

SKRIPSI

PENGARUH WAKTU PERENDAMAN PROSES *DEEP CRYOGENIC TREATMENT* TERHADAP STRUKTUR MIKRO, KEKERASAN DAN UJI TARIK PADUAN Fe-5Al-21Mn



Diajukan oleh:

Geniocito Ximenes Maia

210016130

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

2021

HALAMAN PERSETUJUAN

PENGARUH WAKTU PERENDAMAN PROSES *DEEP CRYOGENIC TREATMENT* TERHADAP STRUKTUR MIKRO, KEKERASAN DAN KEKUATAN TARIK PADUAN Fe-5Al-21Mn

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Program Studi Teknik Mesin S1

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

2021

Disusun oleh :

Nama Mahasiswa : Geniocito Ximenes Maia

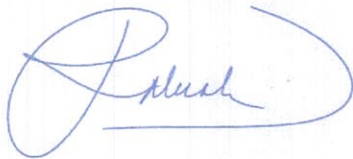
Nomor Mahasiswa : 210016130

Program Studi : Teknik Mesin S1

Telah diperiksa dan disetujui,

Yogyakarta, 6 Februari 2021

Dosen Pembimbing I



Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T
NIK: 19730079

Dosen Pembimbing II



Anita Susiana ST., M. Eng
NIK: 19730340

Menyetujui,

Ka. Prodi Teknik Mesin,



Ir. Wartono, M.Eng.
NIP. 196211151994031001



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

SOAL TUGAS AKHIR

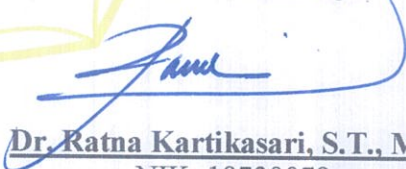
No: 24/ITNY/Prodi.TM-S1/TGA/VIII/2020

Nama Mahasiswa : Geniocito Ximenes Maia
Nomor Mahasiswa : 210016130
Soal : Pengaruh waktu perendaman proses *Deep Cryogenic Treatment* terhadap struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik paduan Fe-5Al-21,28Mn.



Yogyakarta, 24 Agustus 2020

Dosen Pembimbing I


Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T.
NIK: 19730079

HALAMAN PENGESAHAN

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

Hari : Rabu
Tanggal : 10 Februari 2021
Pukul : 11.00 s.d selesai
Tempat : Ruang D Lantai 2, ITNY Babarsari Caturtunggal Depok Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

Disahkan Oleh :

Ketua Tim Penguji
1. Dr. Ratna Kartikasari, S.T.,M.T.,

Anggota Penguji
2. Anita Susiana S.T.,M.T.,

Anggota Penguji
3. Mustakim S.T.,M.T.,

Tanda Tangan



Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknologi Industri



Dr. Daru Sugati, S.T., M.T.
NIK : 19730125

Menyetujui,

Ketua Prodi Teknik Mesin S1



Ir. Wartono, M.Eng.
NIP : 196211131994031001

HALAMAN PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini adalah asli hasil karya saya dan tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi manapun dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau dipublikasikan oleh orang lain, kecuali yang tertulis sebagai bahan acuan dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka skripsi ini.

Yogyakarta, 06 Februari 2021



Geniocito Ximenes Maia
210016130

PERSEMBAHAN

Puji syukur saya ucapkan kehadiran Tuhan maha esa, dialah puncak segala ketaatan. Akhirnya, teriring penghargaan, terima kasih, cinta dan ketulusan saya persembahkan skripsi ini untuk :

1. Tuhan Yesus Kristus yang telah memberkati saya dengan rahmat dan hidayah-Nya kepada saya.
2. Orang tuaku tersayang Bapak Albino Maia Barreto dan Ibu Julieta Mascarenhas Ximenes. Thelchia Ajuria Ximenes Maia sebagai kakak yang tak pernah bosan untuk selalu mengingatkanku dalam kebaikan dan telah memberikan motivasi untuk tetap berjuang. Terima kasih atas do'a, cinta dan kasih sayang yang tak pernah henti. Semoga Allah mengampuni dan menyayangi ketiganya seperti mereka menyayangiku.
3. 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.
4. Adik-adikku (Anodito Ximenes Maia dan Tachia Sipriana Ximenes Maia), keluarga besar Maia, keluarga besar Ximenes, keluarga besar Panti dan Rumah Hijau yang telah dengan tulus hati memotivasi serta mendukung dalam menyelesaikan Skripsi ini. Semoga sehat selalu dan diberkahi rezeki.
5. Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin, dan HIMER-Y yang telah mengenalkan dan mengajarkan cara berorganisasi serta lika-liku perjuangan mahasiswa.
6. Sahabatku, Yohanes, Pebri, Nevio, Jilia, Jonel, Yaumil, Randhika, Febrian, Fajri, Hans, Naldi, Setiawan, dll. Terima kasih untuk kekeluargaan dan petualangan yang indah.
7. Teman dalam mengerjakan Tugas Akhir bersama dalam suka maupun duka Yohanes, Nafat, Fajar, Bagus.
8. Teman-teman keluarga besar Teknik Mesin angkatan 2016 dan semua angkatan. Terima kasih atas persahabatan yang indah dan semoga persaudaraan kita akan tetap terjalin meski jarak memisahkan.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yesus Kristus, karena anugerah-Nya penulis telah menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh waktu perendaman proses *Deep Cryogenic Treatment* terhadap struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik paduan Fe-5Al-21Mn”.

Penulisan skripsi ini untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar S1 Teknik, 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. Bapak Dr.Ir. H. Ircham, M.T., selaku Rektor Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.
2. Bapak Dr. Daru Sugati, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Industri Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.
3. Bapak Ir. Wartono, M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin S1, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.
4. Ibu Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T., selaku Dosen pembimbing I.
5. Ibu Anita Susiana, S.T., M. Eng., selaku Dosen pembimbing II.
6. Dan 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 tambahan referensi bagi rekan-rekan mahasiswa Teknik Mesin ITNY dan bagi yang memerlukan pada umumnya.

Yogyakarta, 6 Februari 2021

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Geniocito Ximenes Maia', written in a cursive style.

Geniocito Ximenes Maia
210016130

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
HALAMAN SOAL	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
ABSTRAK	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II LANDASAN TEORI.....	4
2.1. Tinjauan Pustaka	4
2.2. Dasar Teori.....	6
2.2.1. Baja	6
2.2.2. Karbon (C)	6
2.2.3. Mangan (Al).....	7
2.2.4. Aluminium (Al)	7
2.3. Sistem paduan Fe-Al	8
2.4. Sistem Paduan Fe-Mn	9
2.5. <i>Deep Cryogenic Treatment (DCT)</i>	10
2.6. Pengujian Bahan.....	12
2.6.1. Pengujian Komposisi Kimia.....	12
2.6.2. Pengujian Struktur Mikro.....	13

2.6.3. Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i>	14
2.6.4. Pengujian Tarik (UTM).....	18
2.7. Hipotesis.....	22
BAB III METODE PENELITIAN	20
3.1. Diagram Alir Penelitian	23
3.2. Bahan dan Alat Penelitian.....	23
3.2.1. Bahan Penelitian.....	23
3.2.2. Alat Penelitian.....	23
3.2.3. Persiapan Spesimen	24
3.2.4. Pengujian Komposisi Kimia	24
3.2.5. Proses <i>Deep Cryogenic Treatment</i>	26
3.3. Pengujian Bahan	27
3.3.1. Pengujian Struktur Mikro.....	27
3.3.2. Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i>	31
3.4. Pengujian Kekuatan Tarik (UTM)	31
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	32
4.1. Analisis Hasil Pengujian Komposisi Kimia.....	33
4.2. Analisis Hasil Pengujian Struktur Mikro.....	36
4.3. Analisis Hasil Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i>	39
4.4. Analisis Hasil Pengujian Kekuatan Tarik (UTM)	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1. Kesimpulan	44
5.2. Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA	x
LAMPIRAN	xii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Diagram Fasa Fe-Mn	8
Gambar 2.2. Diagram Fasa Fe-Al.....	9
Gambar 2.3. Diagram <i>Deep Cryogenic Treatment</i> (DCT).....	10
Gambar 2.4. Diagram sistem proses <i>Cryogenic Treatment</i>	12
Gambar 2.5. Sistem skema mikroskop	14
Gambar 2.6. Perumusan pengujian kekerasan <i>Brinell</i>	15
Gambar 2.7. Perumusan pengujian <i>Vickers</i>	16
Gambar 2.8. Pengujian kekerasan <i>Rockwell</i>	17
Gambar 2.9. Pengujian kekerasan <i>Knoop hardness</i>	18
Gambar 2.10. Diagram garis lengkung tegangan tarik.....	19
Gambar 2.11. Diagram tegangan-regangan.....	20
Gambar 2.12. Spesimen uji tarik ASTM E8M	21
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian	22
Gambar 3.2. Baja paduan Fe-5Al-21Mn	24
Gambar 3.3. Alat uji komposisi kimia Spectrometer PT Itokoh Ceperindo.....	25
Gambar 3.4. Tabung Nitrogen Cair.....	27
Gambar 3.5. Mesin Amplas.....	27
Gambar 3.6. Alat uji struktur mikro (mikroskop optik)	30
Gambar 3.7. Alat uji kekerasan <i>Vickers</i>	31
Gambar 3.8. Spesimen uji Tarik (ASTM E8M).....	32
Gambar 3.9. Gambar alat uji tarik (UTM).....	33
Gambar 4.1. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn <i>raw material</i>	35
Gambar 4.2. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn proses DCT 1 jam.....	37
Gambar 4.3. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn proses DCT 2 jam.....	38
Gambar 4.4. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn proses DCT 3 jam.....	38
Gambar 4.5. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn proses DCT 4 jam.....	39
Gambar 4.6. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn proses DCT 5 jam.....	39
Gambar 4.7. Diagram kekerasan rata-rata paduan Fe-5Al-21mn.....	42
Gambar 4.8. Diagram hasil uji tarik paduan Fe-5Al-21Mn	45

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Hasil pengujian komposisi kimia paduan Fe-5Al-21Mn	35
Tabel 4.2. Hasil pengujian kekerasan <i>Vickers</i> paduan Fe 79,23% - Al 3,38% - Mn 10,60%	41
Tabel 4.3. Hasil pengujian kekuatan tarik (UTM) paduan Fe 69,34% -Al 5,03%- Mn 21,28%.....	45

ABSTRAK

Paduan Fe-5Al-21Mn merupakan paduan baja tahan karat baru yang disebut sebagai kandidat yang dapat menggantikan baja tahan karat konvensional (paduan Fe-Cr-Ni). Aluminium (Al) dan Mangan (Mn) berperan menggantikan unsur kromium (Cr) dan nikel (Ni) yang harganya relatif mahal.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh waktu perendaman *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) terhadap struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan tarik paduan Fe-5Al-21Mn. Tahapan penelitian dimulai dari persiapan spesimen yaitu memotong paduan Fe-5Al-21Mn untuk uji komposisi, uji struktur mikro, uji kekerasan *vickers* dan kekuatan tarik. Proses DCT dilakukan dengan perendaman pada nitrogen cair pada temperature $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ dalam variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam, dilanjutkan pengembalian kembali ke suhu kamar (*warming*). Pengujian yang dilakukan adalah uji struktur mikro, setelah itu dilanjutkan uji mekanis yaitu uji kekerasan dengan metode *vickers* dan kekuatan tarik (UTM), dengan harapan menambah sifat mekanis paduan yaitu kekerasan dan kekuatan tarik Fe-5Al-21Mn.

Hasil pengujian komposisi paduan Fe-5Al-21Mn menunjukkan presentase kandungan Fe 69,34%, Al 5,05%, Mn 21,28%, sehingga dikategorikan baja paduan tinggi. Pengamatan foto struktur mikro menunjukkan terbentuknya dua fasa struktur mikro yaitu austenit dan ferit, sehingga dikategorikan sebagai *duplex stainless steel*. Nilai kekerasan tertinggi sebesar 527,4 Kg/mm² terdapat pada proses perendaman DCT 1 jam dan nilai kekuatan tarik tertinggi terdapat pada proses perendaman DCT 4 jam yaitu sebesar 18,82 Mpa.

Kata kunci: Fe-5Al-21Mn, *deep cryogenic treatment*, struktur mikro, kekerasan *vickers*, kekuatan tarik.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Austenite stainless steel merupakan kelompok *stainless steel* (baja tahan karat) yang paling banyak digunakan dalam dunia industri, meliputi 65 sampai 75% dari penggunaan *stainless steel*, sebagian dari persentase angka tersebut baja tahan karat yang banyak digunakan adalah AISI seri 300 (Kartikasari, R. 2010).

Sebagai unsur utama dalam sistem paduan *conventional stainless steel* Fe-Al-Mn sering digunakan karena keunggulan dari sifat-sifat yang dimilikinya seperti pembentuk atau penstabil struktur ferit dan austenit, dimana sifat-sifat keunggulan dari paduan ditentukan oleh unsur Al dan Mn sebagai unsur utama (Soekrisno, 2010). Selain menarik secara visual, *stainless steel* juga memiliki sifat ketahanan korosi dan oksidasi yang baik. Unsur kromium (Cr) dan Nikel (Ni) terutama Cr merupakan material yang sangat strategis sehingga menyebabkan material ini sangat mahal, dimana 95% cadangan Cr dunia hanya terdapat di Zimbabwe, Afrika selatan (Kartikasari, R. 2011).

Paduan Fe-Al-Mn merupakan material yang menjanjikan untuk menggantikan Fe-Cr-Ni dan beberapa *conventional stainless steel* lainnya pada aplikasi temperatur medium hingga tinggi, dan paduan Fe-Al-Mn juga menunjukkan sifat-sifat fisik, mekanik dan teknologikal, ketahanan korosi dan oksidasi, sehingga biaya bahan baku dan biaya produksi yang relatif murah (Kartikasari, R. 2011).

