². Semakin lama waktu perendaman maka kekerasan meningkat.
4. Hasil Uji keausan dengan metode *Ogoshi* menunjukkan paduan Fe-Cr-Mn memiliki nilai keausan tertinggi pada spesimen *Deep Cryogenic Treatment* 5 jam yaitu 0,00019 mm³/kg.m. sedangkan nilai terendah pada spesimen proses *Deep Cryogenic Treatment* dengan waktu perendaman selama 1 jam yaitu 0,00030 mm³/kg.m.

5.2 Saran

Pada penelitian yang akan datang terhadap paduan Fe-Cr-Mn disarankan melakukan pengujian *Deep Cryogenic Treatment* dengan durasi perendaman yang lebih lama.

DAFTAR PUSTAKA

- Amanto, H., Daryanto, 2003, Ilmu Bahan, Cetakan Kedua, PT. Bumi Aksara, Jakarta
- ASM Handbook., 1990. *Alloy Phase Diagram*. ASM International Handbook Committee. Vol.3.
- ASM Handbook, 1993. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. ASM Handbook Committee, Vol.148 United State.
- Baldissera, P., and Delprete, C., 2008, *Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review*, *The Open Mechanical Engineering Journal*, vol 1-2, Hal. 1-11.
- Chakradhar, D., Abhilash, P.M., 2019, *Surface integrity comparison of wire electric discharge machined Inconel 718 surfaces at different machining stabilities*, *Procedia CIRP*, Issue 87, hal. 228-233.
- Callister, Jr.W.D., 2010, *Materials Science and Engineering an Introduction*. John Wiley & Sons, New York
- Chiou, 2004. The analysis of the microstructure changes of a Fe– Mn–Al alloy under dynamic impact tests. *Materials Science and Engineering A* 386: 460–467.
- Husein. 2012, *Effects of Cryogenic Treatment* on the properties of low carbon A858 *Journal of Engineering* 18 (7).
- Kartikasari, R., Soekrisno., 2012, Rekayasa Paduan Fe-Al-Mn-C Sebagai Pengganti Baja Tahan Karat Konvensional Ss 304.
- Liu, 2007. Effects of deep cryogenic treatment on property pf 3cr13Mo1V1.5 high chromium cast iron. *Elsevier Science*, 28 vol.3, hal: 1059-1064.
- Nadig, D.S.,2017, *Effects of cryogenic treatment on the Strength Properties of Heat Resistant Stainless Steel (07X16H6)*, *IOP Conference Series, Materials Science and Engineering*, Vol : 229.
- Putra, D., 2018, Pengaruh proses *heat treatment* terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan korosi baja mangan, Teknik Mesin STTNas, Yogyakarta
- Robinowicz, E., 1995, *Friction and wear of material*. John Willey & Sons, Inc Singapore.

- Smallman, 1991. *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta
- Sendriks, A. J., 1979, *Corrosion of Stainless Steels*. John Willey and Sons Inc., New York.
- Suprpto, 2016. Impact evaluation of cryogenic treatment to wear characteristics of ADI cutting tool. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(12) : 7691-7697.
- Surdia,1999, *Pengetahuan Bahan Teknik*, PT. Pradnya Paramita, Cetakan Keempat, Jakarata
- Taylor, R., 2009, *Cryogenic Institute of New England, Inc.*
- Varghese, Vinay, M.R., Ramesh, and Chakradhar., 2019, "Influence of *deep cryogenic treatment on performance of cemented carbide (WC -Co) inserts during dry end milling of maraging steel.*" *Journal of Manufacturing Processes* 37 (April 2018): 242 –50.
- Vlack, V.. 1992, "Ilmu dan Teknologi Bahan. PT. Gelora Aksara Prayama. Jakarta.
- Yifeng, Y., Zhou, Y., 2018, *Effects of deep cryogenic treatment on wear resistance and structure of GB 35CrMoV steel*, *Metals, Issue8*, hal. 502.