Unsur Aluminium (Al) dalam baja dapat berfungsi sebagai penstabil struktur ferit. Keberadaannya sangat berlimpah, yaitu merupakan unsur terbesar ketiga di bumi sehingga harga aluminium di dunia industri diketahui relatif murah. Disamping Aluminium (Al) merupakan unsur yang bisa didapatkan dengan harga yang murah dan mudah diproduksi, penambahan unsur Aluminium pada sistem paduan dapat meningkatkan ketahanan oksidasi dan reduksi, juga ketahanan korosi pada baja (Soekrisno, 2010).

Unsur Mangan (Mn) selain memiliki sifat penstabil austenit, juga memperbaiki sifat *hot workability* dan *ductility* dalam sistem paduan (Kartikasari, R. 2011).

Cryogenic adalah proses suatu bahan mengalami perlakuan suhu rendah yang bertujuan untuk meningkatkan ketahanan aus, kekuatan tarik, ketangguhan, kekerasan, dan lain-lain, dengan merubah struktur mikro secara permanen (Thronton, R. W. 2014). Pada dasarnya *cryogenic treatment* di klasifikasikan menjadi dua jenis: *Shallow Cryogenic Treatment (SCT)* dan *Deep Cryogenic Treatment (DCT)*. *Shallow cryogenic treatment* menggunakan suhu 80 °C hingga -149 °C dan *Deep Cryogenic Treatment* menggunakan suhu yang lebih rendah pada -149 °C hingga -196 °C (Kumar, B. 2017).

Proses *Deep Cryogenic Treatment (DCT)* yang dilakukan setelah proses perlakuan panas konvensional dapat meningkatkan ketahanan aus yang lebih baik dari komponen baja lain (Senthilkumar dan Rajendran, 2014). Untuk mendapatkan struktur *Cryogenic Treatment* yang optimal maka terlebih dahulu baja dipanaskan pada suhu terendah austenit (Kumar, B. 2000).

Manfaat dari menambahkan *Deep Cryogenic Treatment (DCT)* pada proses *Heat Treatment Conventional*, berguna untuk meningkatkan kekuatan, stabilitas dimensi atau stabilitas struktur mikro, ketahanan aus yang lebih baik, kekerasan, ketangguhan, umur kelelahan, dan tegangan sisa (Kumar, B., & Rajendran. 2011).

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian proses *Deep Cryogenic Treatment (DCT)* untuk mempelajari struktur mikro dan sifat mekanik pada baja paduan Fe-Al-Mn.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh waktu *Deep Cryogenic Treatment* paduan Fe-Al-Mn terhadap struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan Tarik pada paduan tersebut.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh waktu perendaman *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) terhadap struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik pada paduan Fe-5Al-21Mn.

1.4. Batasan Masalah

Agar tidak terjadi penyimpangan terhadap tujuan penelitian, peneliti perlu membatasi beberapa masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini yaitu:

- a. Baja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja paduan Fe-Al-Mn
- b. Proses *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) dengan Nitrogen cair pada suhu $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - ❖ memasukkan spesimen kedalam nitrogen cair pada suhu $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - ❖ waktu perendaman 1jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam.
- c. Pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi, uji struktur mikro, kekerasan, dan kekuatan tarik.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian adalah:

1. Menambah ilmu pengetahuan dalam bidang material teknik, mengembangkan aplikasi baja pada paduan Fe-Al-Mn untuk penggunaan di dunia industri, khususnya industri perkapalan, peralatan medis, serta pertambangan.
2. Menambah khasanah ilmu pengetahuan pada bidang material teknik.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Zhu dkk (2008) tentang pengaruh *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja paduan Fe-Cr-Mo-Ni-C-Co dengan waktu perendaman 24 jam, dikatakan bahwa kekerasan meningkat sebesar 1-2 (HRC) dan kekuatan tekan mengalami penurunan yang disebabkan oleh tegangan sisa. Zhu, dkk (2008) juga mengungkapkan bahwa martensit yang dihasilkan berbentuk panjang dan halus.

Kartikasari, R., (2009) melakukan penelitian tentang pengaruh temperatur temper terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan Fe-1,26Al-1,05C dengan temperatur temper 250, 300, 350, 400, 450°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur temper maka pembentukan struktur ferit akan semakin tinggi dan laju korosi akan semakin turun. Ia juga mengungkapkan bahwa unsur Al dapat menggantikan unsur Cr karena keduanya memiliki sifat anti korosi dan sifat mempertahankan struktur ferit.

Huang dkk, (2003) melaporkan dalam artikelnya tentang pengaruh *Cryogenic Treatment* terhadap struktur mikro dengan lama perendaman 24 jam pada baja jenis Fe₄M₂ dengan komposisi kimia 1% C, 6% W, 5% Mo, 4% Cr, 2% V, bahwa terjadi pembentukan pengendapan Fe₄M₂ (M = W, Mo, Cr, V) dan karbon(C) yang membentuk struktur *Face Centered Cubic* (FCC), selama proses *Cryogenic Treatment* struktur austenit berubah menjadi martensit sehingga dapat meningkatkan ketahanan aus. Huang, dkk (2003) juga mengungkapkan bahwa tidak hanya meningkatkan jumlah serta volume karbida dan membentuk pengendapan karbida tetapi proses *Cryogenic Treatment* juga dapat membuat pengendapan karbida lebih halus dan homogen.

Jaswin (2010) melakukan penelitian tentang pengaruh *Shallow Cryogenic Treatment* (SCT) dan *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) terhadap peningkatan ketahanan aus pada baja katup En 52 dan 21-4N menggunakan *reciprocatory friction* dan *wear monitor*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan ketahanan aus sebesar 81,15% dan 13,49% pada metode *Shallow*

Cryogenic Treatment (SCT), dan peningkatan ketahanan aus sebesar 86,54% dan 22,08% pada metode *Deep Cryogenic Treatment* (DCT).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Kumar dkk, (2014) tentang *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) terhadap baja paduan dilaporkan bahwa proses lengkap *Cryo-Heat-Treatment* harus diawali dengan proses *austenitizing*, pendinginan (*quenching*), dan *tempering*; semua proses sebaiknya dilakukan satu per satu secara berurutan (dalam satu siklus). Sebelum proses *Deep Cryogenic Treatment* (DCT), dimana pada saat suhu austenisasi, proses mempunyai peran penting untuk meningkatkan sifat-sifat pada baja, seperti ketahanan aus, kekerasan, ketangguhan dan kekuatan tarik pada baja. Setelah proses DCT, setiap material akan dinilai secara terpisah untuk memilih suhu optimal (*optimum austenitizing temperature*) dan harus sesuai dengan sifat yang diinginkan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Kartikasari (2013), tentang pengaruh temperatur anil terhadap ketangguhan dan ketahanan korosi paduan baja ringan Fe-Al-Mn-Si pada temperatur 850,900,950,1000,1050 °C, yang ditahan selama 60 menit dan diikuti dengan pendinginan didalam dapur, dikatakan bahwa paduan Fe-Al-Mn-Si mengalami peningkatan ketangguhan sebesar 9% dengan pemanasan pada temperatur 850 °C dengan *holding time* selama 60 menit dan tinggi temperatur hingga mencapai nilai tertinggi pada pemanasan 1050 °C. Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur anil maka semakin tinggi nilai ketangguhan pada paduan Fe-Al-Mn-Si, juga terjadi transisi dari getas ke ulet pada penampang spesimen, dan pada suhu 1050 °C menunjukkan spesimen anil paling ulet. Ratna Kartikasari juga menyimpulkan bahwa peningkatan temperatur anil dari 850-1050 °C menstabilkan fasa *austenite*, meningkatkan ketangguhan dan ketahanan korosi paduan Fe-Al-Mn-Si, dan proses anil yang paling terbaik untuk ketangguhan dan ketahanan korosi yaitu pada temperatur 1050 °C yang menunjukkan penurunan laju korosi drastis yaitu sebesar 33,33%.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Baja

Menurut Amstead (1989), baja merupakan paduan yang terdiri dari besi, karbon, dan unsur lainnya. Baja dapat dibentuk melalui pengecoran, pencairan, atau penempaan. Mangan merupakan salah satu unsur penting karena dapat

meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja. Baja merupakan logam yang paling banyak digunakan dalam bentuk plat, lembaran, pipa, batang, dan profil.

Baja mengandung unsur campuran lain yang disebut paduan, seperti: Karbon (C), Sulfur (S), Posfor (P), Silikon (Si), Mangan (Mn), dan Kromium (Cr) yang jumlahnya dibatasi berdasarkan kegunaannya atau kepentingan fabrikasi, dan disesuaikan berdasarkan standar (ASTM) *American Society for Testing and Material* (Amanto, 1999).

Menurut Amstead (1993), secara garis besar baja dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Baja karbon

Baja karbon ini digolongkan menjadi 3 bagian yaitu:

- a. Baja karbon rendah ($<0,30\%C$)
- b. Baja karbon sedang ($0,30\%<C<0,70\%$)
- c. Baja karbon tinggi ($0,70\%<C<1,40\%$)

2. Baja paduan

Baja paduan ini digolongkan menjadi 3 bagian yaitu:

- a. Baja paduan rendah ($< 2,5\% Wt$)
- b. Baja paduan menengah ($2,5 > 9\% Wt$)
- c. Baja paduan tinggi ($> 10\% Wt$).

2.2.2. Karbon

Karbon merupakan salah satu unsur terpenting yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan baja. Kandungan karbon didalam baja sekitar 0,1 – 0,7%, sedangkan unsur lainnya dibatasi kandungannya sesuai dengan kegunaan baja. Paduan yang bercampur didalam baja adalah untuk membuat baja bereaksi terhadap pengerjaan panas dan menghasilkan sifat-sifat khusus. Pada temperatur dibawah 912 °C terdapat daerah temperatur fasa ferit dimana baja mempunyai struktur *Body Centered Cubic(BCC)*. Diatas temperatur 912 °C terdapat daerah temperatur fasa austenit dimana baja mempunyai struktur *Face Centered Cubic (FCC)*. Pada *Face Centered Cubic (FCC)* terdapat terdapat ruang sisipan atau porositas yang lebih besar pada pusat sel satuan. Karbon sebagai atom yang sangat kecil dapat menduduki porositas tersebut dan membentuk besi karbon yaitu Fe-C (Nasution, A. 2008).

2.1.1. Mangan

Menurut Amstead (1989), mangan merupakan unsur deoksida, pemurni sekaligus meningkatkan fluiditas, kekuatan, dan kekerasan baja. Bila kadar ditingkatkan, kemungkinan terbentuknya ikatan kompleks meningkat dan kekerasan baja akan naik. Baja dengan kandungan mangan (Mn) lebih tinggi akan sangat sensitif terhadap perlakuan panas serta memiliki butiran yang kasar.

Baja karbon dapat mengandung unsur Mn sampai dengan 0,8%, yang sengaja ditambahkan ke dalam cairan untuk tujuan deoksidasi dan khususnya sebagai pengikat unsur belerang (S). Pada temperatur kamar besi α mampu melarutkan unsur Mn sampai dengan 10%, dengan demikian kandungan mangan yang kecil tidak akan sangat sensitif terhadap perlakuan panas serta memiliki butiran yang kasar. Suatu karakter khas dari baja paduan mangan tinggi adalah strukturnya yang berserat. Mangan juga terdapat dalam setiap baja tapi kandungannya kecil, namun baru dapat dikatakan unsur paduan jika kadarnya lebih dari 0,6%, namun apabila kadar mangan kurang dari itu maka tidak akan mempengaruhi sifat baja. Mangan juga sebagai elemen penstabil austenit terutama pada temperatur rendah karena dapat mencegah transformasi martensit, atau dengan kata lain akan menambah keuletan baja (Binudi, 2014).

2.2.3. Aluminium

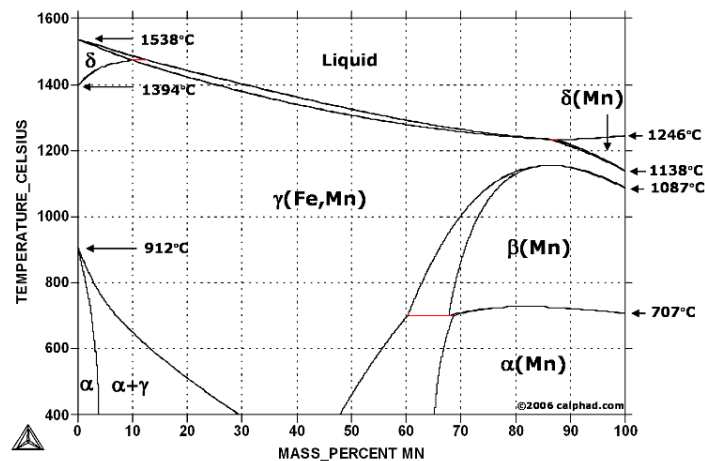
Unsur aluminium (Al) tidak hanya mempunyai nilai produksi yang relatif murah karena kelimpahan unsur ini merupakan yang ketiga terbanyak di bumi, seperti yang diketahui penambahan Al dalam sistem paduan baja dapat berfungsi sebagai penstabil struktur ferit dan menambahkan ketahanan terhadap oksidasi dan reduksi pada baja. Penambahan unsur Al pada baja dapat menurunkan densitas hingga 10-25% dengan penambahan Al lebih dari 10% (Kartikasari, R, 2013).

2.3. Sistem Paduan Fe-Mn

Pada baja mangan austenitik, unsur paduan utama pada besi yang paling dominan adalah mangan (Mn) yang berfungsi untuk menstabilkan fasa austenit dan membantu mempertahankan struktur austenit pada suhu normal (Chastain, 2004).

Menurut Avner (1982), mangan berkontribusi terhadap kenaikan kekuatan dan kekerasan, tetapi pengaruhnya masih lebih rendah dibandingkan dengan penambahan karbon, dan akan menjadi sangat efektif jika mangan ditambahkan kedalam baja karbon tinggi. Elemen ini adalah pembentuk karbida yang lemah dan memiliki efek yang cukup besar dalam pengerasan paduan. Kelarutan Mn dalam γ -Fe adalah tak terbatas, hal ini memungkinkan Mn dapat ditambahkan dalam jumlah yang cukup besar untuk paduan Fe-Mn.

Menurut Chanstain, (2004), sifat mekanis baja mangan dapat sangat meningkat dengan memperhalus ukuran butiran. Kekuatan dan daktilitas dapat meningkat sebanyak lebih dari 30% dengan menggunakan perlakuan suhu rendah.



Gambar 2.1. Diagram kesetimbangan Fe-Mn (Honeycombe, 1995).

Menurut Fontana (1987), mangan (Mn) dapat berfungsi sebagai penstabil struktur austenit terutama pada suhu rendah dan memperluas daerah austenit.

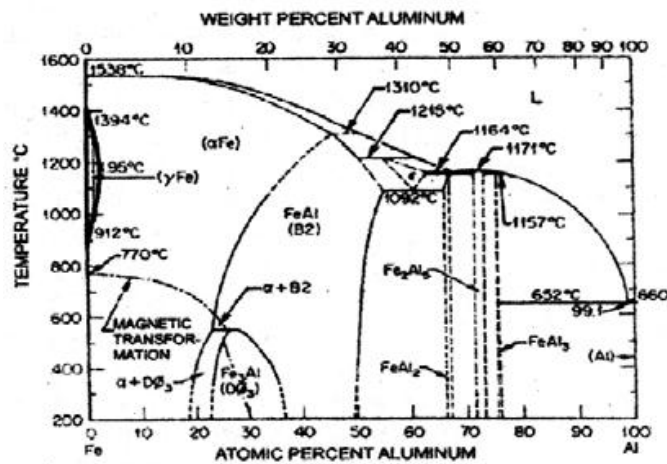
Nasution, A. (2008) mengatakan bahwa pada temperatur 1200°C dengan kandungan mangan (Mn) diatas 12% akan terjadi fasa austenit dengan struktur kristal *Face Centered Cubic (FCC)*, sedangkan pada temperatur 769°C sampai titik kritis yang akan terjadi adalah fasa austenit (γ) lebih dominan daripada fasa ferit (α), jika temperatur 400°C maka fasa ferit akan jauh lebih dominan daripada fasa austenit dan akan membentuk struktur kristal *Body Centered Cubic (BCC)*.

2.4. Sistem Paduan Fe-Al

Menurut Avner (1988), unsur paduan yang memiliki unsur perilaku seperti kromium (Cr) dalam sistem paduan biner adalah aluminium (Al) seperti pada

diagram kesetimbangan Fe-Al (Gambar 2.2). Dari daftar periodik unsur-unsur, juga dapat diketahui bahwa Al (aluminium) mempunyai *gamma loop* (loop g) seperti Cr.

Menurut Avner (1987), kelarutan Al dalam Fe sangat kecil dibandingkan dengan Cr. Hal ini berarti aluminium (Al) hanya dapat ditambahkan dalam jumlah yang sangat terbatas.



Gambar 2.2. Diagram kesetimbangan Fe-Al (Chao, 2002).

Menurut Fontana (1988), aluminium (Al) adalah logam reaktif yang dapat membentuk lapisan pelindung yang mempunyai sifat yang sangat stabil dalam lingkungan netral dan asam, yaitu lapisan pelindung aluminium-oksida. Tetapi lapisan ini rentang dalam lingkungan Alkali.

Paduan Al (*Al alloy*) secara luas telah digunakan di berbagai industri, tetapi dalam *stainless steel conventional*, aluminium hanya ditambahkan dalam jumlah yang kecil. Sistem paduan Fe-Al bersifat feritik pada semua temperatur (setara dengan (Fe-Cr *stainless steel*)).

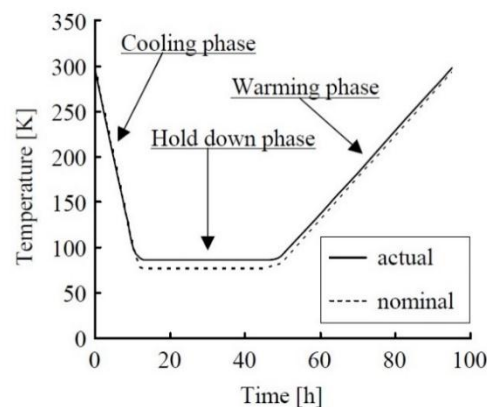
2.5. Deep Cryogenic Treatment

Deep Cryogenic Treatment merupakan proses perlakuan dingin dengan suhu -196°C untuk meningkatkan sifat mekanik logam dengan menggunakan nitrogen cair. Banyak material baja karbon atau baja paduan menjadi getas pada temperatur rendah yang memungkinkan terjadinya kegagalan atau retak pada

material secara tiba-tiba, maka dari itu diperlukan konstruksi material khusus dalam penggunaannya (Sabarudin, S., 2017).

Menurut Rante, B., (2018), proses *deep cryogenic treatment* dimulai dengan pendinginan pada temperatur -196°C kemudian ditahan beberapa waktu dan diakhiri pada temperatur kamar.

Menurut Kumar dan Rajendran, (2014) keuntungan *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) untuk baja adalah meningkatkan kekuatan, struktur mikro yang stabil, meningkatkan ketahanan aus, kekerasan, ketangguhan, umur kelelahan, dan mengurangi *residual stress*.



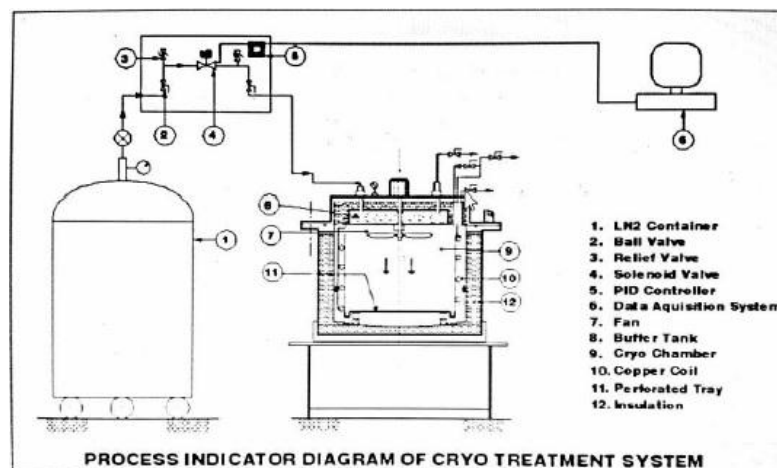
Gambar 2.3. *Deep Cryogenic Treatment temperature profile* (Baldissera, 2008).

Menurut Baldissera dan Delprete (2008), dalam beberapa kasus proses *Deep Cryogenic Treatment* (DCT), temperatur sesungguhnya bisa lebih tinggi daripada temperatur nominal, hal ini disebabkan karena penahan termal yang sudah tidak lagi bagus dan juga akibat dari penuaan *chamber seals*. Baldissera dan Delprete juga mengatakan, ada beberapa parameter dalam *Deep Cryogenic Treatment* (DCT), yaitu: temperatur perendaman, waktu perendaman, laju pendinginan, suhu temper, periode temper. Dari parameter tersebut menunjukkan bahwa parameter yang mempengaruhi secara signifikan untuk meningkatkan sifat mekanik baja memiliki urutan sebagai berikut:

1. Temperatur perendaman (72%)
2. Waktu perendaman (24%)
3. Laju pendinginan (10%)
4. Temperatur temper (2%)

Menurut Taylor (2009), terdapat 3 perubahan yang terjadi pada proses *cryogenic*, yaitu:

1. *Residual Stress Relief* (menghilangkan tegangan sisa), proses *cryogenic* dapat menghilangkan tegangan sisa akibat proses *machining* yang dilakukan sebelumnya terhadap baja. Pada proses *heat treatment* sebagian besar *residual stress* pada baja akan dihilangkan akan tetapi menyisakan sekitar 10% *residual stress* yang tersisa, maka proses *cryogenic* akan membantu menghilangkan *residual stress* yang tersisa.
2. *Uniformity of the crystalline or micrograin structure of the metal* (penyamaan bentuk kristal atau struktur mikro pada logam), ketika baja dipanaskan pada suhu austenit maka akan terbentuk struktur mikro austenit, struktur ini memiliki karakteristik yang relatif lunak. Proses *cryogenic* membuat struktur austenit berubah menjadi martensit yang memiliki karakteristik lebih tahan aus namun lebih mudah pecah atau getas. Martensit memiliki bentuk kristal yang lebih halus, dan merata daripada austenit. Perlakuan *cryogenic* akan merubah struktur menjadi martensit hingga menyisakan hanya 1% austenit, ini akan membuat logam lebih kuat dan tahan aus.
3. *Precipitation of eta carbides* (pembentukan eta karbida), pada logam yang mengalami proses *cryogenic* dijumpai pembentukan *eta carbides* yang memiliki bentuk halus serta dapat meningkatkan ketahanan aus dibanding karbida biasa.



Gambar 2.4. Diagram sistem proses *cryogenic treatment* (Nadig, 2014).

Menurut Baldisera (2008), unit *cryogenic treatment* dirancang untuk berbagai tingkat pendinginan. Untuk mempertahankan laju pendinginan, sistem *cryogenic treatment* menggabungkan ruang *cryogenic treatment* dan sistem suplai nitrogen cair tambahan untuk menyuplai jumlah volume nitrogen cair secara terkontrol ke ruang *cryogenic* untuk mempertahankan laju pendinginan, perendaman, dan pemanasan. Suplai nitrogen cair ke ruang *cryogenic* dikontrol menggunakan *solenoid valve* yang diaktifkan oleh PID kontroler.

2.6. Pengujian Bahan

2.6.1. Pengujian Komposisi Kimia Paduan Fe-5Al-21Mn

Pengujian komposisi kimia bertujuan untuk mengetahui besarnya kandungan unsur-unsur yang terdapat pada bahan yang akan diuji. Menurut Van Vlack (1983), pengujian komposisi kimia ini dapat dilakukan dalam 2 cara, yaitu:

1. Sistem celup

Pada sistem ini spesimen yang sudah menjadi serbuk kemudian dilarutkan ke sebuah larutan tertentu yang hasilnya akan diketahui unsur yang terkandung di spesimen tersebut (%).

2. Sistem *spectro*

Pengujian ini dilakukan dengan cara menembakkan sinar *polychromatis* yang diubah menjadi sinar *monochromatis* terhadap bahan, lalu *scanner* akan menunjukkan kadar semua unsur yang terkandung di dalam spesimen tersebut (%).

2.6.2. Pengujian Struktur Mikro

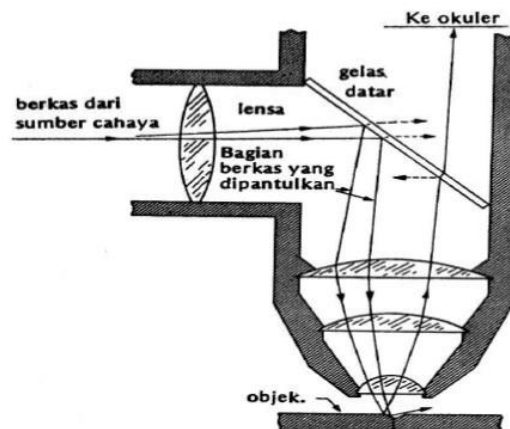
Tujuan dari pengujian struktur mikro adalah untuk memperoleh gambaran tentang sifat-sifat, bentuk struktur atau karakteristik tertentu guna penganalisaan terhadap sifat-sifat lain yang dimiliki benda uji, misalnya dengan variasi struktur mikro seperti jumlah, ukuran, bentuk, warna, distribusi fase, dan sebagainya. Untuk mengetahui struktur mikro maka dilakukan pengujian dengan menggunakan mikroskop optik.

Penggunaan mikroskop optik selain untuk meneliti deformasi permukaan logam, dapat juga untuk memeriksa susunan dari logam tersebut. Apabila cahaya-cahaya yang dipantulkan masuk kedalam lensa mikroskop, permukaan tampak

dengan jelas (terang). Akan tetapi, apabila bekas dipantulkan dan tidak mengenai lensa, daerah itu akan tampak hitam. Batas butir tampak seperti alur mengelilingi setiap butir dan cahaya tidak dipantulkan dalam lensa, sehingga batas butir tampak seperti garis-garis hitam.

Mikroskop cahaya yang sederhana terdiri dari tiga bagian pokok, yaitu :

- a) Lensa pemantul (*illuminator*), yaitu untuk memantulkan cahaya yang mengenai permukaan logam.
- b) Lensa obyektif, yang mempunyai daya pisah untuk kekerasan logam yang berbeda.
- c) Lensa mata (*eyepiece*), untuk memperbesar bayangan yang terbentuk oleh lensa obyektif.



Gambar 2.5. Skema Mikroskop Optik (Vlack, 1983).

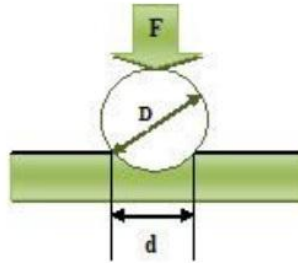
Cara pengujiannya dengan memperhalus permukaan bahan yang akan diuji dengan sehalus mungkin kemudian dietsa dengan larutan kimia dan selanjutnya di tempatkan dibawah mikroskop dengan pembesaran yang cukup dapat dilihat susunannya dan dapat ditentukan secara fotografis.

2.6.3. Pengujian Kekerasan

Kekerasan adalah sifat yang dapat diandalkan sebagai pengganti kekuatan bahan. Alat pengujian kekerasan (Gambar 2.5) ada beberapa macam yang disesuaikan dengan : bahan, kekerasan, ukuran, dan lainnya dari suatu produk (Surdia, T., 1999). Secara umum pengujian kekerasan dapat dilakukan dengan 3 cara :

1. Metode Kekerasan *Brinell*

Kekerasan ini diukur dengan menggunakan alat pengukur kekerasan *Brinell*. Bola baja keras dengan diameter D (mm) ditekan ke permukaan bagian yang diukur dengan beban F (kg). Kekerasan *Brinell* adalah beban F dibagi luas bidang (mm^2) penekanan yang merupakan deformasi (perubahan) tetap sebagai akibat penekanan (Surdia, T., 1999).