LAMPIRAN

No.Order : 484/20-S1179

Metode : Fe130

Pelanggan : Saiful Anwar

Waktu : 2020-10-09 11:09:42

Unit: [%]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Ø	0.120	0.455	8.838	0.051	0.018	14.37	0.087
σ	0.0092	0.029	0.076	0.0047	0.0014	0.301	0.0094
v	7.64	6.30	0.86	9.25	7.82	2.10	10.82
1	0.131	0.487	8.897	0.050	0.019	14.65	0.080
2	0.118	0.431	8.865	0.046	0.018	14.40	0.083
3	0.113	0.448	8.752	0.056	0.017	14.05	0.098
	Ni	Cu	Al	Co	Nb	Ti	V
Ø	0.581	1.065	0.052	0.089	0.037	0.012	0.050
σ	0.031	0.029	0.043	0.0045	0.0074	0.0009	0.0013
v	5.39	2.70	81.93	5.05	19.98	7.62	2.68
1	0.616	1.096	0.101	0.084	0.031	0.011	0.050
2	0.567	1.059	0.035	0.089	0.036	0.011	0.049
3	0.558	1.039	0.021	0.093	0.045	0.013	0.052
	Fe						
Ø	74.18						
σ	0.474						
v	0.64						
1	73.70						
2	74.19						
3	74.64						





LABORATORIUM BAHAN TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS GADJAH MADA

PENGUJIAN KEKERASAN VICKERS

Variasi	Titik Uji	D1 (mm)	D2 (mm)	D rata-rata (mm)	Kekerasan (VHN)	Kekerasan rata rata (VHN)
Raw_1	1	0,41	0,43	0,42	315,31	320,40
	2	0,41	0,42	0,42	322,95	
	3	0,41	0,42	0,42	322,95	
Raw_2	1	0,40	0,40	0,40	347,63	350,58
	2	0,39	0,40	0,40	356,48	
	3	0,40	0,40	0,40	347,63	
DCT_1jam_1	1	0,43	0,43	0,43	300,81	308,02
	2	0,43	0,42	0,43	307,93	
	3	0,42	0,42	0,42	315,31	
DCT_1jam_2	1	0,44	0,44	0,44	287,29	298,68
	2	0,43	0,42	0,43	307,93	
	3	0,43	0,43	0,43	300,81	
DCT_2jam_1	1	0,40	0,40	0,40	347,63	359,66
	2	0,39	0,39	0,39	365,68	
	3	0,39	0,39	0,39	365,68	
DCT_2jam_2	1	0,39	0,39	0,39	365,68	372,05
	2	0,38	0,39	0,39	375,24	
	3	0,38	0,39	0,39	375,24	
DCT_3jam_1	1	0,40	0,41	0,41	339,09	336,56
	2	0,41	0,42	0,42	322,95	
	3	0,39	0,41	0,40	347,63	

Lembar asli, tidak untuk digandakan

Keterangan:

1. Pengujian dilakukan tanggal 5 Desember 2020
2. Menggunakan metode Vickers dengan beban 30 kgf





INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL YOGYAKARTA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN S1
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S1

Jl. Babarsari, Caturtunggal, Depok, Sleman, Yogyakarta 55281 Telp. (0274) 485390, 486986, 487540 Fax. (0274) 487249
Email : info@itny.ac.id, Website : www.itny.ac.id

LEMBAR REVISI

Nama : Saiful Anwar
No. Mahasiswa : 210013025
Hari, tanggal : Selasa, 09 Februari 2021
Judul Skripsi : Pengaruh Waktu Proses Deep Cryogenic Treatment Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan Dan Keausan Paduan Fe-Ce-Mn
Pembimbing : 1. Dr. Ratna Kartikasari, ST., MT.
2. Anita Susiana, ST., M.Eng.

NO	REVISI	CEK
1.	Data uji keausan diperbaiki, pembahasan diperbaiki, kesimpulan diperbaiki. abstrak.	
2.	Ditambahkan daftar lambang & singkatan.	
3.	format abstrak	
4.	Pustaka di cek ulang	

Penguji :

1. ACC 15/2/21

2. 15/02/2021
ACC AS

3. ACC 15/2/2021