Gambar 2.6. Perumusan Pengujian *Brinell* (Callister, 2001).

Menurut callister (2001) uji kekerasan *Brinell* dirumuskan dengan :

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

Dimana :

- D : diameter bola (mm)
- d : diameter bekas injakan (mm)
- F : beban (kg)
- HB : kekerasan *Brinell* (kg/mm^2).

Keuntungan-keuntungan pengujian kekerasan *Brinell*, antara lain :

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

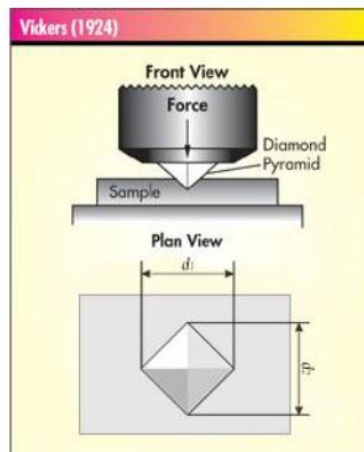
Kelemahan-kelemahan pengujian kekerasan *Brinell*, antara lain :

- a. Batas ukuran kecil, sehingga perlu diketahui dahulu berapa kira-kira kekerasan bahan yang akan diuji, untuk memilih dengan tepat jenis penetrator dan beban yang akan dipergunakan.
- b. Penunjukan harga kekerasan bahan kurang tepat, karena adanya sedikit

debu antar benda uji dengan penetrator. Penetrator terbuat dari bola baja yang berukuran besar dengan beban yang besar, sehingga bahan lunak atau keras sekali yang berukuran kecil tidak dapat diukur kekerasannya.

2. Metode Kekerasan *Vickers*

Penetrator pada *Vickers Hardness Tester* dibuat dari bahan intan yang berbentuk piramid yang ditekan pada benda uji rata tanpa kejutan. Proses pengujian kekerasan *Vickers* memakai piramida *diamond* dengan sudut puncak 136° sebagai penekan dan dengan alas berbentuk bujur sangkar. Penetrator ditekan kedalam bahan uji (spesimen) dengan beban sebesar F (kg), selama waktu tertentu.



Gambar 2.7. Pengujian kekerasan *Vickers* (Callister, 2001).

Nilai kekerasan *vickers* dinyatakan dengan (HV), dapat juga (DPN), (VPN), (DPH) yang merupakan singkatan dari *Diamond Pyramid Number, Vickers Pyramid Number, Diamond Pyramid Hardness*, yaitu merupakan perbandingan antara beban tekan F (kg) dengan luas tapak tekan A (mm²).

Menurut callister (2010) uji kekerasan *Vickers* dirumuskan dengan :

$$VHN = 1,8544 \frac{P}{D^2}$$

$$D = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

VHN : angka kekerasan *Vickers* (kg/mm²)

F : beban (kgf)

d₁ : panjang diagonal injakan satu (mm)

d₂ : panjang diagonal injakan dua (mm)

D : diagonal rata-rata dari injakan yang dibuat oleh indentor (mm)

Keuntungan menggunakan pengujian kekerasan *vickers*, antara lain :

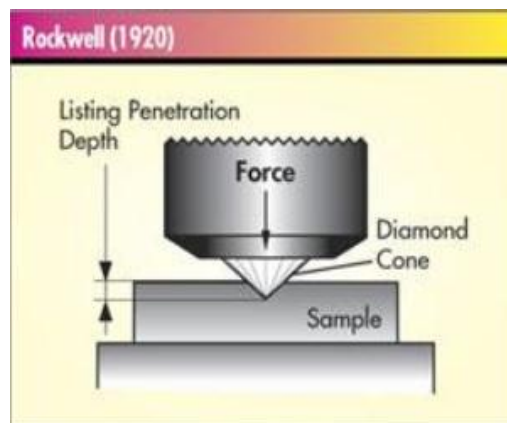
- a. Dapat menguji bahan yang sangat keras.
- b. Kerusakan pada pengujian relatif tidak merusak.
- c. Pembacaan ukuran jejak dapat dilakukan lebih akurat.
- d. Dapat digunakan untuk menguji hampir semua logam.
- e. Menggunakan hanya satu jenis indentor untuk menguji material yang lunak hingga keras.

Kelemahan menggunakan pengujian kekerasan *vickers*, antara lain :

- a. Untuk mengukur spesimen yang strukturnya tidak homogen (seperti besi tuang) nilai hasil kekerasannya kurang teliti.
- b. Waktu pengujian lebih lama.

3. Metode Kekerasan *Rockwell*

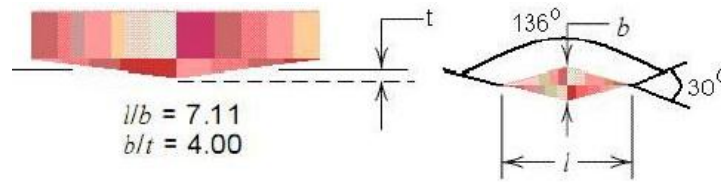
Proses pengujian kekerasan *rockwell* memiliki kecepatan hitung yang lebih cepat karena nilai kekerasannya langsung dapat dilihat dari pengukur alat uji. Penetrator yang bisa digunakan adalah kerucut intan dengan sudut puncak 120° , bola baja berdiameter $1/16$, dan $1/8$ *inchi*.



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

4. Metode *Micro Hardness (Knoop Hardnes)*

Micro hardness test sering disebut dengan *knoop hardness testing*, merupakan pengujian yang cocok untuk pengujian material yang nilai kekerasannya rendah. *Knoop* biasanya digunakan untuk mengukur material yang getas seperti keramik.



Gambar 2.9. Pengujian Metode *Micro Hardness* (Callister, 2001).

Menurut Callister (2001) pengujian ini dapat dirumuskan :

$$HK = 14,2 \frac{F}{l^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

HK : angka kekerasan *knoop*

F : beban (kg)

L : panjang indentasi (mm)

2.6.4. Pengujian Kekuatan Tarik

Tujuan pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanis dari suatu logam terhadap tarikan. Pengujian tarik biasanya dilakukan terhadap spesimen atau batang uji dengan memberikan beban tarik secara perlahan-lahan. Jika logam ditarik dengan beban maka akan terjadi deformasi yang berupa pengecilan penampang atau pertambahan panjang.

Ada dua deformasi yaitu :

1. Deformasi plastis

Benda tidak dapat kembali seperti kebentuk semula setelah tegangan yang diberikan dihilangkan.

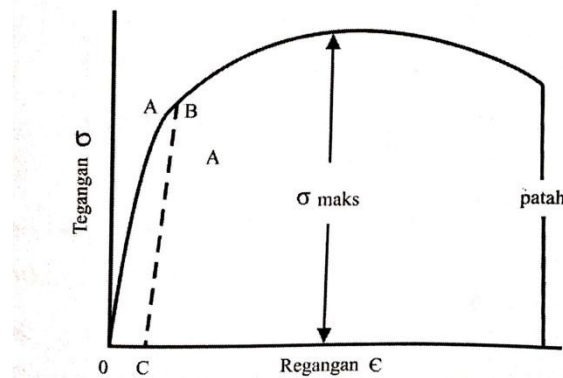
2. Deformasi elastis

Benda dapat kembali ke bentuk semula setelah tegangan yang diberikan dihilangkan.

Data dasar dari sifat mekanis logam ulet (*ductile metal*) diperoleh dari percobaan uji tarik, dimana benda uji dengan desain tertentu mengalami beban aksial yang semakin besar sampai benda uji itu putus. Beban dan perpanjangan diukur berkali-kali selama dilakukan pengujian dan dinyatakan sebagai tegangan rata-rata serta regangan rata-rata (Dieter, 1987).

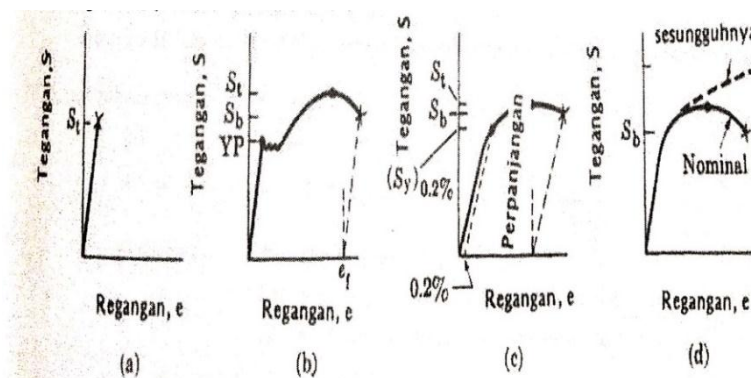
Data yang diperoleh dari pengujian tarik pada umumnya digambarkan sebagai diagram tegangan regangan. Perilaku umum bahan yang dibebani dapat

diklasifikasikan sebagai ulet dan getas, tergantung apakah beban tersebut memperlihatkan kemampuan deformasi elastis atau tidak. Gambar 2.10. melukiskan garis lengkung OA merupakan daerah elastik dimana hukum *Hooke* ditaati. Titik A adalah batas utama batas proporsional elastis dimana garis lengkung tegangan regangan menyimpang dari kelinearannya. Untuk keperluan rekayasa, batas-batas perilaku elastik yang berguna adalah titik B yaitu pada keadaan luluh (*yield strength*).



Gambar 2.10. Diagram garis lengkung tegangan tarik (Dieter, 1987).

Gambar 2.11, memperlihatkan deformasi, kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan.



Gambar 2.11. Diagram tegangan-regangan (Vlack, 1981).

- (a) Bahan tidak ulet, tidak ada deformasi plastik (contoh: Besi cor),
- (b) Bahan ulet dengan titik luluh (contoh: baja karbon rendah),
- (c) Bahan ulet tanpa titik luluh yang jelas (contoh: Aluminium),
- (d) Kurva tegangan regangan nominal sesungguhnya dan tegangan.

S_b = kekuatan patah, S_t = kekuatan tarik, S_y = kekuatan luluh, e_f = perpanjangan (regangan sebelum patah), X = titik patah, Yp = titik luluh (*yield point*).

Menurut Dieter (1987), tegangan tarik suatu bahan dapat dihitung dengan rumus berikut ini :

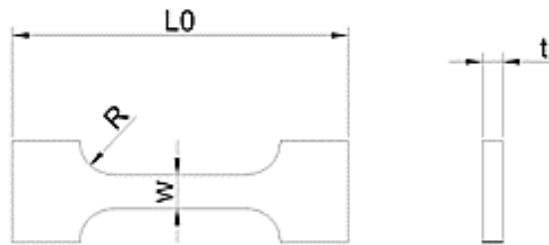
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots(2.4)$$

- Keterangan : σ = Tegangan Tarik (Kg/mm²)
 F = Beban maksimal (Kg)
 A_0 = Luas penampang batang uji mula-mula (mm²)

George E. Dieter (1987) menyebutkan regangan tarik dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \dots\dots\dots(2.5)$$

- Keterangan : ε = Regangan
 L_f = Panjang benda uji pada saat patah (mm)
 L_0 = Panjang benda uji mula-mula (mm)



Gambar 2.12. Spesimen uji tarik standar ASTM E8M

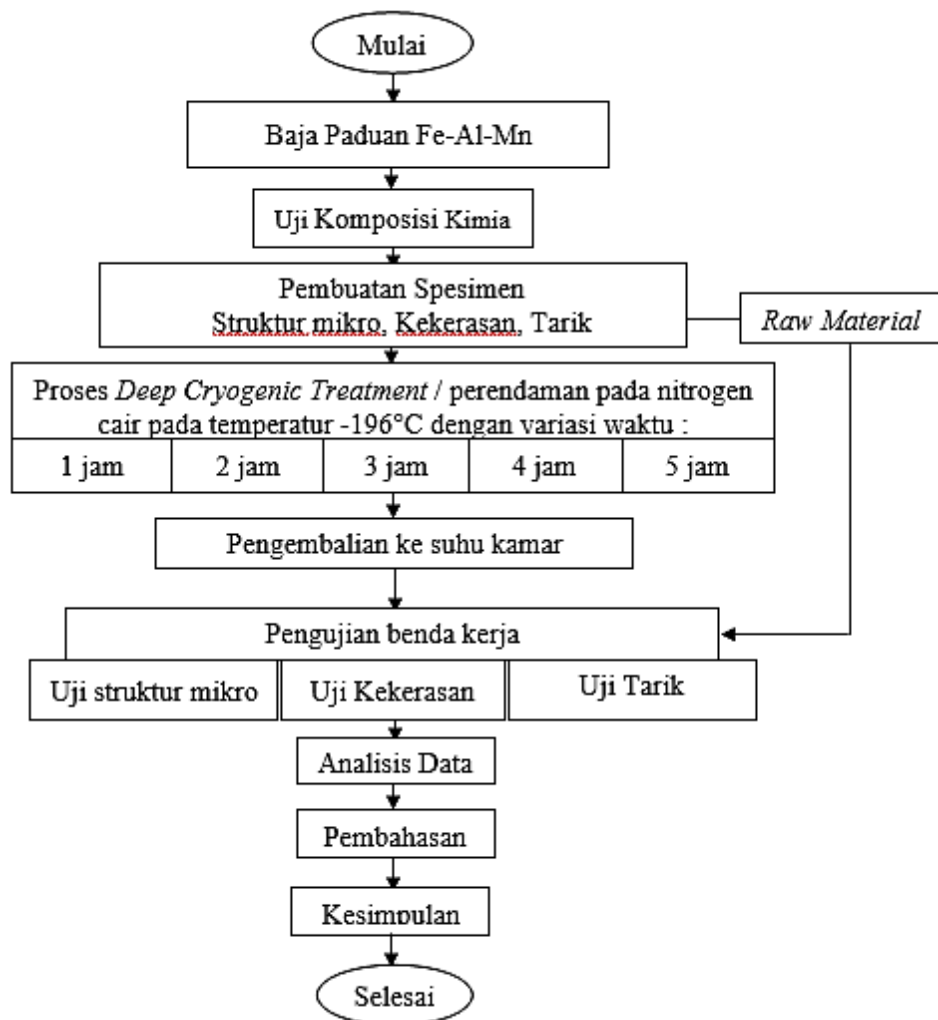
2.7. Hipotesis

Berdasarkan teori dan tinjauan pustaka, maka dapat disusun hipotesis sebagai berikut :

1. Proses *deep cryogenic treatment* untuk baja paduan, menyebabkan terbentuknya presipitasi karbida yang lebih halus dengan jumlah banyak dan mengubah struktur austenit menjadi martensit.
2. Semakin lama waktu proses *deep cryogenic treatment*, maka kekerasan pada baja paduan semakin tinggi.
3. Semakin lama waktu proses *deep cryogenic treatment*, maka kekuatan tarik pada baja paduan semakin tinggi.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2. Bahan dan Alat

3.2.1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Baja paduan Fe-5Al-21Mn (Gambar 3.2).
2. Nitrogen cair.
3. Bahan Etsa $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ (*aqua regia*) dengan perbandingan 1:3.

4. Alkohol 70%.
5. *Autosol* dan kain bludru.
6. Amplas dengan nomor (200 *mesh*, 400 *mesh*, 600 *mesh*, dan 1000 *mesh*).

3.2.2. Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. *Spectrometer* milik PT. Itokoh Ceperindo Klaten (Gambar 3.3) .
2. Tabung nitrogen cair GT 3 (Gambar 3.4) milik Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta.
3. Mesin amplas milik Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta (Gambar 3.5).
4. Alat uji struktur mikro (mikroskop optik) (Gambar 3.6) milik Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta dengan spesifikasi :
 - Merk : *Olympus Metallurgical System Microscope*
 - Model : BX60M
 - Buatan : Jepang
 - Tahun : 2000
5. Alat uji kekerasan *Vickers* (Gambar 3.7) milik Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta, dengan spesifikasi:
 - Merk : *Schmierplan/Lubrication plan*
 - Model :LA-H 250 RC. 16-02/*Hardness TesterDIATestory*
 - Tahun : 2000
6. *Hair dryer*, *dial caliper*, dan *thermometer* 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.
8. Alat Uji Tarik, milik Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta, dengan spesifikasi:

3.2.3. Persiapan Spesimen

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah 12 spesimen diantaranya 10 buah akan dilakukan proses *Deep Cryogenic Treatment* dan 2 buah *raw material* yang terdiri dari : Spesimen uji komposisi kimia 1 buah spesimen, uji struktur mikro dengan pembesaran 100x, dan 200x, kekerasan *Vickers* 3 titik untuk 6 buah spesimen dan uji kekuatan tarik 6 buah spesimen.



Gambar 3.2. Baja Paduan Fe-5Al-21Mn

3.2.4. Pengujian Komposisi Kimia

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



Gambar 3.3. Alat uji komposisi *spectrometer* milik PT. Itokoh Ceperindo.

Langkah-langkah pengujian komposisi kimia adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen uji sebanyak 1 (satu) buah.
2. Menyiapkan alat uji komposisi kimia *spectrometer*.

3. Memasang spesimen uji diatas landasan. Benda uji harus menutupi lubang pada alat uji minimal diameter 14 mm. Bila terjadi kebocoran maka mesin uji tidak bekerja dengan benar, karena pada waktu penembakan gas argon dilarang ada kebocoran.
4. Menghidupkan mesin, membuka aliran gas argon, memutar tuas berlawanan arah dengan jarum jam. Mengatur tekanan gas argon sampai jarum jam 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 4 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.
5. Menghidupkan komputer berturut-turut yaitu CPU, monitor, dan printer.
6. Menunggu sampai alat konstan kurang lebih 1 sampai dengan 2 jam.
7. *Spectrometer* siap untuk dioperasikan yaitu spesimen uji ditempatkan pada dudukan kerja dan diberikan energi tinggi melalui *electroda wolfram* 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.
8. Hasil pembakaran selama kurang lebih 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.
9. Melihat pada layar komputer hasil dari spesimen uji dan bisa dicetak komputer pada kertas yang sudah disediakan atau disimpan di *hardware*.

3.2.5. Proses *Deep Cryogenic Treatment*

Proses *Deep Cryogenic Treatment* dilakukan pada spesimen uji yang berjumlah 12 spesimen, dengan variasi waktu yaitu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam. Alat yang digunakan pada proses *Deep Cryogenic Treatment* adalah tabung nitrogen cair GT 3. Proses *Deep Cryogenic Treatment* dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta. Langkah-langkah proses *Deep Cryogenic Treatment* adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan tabung nitrogen cair GT 3.
2. Memasukan spesimen ke dalam tabung nitrogen cair GT 3.
3. Memasukan *thermometer* untuk mengecek suhu nitrogen cair.
4. Menghidupkan *stopwatch* untuk mengetahui lama perendaman setiap spesimen mulai dari 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam.
5. Mengeluarkan spesimen yang telah direndam di dalam nitrogen cair.
6. Mengembalikan suhu spesimen pada suhu kamar (*warming*).



Gambar 3.4. Tabung nitrogen cair GT 3.

3.3. Pengujian Bahan

3.3.1. Pengujian Struktur Mikro

Langkah-langkah pengujian struktur mikro sebagai berikut :

1. Pengamplasan

Proses pengamplasan dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan spesimen. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan mesin

poles dimana amplas dipasang di atas dudukan amplas mesin poles (Gambar 3.5).



Gambar 3.5. Mesin amplas.

Berikut ini adalah beberapa tahapan dalam pengamplasan yaitu :

A. Persiapan

Persiapan adalah tahap dimana melakukan pemilihan amplas yang dimulai dengan menggunakan amplas dengan nomor yang paling rendah (kasar) dan juga ditambah dengan penggunaan air dengan tujuan supaya tidak terjadi gesekan antara permukaan spesimen dengan amplas yang dapat mengakibatkan percikan bunga api. Dalam penelitian ini amplas yang digunakan terdiri dari amplas nomor 400, 600, 800, dan 1000 *mesh* (butir *silicon carbide* per inci persegi). Semakin kecil nomor amplas maka semakin sedikit jumlah butir *silicon carbide* per inci persegi atau semakin kasar permukaan amplas. Nomor amplas paling kecil digunakan untuk memulai operasi pengamplasan .

B. Penghalusan Permukaan

Tahap penghalusan permukaan pada spesimen dengan menggunakan amplas dari nomor rendah ke nomor yang paling tinggi sampai permukaan dari spesimen yang di uji rata dan tidak ada lagi *scratch* pada material bila dilihat di mikroskop.

Langkah-langkah proses pengamplasan adalah sebagai berikut :

- a. Menyiapkan spesimen yang akan dilakukan proses pengamplasan.
- b. Memasang kertas amplas pada meja putar mesin sesuai dengan urutan tingkat kekasaran yang dipakai.
- c. Menghubungkan kabel *power* ke *stop* kontak untuk mendapatkan aliran listrik.

- d. Menekan saklar untuk menyalakan meja putar yang akan digunakan untuk proses pengamplasan permukaan benda kerja.
- e. Menghidupkan saluran air pendingin sesuai dengan meja putar yang dipakai, mengatur besar kecilnya aliran sesuai kebutuhan.
- f. Proses pengamplasan mulai dilakukan.
- g. Mengusahakan arah pengamplasan selalu tetap sehingga permukaan yang dihasilkan akan rata dan tidak menimbulkan goresan.

2. Pemolesan

Tahap pemolesan bertujuan untuk menghasilkan permukaan spesimen yang rata dan mengkilap, tidak boleh ada goresan yang merintang selama pengujian struktur mikro. Bahan pemoles digunakan autosol yang berguna untuk menghilangkan bekas pemakanan akibat proses pengamplasan. Proses pemolesan dilakukan dengan cara meletakkan autosol pada permukaan benda uji, kemudian digosokkan pada kain bludru sampai goresan-goresan hilang dan permukaan benda uji mengkilap.

Awal tahap proses pemolesan ini dilakukan dengan agak memberi tekanan pada spesimen yang berguna untuk menghilangkan goresan dari hasil pengamplasan. Kemudian secara bertahap spesimen dipoles dengan tidak memberi tekanan seperti pada awal proses pemolesan agar didapatkan permukaan spesimen yang halus dan mengkilap.

3. Pengetsaan

Pengetsaan digunakan dalam metalografi untuk memperlihatkan mikro struktur dari spesimen dengan menggunakan mikroskop. Spesimen yang akan di etsa harus di poles secara teliti dan rata serta bebas dari perubahan yang disebabkan deformasi plastis pada permukaan spesimen, alur material, dan goresan, karena deformasi plastis akan mengubah struktur mikro dari spesimen tersebut.

Meskipun dalam mikrografi beberapa informasi sudah dapat diketahui tanpa proses *etching*, tetapi mikrostruktur suatu material biasanya baru dapat terlihat setelah dilakukan pengetsaan. Hanya sekitar 10% informasi yang dapat terlihat tanpa proses pengetsaan. Hanya reaktan, pori, celah dan unsur

non-metalik yang dapat diamati hanya dengan pemolesan, selebihnya diperlukan pengetsaan.

Secara umum tujuan dari pengetsaan adalah :

- a. Memberi warna pada permukaan sehingga tampak jelas ketika diamati dengan mikroskop (*color enhancement*).
- b. Menimbulkan korosi sehingga memperjelas batas butir.
- c. Meningkatkan kontras antar butir dan batas butir (*optical enhancement of contrast*).
- d. Mengidentifikasi fasa pada suatu spesimen (*anodizing process*).

Pada penelitian ini spesimen baja tahan karat paduan Fe-Al-Mn diberi bahan larutan etsa yaitu berupa larutan $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ (*aqua regia*) dengan perbandingan 1:3 selama ± 25 detik, kemudian spesimen dicuci dengan air dan dikeringkan dengan menggunakan alat pengering rambut (*hair dryer*). Selanjutnya masuk ketahap uji struktur mikro.

4. Pemotretan

Setelah spesimen uji di etsa maka spesimen uji dipasang pada anvil untuk difoto. Pemasangan ini harus tegak lurus terhadap lensa pengujian untuk mendapatkan hasil yang baik.

Mengatur fokus pada mikroskop optik (Gambar 3.6) pada daerah atau titik yang akan diambil gambarnya. Langkah selanjutnya adalah melakukan pemotretan dengan perbesaran 100 kali.

- a. Tekanan yang diberikan pada spesimen tidak boleh terlalu berlebihan karena akan mengakibatkan permukaan tidak rata dan timbul banyak goresan.
- b. Melakukan proses pengamplasan berulang-ulang dengan mengganti tingkat kekasaran kertas amplas sesuai ketentuan.
- c. Mengulangi langkah a-f untuk spesimen berikutnya.



Gambar 3.6. Alat uji struktur mikro (mikroskopik optik).

Cara penggunaan “*inverted metalurgy microscope*”.

- 1) Mikroskop dinyalakan “*ON*” pada ‘*power switch*’.
- 2) Meletakkan spesimen pada ‘*stage*’.
- 3) Memilih cahaya yang sesuai dengan memutar “*Light Intansity Control Knop*”.
- 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 knop*”.
- 8) Untuk melakukan pemotretan :
 - a) Mempersiapkan kamera.
 - b) Memilih spesifik gambar yang akan diambil dengan “*photo unit adjusterroll*”.
 - c) Menekan “*Expose*” untuk melakukan pemotretan.
- 9) Kemudian langkah pengujian seperti diatas untuk benda uji selanjutnya.

3.3.2. Pengujian Kekerasan *Vickers*

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



Gambar 3.7. Alat uji kekerasan *Vickers*.

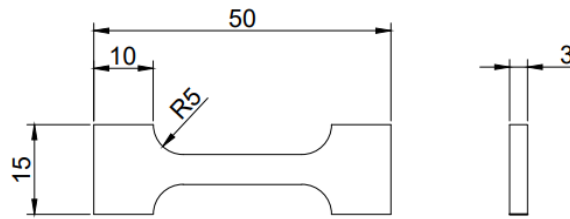
Langkah-langkah pengujian kekerasan *Vickers* adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen uji sebanyak 6 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 30 Kgf.
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. Pengujian Kekuatan Tarik (UTM)

Pengujian kekuatan tarik dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM Yogyakarta, menggunakan alat:

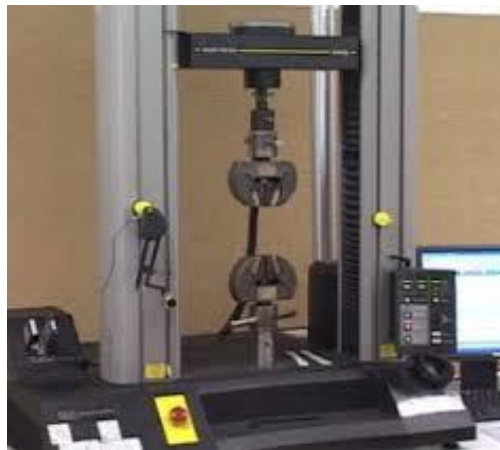
- *Universal Tensile Machine* (UTM), dan ada 6 spesimen untuk pengujian tarik ini. Ukuran spesimen pengujian tarik dapat terlihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Spesimen uji tarik (ASTM E8M).

Berikut adalah persiapan untuk spesimen uji tarik :

1. Mempersiapkan baja paduan Fe-5Al-21Mn.
2. Pemotongan benda uji dengan menggunakan mesin skrap ukuran benda uji yaitu panjang 50 mm, lebar 15 mm, tebal 3 mm.



Gambar 3.9. Alat Uji Tarik (UTM)

Pada uji tarik, ujung-ujung benda uji dijepit dengan kuat dan salah satu ujungnya dihubungkan dengan alat pengatur beban, sedang ujung yang satu lagi dengan alat penarik. Regangan benda uji terlihat pada pergerakan relatifnya.

Tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan suatu regangan diukur dengan menggunakan metode hidraulik, optik, atau elektromagnetik. Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik dari sebuah paduan Fe-AL-Mn sehingga diketahui beban maksimumnya. Dari sini akan diperoleh kurva hubungan antara gaya tarik dengan perpanjangan yang kemudian dapat diperoleh kurva tegangan regangan. Secara umum, batas elastis adalah tegangan yang besarnya tidak dapat dipastikan secara presisi.

Langkah-langkah pengujian tarik adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan alat uji dan spesimen uji yang akan digunakan.
2. Memasang spesimen uji pada penjepit yang terdapat pada alat uji dan memastikan bahwa spesimen uji telah terpasang dengan kuat sehingga pada saat pengujian tidak lepas.
3. Pengaturan penjepitan benda uji dilakukan dengan memutar *handle* pengatur.
4. Memasang kertas pada meja *plotter* yang akan digunakan untuk menggambar diagram tegangan-regangannya.
5. Hidupkan alat uji tarik dengan menekan tombol *ON* dan selama pengujian dapat diamati penarikan spesimen uji perlahan-lahan sampai patah.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur pada paduan baja Fe-5Al-21Mn. Hasil pengujian komposisi kimia paduan Fe-5Al-21Mn ini dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil pengujian komposisi kimia Fe-5Al-21Mn

No	Unsur	W (% Berat)
1	Fe	69,34
2	Al	5,03
3	Mn	21,28
4	C	1,15
5	Ni	0,04
6	Nb	0,01
7	Si	1,46
8	Cr	0,82
9	V	0,25
10	Mo	0,16
11	P	0,05
12	Cu	0,11
13	N	0,17
14	Sb	0,08
15	Co	0,02
16	Ti	0,01
17	Sn	0,02
Total		100

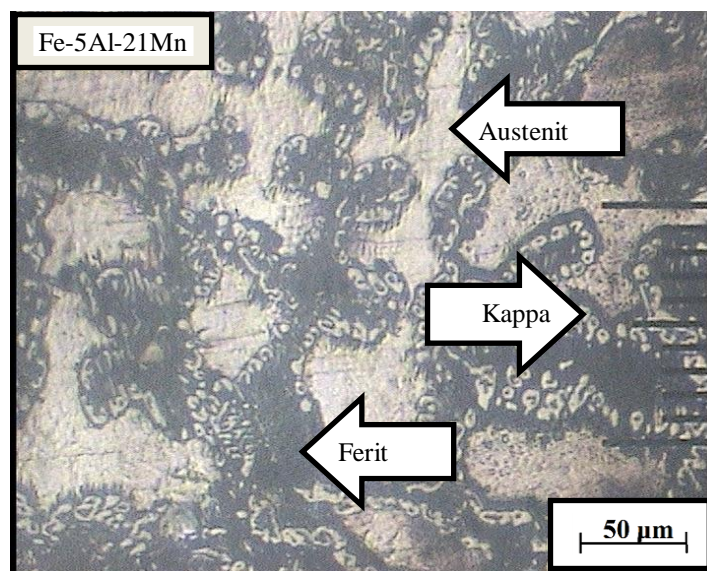
Hasil pengujian komposisi kimia paduan Fe-5Al-21Mn (Tabel 4.1), menunjukkan bahwa jumlah kadar unsur utama besi (Fe) sebesar 69,34%, unsur paduan utama aluminium (Al) 5,03%, mangan (Mn) 21,28% dan karbon (C) 1,15%. Kadar unsur paduan lain adalah sebagai berikut: Nikel (Ni) 0,04%, niobium (Nb) 0,04%, silikon (Si) 1,46%, kromium (Cr) 0,82%, vanadium (V) 0,25%, molibdenum (Mo) 0,16%, fosfor (P) 0,05%, tembaga (Cu) 0,11%, titanium (Ti) 0,01%, antimon (Sb) 0,08%, kobalt (Co) 0,02%. Jumlah unsur paduan utama ditambah kadar unsur paduan lain adalah sebesar sebesar 30,66%, sehingga paduan ini termasuk baja paduan tinggi (Smallman, 1991).

(Kartikasari, R., 2013) penambahan unsur aluminium (Al) sebagai pembentuk dan penstabil ferit kedalam paduan Fe-5Al-21Mn sebesar 5,03%, meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi. (Binudi 2014), Penambahan unsur Mangan (Mn) yang merupakan unsur pembentuk dan penstabil austenit kedalam paduan Fe-5Al-21Mn sebesar 21,28%, dalam sistem paduan membuat butiran lebih halus, meningkatkan kekuatan dan kekerasan tanpa mengurangi keuletan, sehingga baja menjadi semakin keras dan ulet.

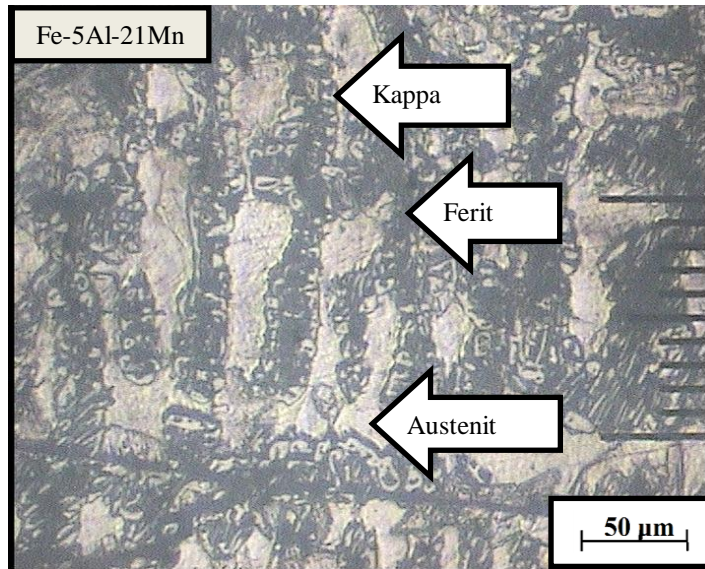
Unsur karbon (C) dengan jumlah 1,15% menyebabkan paduan ini sulit dibentuk karena termasuk baja karbon tinggi yang memiliki sifat kekerasan relatif tinggi. Unsur-unsur yang lain tidak terlalu berpengaruh terhadap sistem paduan karena kandungan yang ada tergolong kecil (Nasution, A., 2008).

4.2. Analisis Hasil Pengujian Struktur Mikro

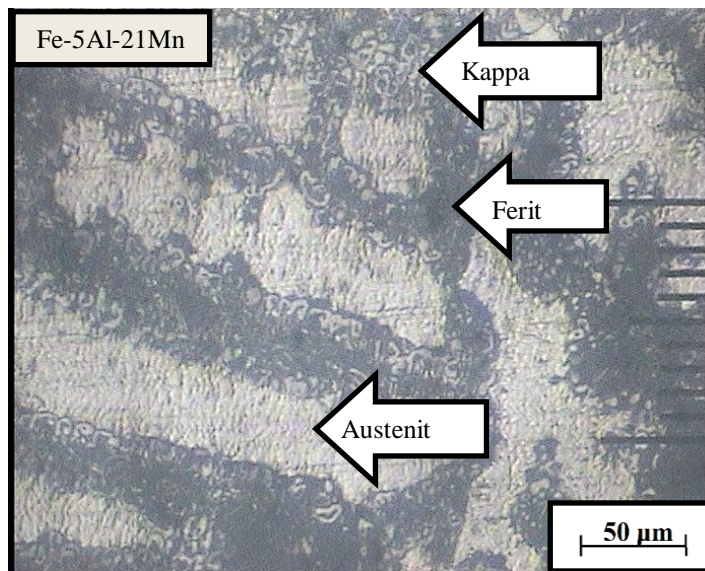
Pengujian struktur mikro dilakukan dengan pengamatan pada benda uji menggunakan mikroskop optik setelah benda uji di etsa. Zat kimia yang digunakan untuk etsa adalah *aqua regia*. Benda uji tersebut terdiri atas spesimen *raw material* dan spesimen setelah proses *Deep Cryogenic Treatment* pada temperatur $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan variasi waktu perendaman 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam. Pengujian struktur mikro menggunakan perbesaran 200x pada seluruh spesimen. Hasil pengujian struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 4.1. hingga 4.6.



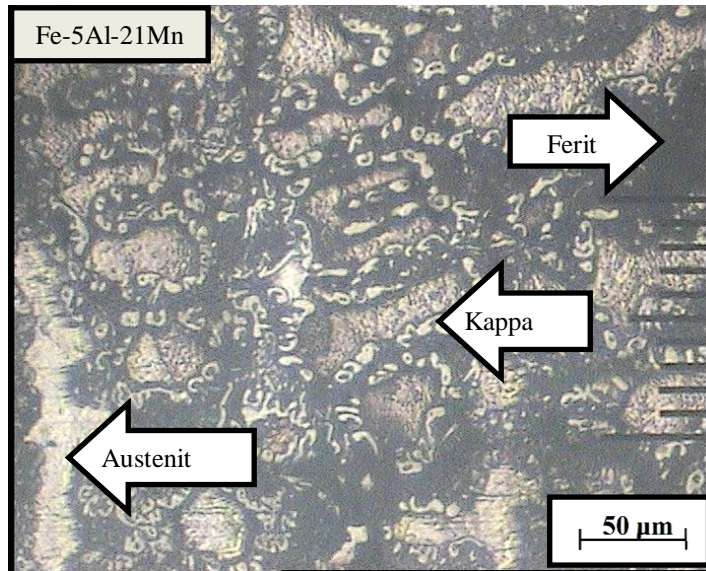
Gambar 4.1. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn *raw material*.



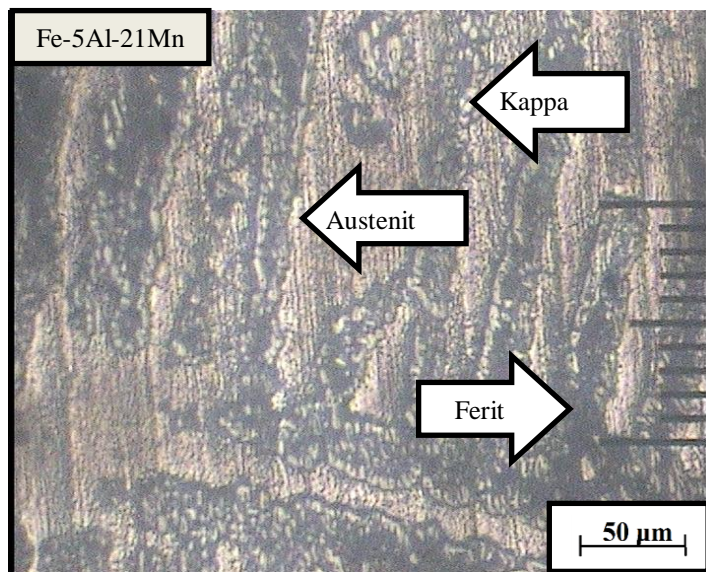
Gambar 4.2. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn setelah proses DCT, waktu perendaman 1 jam.



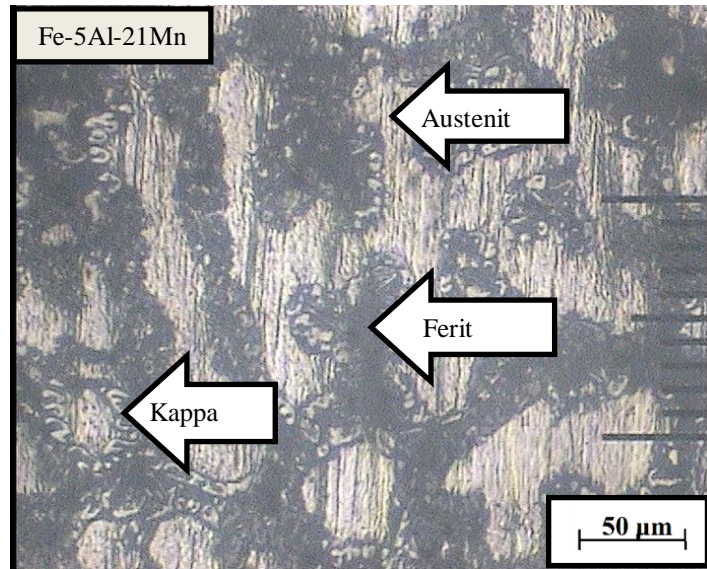
Gambar 4.3. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn setelah proses DCT, waktu perendaman 2 jam.



Gambar 4.4. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn setelah proses DCT, waktu perendaman 3 jam.



Gambar 4.5. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn setelah proses DCT, waktu perendaman 4 jam.



Gambar 4.6. Struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn setelah proses DCT, waktu perendaman 5 jam.

Hasil uji struktur mikro paduan Fe-5Al-21Mn memperlihatkan struktur austenit, ferit dan struktur *kappa* yang mengelilingi austenit dan pola dendritik yang terlihat pada area batas butir austenit seperti pada Gambar 4.1., untuk spesimen *raw material*. Pada proses perendaman *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) 1 jam menunjukkan struktur mikro austenit dan ferit yang terbentuk dengan besar butir austenit yang relatif besar, serta struktur *kappa* terlihat lebih homogen dibandingkan dengan foto struktur mikro *raw material*. Pada proses perendaman DCT dengan waktu 2 jam, menunjukkan struktur mikro yang terbentuk adalah austenit dan ferit dengan tumbuhnya struktur ferit yang lebih besar pada area batas butir serta struktur *kappa* yang terlihat relatif lebih besar dan berjarak. Proses perendaman DCT dengan waktu 3 jam menunjukkan struktur ferit yang lebih besar di area batas butir. Sedangkan, struktur austenit mengecil dan struktur *kappa* yang terlihat lebih berjarak. Spesimen proses perendaman DCT 4 jam menunjukkan bentuk struktur austenit yang kembali membesar dan struktur ferit yang mengecil dan stuktur *kappa* yang lebih rapat dibandingkan proses perendaman DCT 3 jam. Selanjutnya proses DCT pada spesimen dengan waktu perendaman 5 jam memperlihatkan struktur ferit tumbuh dengan ukuran butir yang besar pada area batas butir, struktur austenit yang mengecil serta struktur *kappa* terlihat membesar dibandingkan proses perendaman DCT 4 jam.

Semakin lama waktu perendaman akan mengubah besar butir struktur austenit menjadi dominan akan tetapi besar butir ferit akan mengecil, dan akan mengubah kisi pada spesimen (Chanstain, 2004).

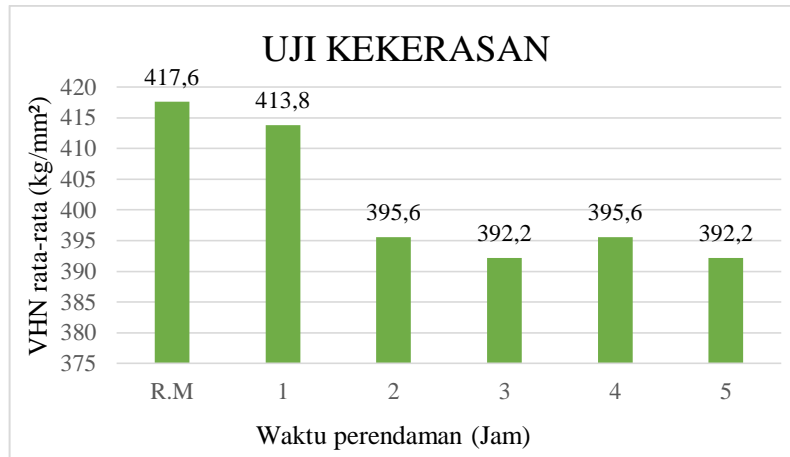
Berdasarkan analisis hasil uji struktur mikro pada Gambar 4.1–Gambar 4.7 dapat diambil kesimpulan bahwa paduan Fe-5Al-21Mn termasuk kategori *duplex stainless steel*. Hal ini dibuktikan oleh terbentuknya dua fasa struktur mikro yaitu struktur austenit dan juga struktur ferit (Huang, dkk 2003).

4.3. Analisis Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers*

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode uji kekerasan *Vickers*. Harga kekerasan yang diperoleh dengan cara menghitung beban yang diberikan dibagi dengan nilai rata-rata diagonal bekas pijakan piramida intan pada posisi yang diuji (Gambar 2.8). Untuk menghitung hasil uji kekerasan *Vickers* (VHN) dapat digunakan rumus kekerasan berdasarkan Persamaan 2.8. Hasil uji kekerasan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Hasil pengujian kekerasan *Vickers* paduan Fe-5Al-21Mn.

No.	Kode	Posisi titik uji	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{rata-rata} (mm)	Kekerasan rata-rata (VHN)
1	R.M 0J	Acak	0,36	0,37	0,365	417,6
			0,36	0,37	0,365	
			0,36	0,37	0,365	
2	DCT 1J	Acak	0,36	0,37	0,365	413,8
			0,37	0,37	0,370	
			0,36	0,37	0,365	
3	DCT 2J	Acak	0,37	0,38	0,375	395,6
			0,37	0,38	0,375	
			0,37	0,38	0,375	
4	DCT 3J	Acak	0,38	0,38	0,380	392,2
			0,37	0,38	0,375	
			0,37	0,38	0,375	
5	DCT 4J	Acak	0,37	0,38	0,375	395,6
			0,37	0,38	0,375	
			0,37	0,38	0,375	
6	DCT 5J	Acak	0,37	0,38	0,375	392,2
			0,37	0,38	0,375	
			0,38	0,38	0,380	



Gambar 4.7. Diagram kekerasan rata-rata paduan Fe-5Al-21Mn.

Contoh perhitungan uji kekerasan *Vickers* pada spesimen *raw material* (R.M) dengan pembebanan 30 kgf.

$$VHN = 1,8544 \frac{F}{d^2}$$

Dimana :

VHN : angka kekerasan *Vickers*

F : beban (kg)

d : diagonal (mm)

$$\text{Dengan : } d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \text{ (mm)}$$

Titik 1

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} = \frac{0,36 \text{ mm} + 0,37 \text{ mm}}{2} = 0,365 \text{ mm}$$

$$VHN = 1,8544 \frac{F}{d^2} = 1,8544 \frac{30 \text{ kg}}{(0,365 \text{ mm})^2} = 417,6 \text{ kg/mm}^2$$

Titik 2

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} = \frac{0,36 \text{ mm} + 0,37 \text{ mm}}{2} = 0,36 \text{ mm}$$

$$VHN = 1,8544 \frac{F}{d^2} = 1,8544 \frac{30 \text{ kg}}{(0,365 \text{ mm})^2} = 417,6 \text{ kg/mm}^2$$

Titik 3

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} = \frac{0,36 \text{ mm} + 0,37 \text{ mm}}{2} = 0,36 \text{ mm}$$

$$VHN = 1,8544 \frac{F}{d^2} = 1,8544 \frac{30 \text{ kg}}{(0,365 \text{ mm})^2} = 417,6 \text{ kg/mm}^2$$

$$VHN_{\text{rata-rata}} = \frac{417,6 + 413,8 + 395,6 + 392,2 + 395,6 + 392,2}{6} = 398,8 \text{ kg/mm}^2$$

Tabel 4.2 dan Gambar 4.7 menunjukkan hasil pengujian kekerasan menggunakan metode kekerasan *Vickers* dengan beban sebesar 30 kgf, setiap spesimen dilakukan pengujian pada 3 titik secara acak dan berurutan. Berdasarkan hasil pengujian terhadap spesimen uji paduan Fe-5Al-21Mn diperoleh nilai kekerasan paling optimal pada spesimen *raw material* dengan angka kekerasan sebesar 417,6 kg/mm². Tingginya nilai kekerasan ini dikarenakan ukuran butir struktur austenit dan struktur ferit yang terlihat besar, serta struktur *kappa* yang rapat dan dominan.

Hasil perhitungan pengujian kekerasan *Vickers* untuk spesimen dengan proses perendaman DCT waktu 1 jam, diperoleh angka kekerasan sebesar 413,8 kg/mm², yang mana mengalami penurunan sebesar 1% dibandingkan spesimen *raw material*. Hal ini terjadi karena perubahan ukuran butir struktur austenit dan ferit menjadi lebih rapat dan mengecil, serta struktur *kappa* yang terlihat berkurang.

Selanjutnya untuk hasil perhitungan proses DCT dengan waktu perendaman 2 jam memperlihatkan nilai kekerasan sebesar 395,6 kg/mm², yang mana mengalami penurunan sebesar 5% dibandingkan dengan nilai kekerasan pada spesimen dengan proses perendaman DCT 1 jam. Penurunan yang terjadi dilihat dari hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan perubahan besar butir austenit dan ferit membesar serta *kappa* terlihat lebih sedikit dibandingkan spesimen proses DCT 1 jam.

Hasil perhitungan kekerasan pada spesimen proses DCT waktu perendaman 3 jam menunjukkan nilai kekerasan sebesar 392,2 kg/mm². Nilai kekerasan ini menurun 1% dibandingkan nilai kekerasan pada proses DCT 2 jam. Hal ini disebabkan ukuran butir struktur ferit dan austenit berubah mengecil pada area batas butir, serta struktur *kappa* yang terlihat lebih rapat.

Spesimen dengan proses DCT waktu perendaman selama 4 jam, menunjukkan nilai kekerasan sebesar 395,6 kg/mm², spesimen ini mengalami peningkatan nilai kekerasan sebesar 1% dari spesimen proses perendaman DCT 3 jam. Hal ini dikarenakan ukuran butir austenit mengecil, struktur ferit membesar, serta struktur *kappa* yang terlihat sedikit.

Selanjutnya untuk spesimen proses DCT waktu perendama 5 jam kembali mengalami penurunan nilai kekerasan sebesar 1% dengan nilai kekerasan 392,2 kg/mm², dibandingkan spesimen proses DCT waktu perendaman 4 jam. Penurunan nilai kekerasan ini dikarenakan besar butir austenit dan ferit kembali membesar serta struktur *kappa* terlihat lebih banyak.

Dari data nilai kekerasan dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan paling optimal terdapat pada spesimen *raw material* dengan nilai kekerasan sebesar 417,6 kg/mm². Sedangkan nilai kekerasan pada spesimen dengan proses perendaman DCT variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam, menunjukkan bahwa perubahan nilai kekerasan yang tidak signifikan karena unsur Mn yang tinggi pada paduan tersebut yaitu sebesar 21,28%, sehingga menyebabkan perubahan fasa austenit yang stabil (Fontana, 1987).

4.4. Analisis Hasil Pengujian Kekuatan Tarik (UTM)

Pengujian Tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik suatu logam. Pengujian tarik biasanya dilakukan terhadap spesimen dengan memberikan beban tarik secara perlahan-lahan. Jika logam ditarik dengan beban maka akan terjadi deformasi yang berupa pengecilan penampang atau pertambahan panjang.

Pengujian tarik dapat dihitung dengan persamaan :

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

keterangan: σ = Tegangan (Kg/mm²)

F = Beban maksimal (Kg)

A₀ = Luas penampang batang uji mula-mula (mm²)

Dieter (1987) menyebutkan regangan tarik dapat dihitung dengan menggunakan (Persamaan 2.2)

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\%$$

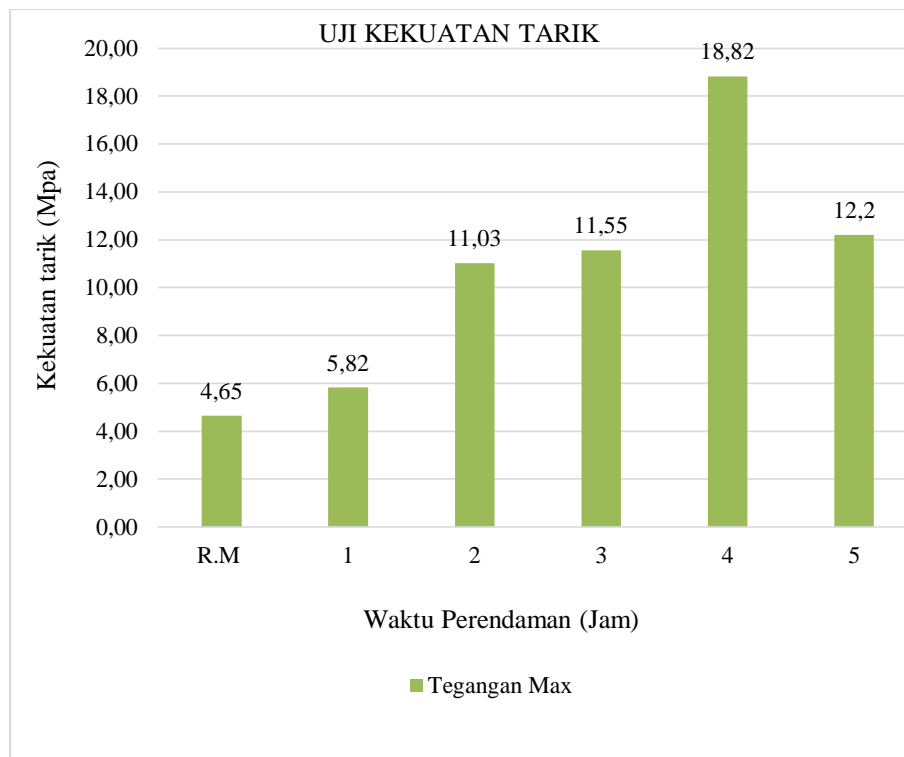
keterangan: ε = Regangan (%)

L_f = Panjang benda uji pada saat patah (Kg)

L₀ = Panjang benda uji mula-mula (mm²)

Tabel 4.3. Hasil pengujian kekuatan tarik Fe-5Al-21Mn

No.	Spesimen	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas (mm ²)	Gaya. Max (Fu) (Newton)	Teg. max (σ) (MPa)
1	R.M 0J	5,38	2,80	15,06	70	4,65
2	DCT 1J	5,62	2,75	15,46	90	5,82
3	DCT 2J	5,42	2,51	13,60	150	11,03
4	DCT 3J	4,84	4,65	22,51	260	11,55
5	DCT 4J	4,87	4,91	23,91	450	18,82
6	DCT 5J	5,06	4,86	24,59	300	12,20



Gambar 4.8. Diagram kekuatan tarik rata-rata paduan Fe-5Al-21Mn.

Pengujian kekuatan tarik paduan Fe-5Al-21Mn menunjukkan hasil pada spesimen *raw material* (Gambar 4.8.) dengan nilai tegangan sebesar 4,65 Mpa. Pada proses perendaman *Deep Cryogenic Treatment* (DCT) 1 jam menunjukkan nilai tegangan sebesar 5,82 Mpa, dimana mengalami peningkatan sebesar 20 % dibandingkan spesimen *raw material*. Hasil pengujian kekuatan tarik proses

perendaman DCT 2 jam dengan nilai tegangan sebesar 11,03 Mpa mengalami peningkatan sebesar 47 % dibandingkan spesimen proses perendaman DCT 1 jam. Selanjutnya pengujian kekuatan tarik spesimen proses perendaman DCT 3 jam memperoleh nilai tegangan sebesar 11,5 Mpa yang mengalami peningkatan sebesar 5 %. Pengujian kekuatan tarik selanjutnya yaitu spesimen dengan proses perendaman DCT 4 jam memperoleh nilai tegangan sebesar 18,52 Mpa, yang mengalami peningkatan sebesar 39 % dibandingkan spesimen proses DCT 3 jam. Hasil pengujian kekuatan tarik spesimen proses perendaman DCT 5 jam memperoleh nilai tegangan sebesar 12,2 Mpa, dimana mengalami penurunan sebesar 54 % dibandingkan spesimen proses DCT 4 jam.

Berdasarkan data hasil perhitungan uji kekuatan tarik pada spesimen paduan Fe-5Al-21Mn menunjukkan nilai tegangan optimal pada spesimen proses perendaman DCT 4 jam dengan nilai tegangan sebesar 18,52 Mpa serta memperoleh nilai tegangan terendah pada spesimen proses DCT *raw material*. Dapat disimpulkan bahwa perlakuan proses perendaman *Deep Cryogenic Treatment* dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam mempengaruhi nilai tegangan dan mengalami peningkatan yang relatif tinggi (Kumar., S, dkk, 2011). Dari proses perendaman DCT spesimen *raw material* hingga proses DCT 4 jam terlihat bahwa proses DCT mempengaruhi peningkatan nilai tegangan pada paduan Fe-5Al-21Mn.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian komposisi kimia paduan Fe-5Al-21Mn menunjukkan bahwa jumlah kadar unsur utama besi (Fe) sebesar 69,34%, unsur paduan utama aluminium (Al) 5,03%, mangan (Mn) 21,28% dan karbon (C) 1,15%. Jumlah unsur paduan utama ini sebesar Fe-5Al-21Mn, sehingga baja ini termasuk baja paduan tinggi.
2. Paduan Fe-5Al-21Mn termasuk kategori *duplex stainless steel*, hal ini dibuktikan pada foto struktur mikro karena terbentuknya dua fasa yaitu struktur austenit dan juga ferit.
3. Paduan Fe-5Al-21Mn memiliki nilai kekerasan tertinggi pada spesimen *raw material* dengan nilai kekerasan sebesar 417,6 kg/mm², dibandingkan spesimen yang diberi perlakuan perendaman DCT dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam hingga 5 jam yang menunjukkan peningkatan nilai kekerasan tidak signifikan, dikarenakan kandungan Mn yang tinggi pada paduan ini yaitu sebesar 21%.
4. Proses perendaman DCT mempengaruhi peningkatan nilai tegangan pada paduan Fe-5Al-21Mn, ditunjukkan dengan meningkatnya nilai tegangan tertinggi pada proses perendaman DCT 4 jam yaitu sebesar 18,52 Mpa, dibandingkan nilai tegangan pada variasi waktu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam.

5.2. Saran

Untuk menyempurnakan penelitian ini di waktu yang akan datang maka disarankan untuk melakukan :

1. Penelitian lebih lanjut terhadap metode pengecoran untuk paduan Fe-5Al-21Mn.
2. Penelitian lebih lanjut terhadap paduan Fe-5Al-21Mn dengan proses *Deep Cryogenic Treatment* dengan dilanjutkan variasi waktu yang berbeda.

3. Pengujian mekanik yang lain dengan proses perlakuan DCT guna mengetahui kelebihan dan kekurangan paduan Fe-5Al-21Mn.

DAFTAR PUSTAKA


- Akuan, A., 2011, **Analisis Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja Mangan Austenitik Hasil Proses Perlakuan Panas**, FT-UNJANI.
- Amstead, B.H., 1989, Terj Sriati Djaprie, **Teknologi Mekanik**, Jilid 1, edisi ketujuh Erlangga, Jakarta.
- Avner, S. H., 1974, *Introduction to Physical Metallurgy, Exclusive rights by Mc Graw-Hill Book Co – Singapore.*
- Avner, H.S., 1987, *Introduction to Physical Metallurgy*, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- Baldissera, P., Delprete, C., 2008, *Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review*, *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2008, vol 2, pp 1-11.
- Callister, W. D, dan Rethwisch D. G., 2010, *Materials Science and Engineering An Introduction*, eighth edition, Department, John Wiley and Sons, Inc.,111 River Street, Hoboken, NJ 07030-5774.
- Callister, W. D., 2001, *Materials Science and Engineering an Introduction, 3rd edition*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Chao, Y. a. (2002), Effect of Mn Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Fe-10Al-xMn-1.0C Alloy, *Materials Transactions*, No. 10, pp.2635-2642. *Vol. 3.*
- Dieter, G. E. Jr., 1986, *Mechanical Metallurgy*, *Mc Graw-Hill Book Company, Inc.*, New York Toronto London 1986.
- Fontana, G.M., 1987, *Corrosion Engineering, 3th ed.*, *McGraw Hill Inc.*, Singapore.
- Honeycombe, R.W.K. dan Bhadeshia, H.K.D., 1995, *Steel Microstructure and Properties, 2nd ed.*, Edward Arnold, London.
- https://id.wikipedia.org/wiki/Uji_kekerasan_Brinell
- Huang, J.Y., Zhu Y.T., Liao X.Z., Beyerlein I.J., Bourke M.A., Mitchell T.E.,2003, *Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel*, *Materials Science and Engineering Journal*, Vol : A339 Hal: 241-244.
- Jaswin, M. A., Mohan, D. L., 2010, *Optimization of the Cryogenic Treatment Process for En 52 Valve Steel Using the Grey-Taguchi Method*, Vol. 25, Pages 824-850, 2010.
- Kartikasari, R., 2009, **Pengaruh Temperatur Temper Terhadap Sifat Mekanik Dan Ketahanan Korosi Paduan Fe-Al-C**, Vol. 10, No 1, 2009.

- Kartikasari, R., Soekrisno., Noer Ilman M., Suyitno 2010, **Hardenability dan Ketahanan Korosi Paduan Fe-7,5Al-15Mn**, Jurnal Teknik Mesin Vol.11.1. Januari 2011, ISSN 1411-9471/Hal 1-15.
- Kartikasari, R., Sutrisna 2013, **Pengaruh Temperatur Anil Terhadap Ketangguhan dan Ketahanan Korosi Kandidat Baja Ringan Paduan Fe-Al-Mn-Si**, Jurnal Teknik Mesin, ROTASI V 15.1.2013/Hal 11-15.
- Kumar, S., Khedkar N, Jagtap B., T P Singh, 2017, *The Effects of Cryogenic Treatment on Cutting Tools*, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 225 (2017) 012104 doi:10.1088/1757-899X/225/1/012104.
- Kumar, S., Rajendran, 2014, *A research review on deep cryogenic treatment of steel*, *Int. J. Materials and Structural Integrity*, Vol.8,Nos.1/2/3.2014.
- Kumar, S., Pati P. I., 2000, *Deep Cryogenic Treatment of Alloy Steels : A Review*, *International Journal of Electronics, Communication & Soft Computing Science and Engineering*, ISSN: 2277-9477, Volume 2, Issue 8.
- Kumar, S., dkk, 2011, *Effect of Cryogenic Treatment on the hardness and tensile behaviour of AISI 4140 steel*, *International J. Microstructure and Materials Properties*, Vol. 6, No.5, 2011.
- Kumar, S., Rajendran I., 2014, **A Search Review on Deep Cryogenic Treatment of Steels**, *Int. J. Materials and Structural Integrity*, V8.Nos.1/2/3.2014.
- Liu, S., Wang., J., Sheng, B.-L. (n.d.). Yang, H., Gao, S., Huang, S., 2007, *Effects of deep cryogenic treatment on property of 3Cr13Mo1V1.5 high chromium cast iron*, *Materials & Design Volume 28*, Issue 3, 2007, Pages 1059-1064.
- Nadig, D.S., 2017, *Effect of Cryogenic Treatment on the Strength Properties of Heat Resistant Stainless Steel (07X16H6)*, *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, vol: 229 doi: 10.1088/1757899X/229/1/012014.
- Nasution, A., 2008, **Pembentukan Kurva S Dari Proses Kinetika Transformasi Fasa Baja Mangan Pada Temperatur 600° C**, USU e-Repository © 2008.
- Rahardjo, B., Bintang, A., 2014, **Pengaruh Unsur Ni, Cr, dan Mn Terhadap Sifat Mekanik Baja Kekuatan Tinggi Berbasis Laterit**, *Majalah Metalurgi*, Vol.29.1.2014, ISSN 0216-3188/ hal 33-40.
- Rante, B., Setyanto, D., 2018, **Pengaruh Cryogenic Terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium Seri 2024-T3**.


- Smallman, R.E., dan Bishop, R.J., 2000, “**Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material**”. Penerbit: Erlangga, Jakarta.
- Seol, J.-B., Raabe, D., P., C., Park, H.-S., & Kwak, J.-H. (2012). *Direct evidence for the formation of ordered carbides in a ferrite-based low-density Fe–Mn–Al–C alloy studied by transmission electron microscopy and atom probe tomography*.
- Sabarudin, S., Suyatno, A., Hermawan, D., 2018, *Effect of heat treatment and cryogenics on hardness of ductile cast iron microstructure (FCD-50)*, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol.32/12 (92) 2018, ISSN 1729-3774.
- Sabarudin, S., 2017, *Effect of heat treatment and Cryogenics on hardness of ductile cast iron microstructure (FCD50)*, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* ISSN 1729-3774.
- Taylor, R., 2009, *Cryogenic Institute of New England, Inc.*
- Thronton, R., 2014, *Investigating the effects of cryogenic processing on the wear performance and microstructure of engineering materials*, 2014.
- Van Vlack, L. H., 1983. *Elements of Material Science and Engineering*. Erlangga, Jakarta.
- Van Vlack, L.H., 1981, “**Ilmu dan Teknologi Bahan**”, Edisi Kelima Erlangga, Jakarta.
- Zhu Y., Yin Z., Zhou Y., Lei Q., & Fang W, 2008, *Effects of cryogenic treatment on mechanical properties and microstructure of Fe-Cr-Mo-Ni-C-Co alloy*, *Journal of Central South University of Technology* volume 15, pages 454–458 (2008).

LAMPIRAN

1. Lampiran Hasil Uji Komposisi



PT. ITOKOH CEPERINDO
 Stainless Steel & Alloy Steel Casting




COMPANY : PT. ITOKOH CEPERINDO
 SAMPLE NAME : Fe Al Mn
 CUSTOMER : Sdr GENICUTO
 FURNACE : YJ0117A02/84
 OPERATOR : PUTRA
 DATE / TIME : 01-OCT-2020 09:56:40
 TASK : Conc_Fei METHOD : FEGLFE

	Fe	S	Al	C	Ni	Nb	Si
1	90.9201	-0.0081	-14.8573	1.1723	0.0465	0.0158	1.4768
2	89.5990	-0.0075	-13.1117	1.1451	0.0453	0.0152	1.4594
AVG	90.2645	-0.0078	-13.9845	1.1592	0.0460	0.0155	1.4681
<i>SD</i>	<i>0.94121</i>	<i>0.00038</i>	<i>1.23429</i>	<i>0.01950</i>	<i>0.00071</i>	<i>0.00044</i>	<i>0.01228</i>
<i>SD%</i>	<i>1.04</i>	<i>4.93</i>	<i>8.83</i>	<i>1.72</i>	<i>1.54</i>	<i>2.94</i>	<i>0.84</i>

	Cr	V	Mn	Mo	W	P	Cu
1	0.8296	0.0258	21.5067	0.1688	0.0001	0.0581	0.1170
2	0.8159	0.0261	21.0527	0.1659	0.0001	0.0563	0.1153
AVG	0.8228	0.0259	21.2802	0.1673	0.0001	0.0572	0.1161
<i>SD</i>	<i>0.00871</i>	<i>0.00022</i>	<i>0.32031</i>	<i>0.00206</i>	<i>0.00000</i>	<i>0.00122</i>	<i>0.00126</i>
<i>SD%</i>	<i>1.16</i>	<i>0.83</i>	<i>1.51</i>	<i>1.23</i>	<i>0.00</i>	<i>2.14</i>	<i>1.08</i>

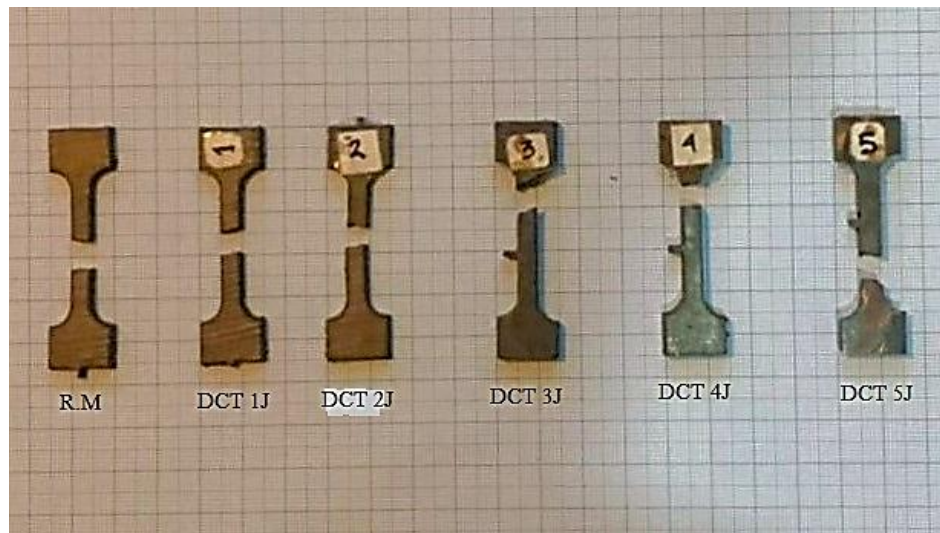
	Ti	N	B	Pb	Sb	Ca	Hg
1	0.0194	0.1771	0.0059	0.0058	0.0891	0.0005	0.0001
2	0.0193	0.1740	0.0058	0.0064	0.0889	0.0004	0.0001
AVG	0.0194	0.1755	0.0059	0.0061	0.0890	0.0004	0.0001
<i>SD</i>	<i>0.00009</i>	<i>0.00219</i>	<i>0.00004</i>	<i>0.00043</i>	<i>0.00019</i>	<i>0.00003</i>	<i>0.00000</i>
<i>SD%</i>	<i>0.46</i>	<i>1.25</i>	<i>0.70</i>	<i>7.14</i>	<i>0.21</i>	<i>8.00</i>	<i>0.00</i>

	Sn	Co
1	0.0286	0.0225
2	0.0278	0.0222
AVG	0.0282	0.0224
<i>SD</i>	<i>0.00037</i>	<i>0.00024</i>
<i>SD%</i>	<i>2.04</i>	<i>1.08</i>



INDONESIA OFFICE & FACTORY : Jl. KH. Hasyim As'ari By Pass Selatan Klaten 57417, Jateng - Indonesia
 Phone : (0272) 324208, 324038, Fax. (324213), E-mail : itokohci@indosat.net.id
CS Dipinjam dari CS Corporation, Saitama, Japan
 Phone : 81 482 248 401, Fax : 81 482 242070

2. Lampiran Hasil Uji Kekuatan Tarik



3. Lampiran Hasil Uji Kekerasan

