



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KETAHANAN KOROSI SUMURAN BAJA TAHAN KARAT AISI  
430 HASIL DEFORMASI PLASTIS CANAI HANGAT**

**SKRIPSI**

**TERRY ATMAJAYA  
0806315995**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JANUARI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KETAHANAN KOROSI SUMURAN BAJA  
TAHAN KARAT AISI 430 HASIL DEFORMASI  
PLASTIS CANAI HANGAT**

**SKRIPSI**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik**

**TERRY ATMAJAYA**

**0806315995**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**JANUARI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Terry Atmajaya**

**NPM : 0806315995**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 20 Januari 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Terry Atmajaya  
NPM : 0806315995  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Ketahanan Korosi Sumuran Baja Tahan Karat  
AISI 430 Hasil Deformasi Plastis Canai Hangat.

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Rini Riastuti

Penguji 1 : Dr. Ir.Dedi Priadi, DEA.

Penguji 2 : Dra. Sari Katili, M.S.



(Terry) (Rini) (Dedi) (Sari)

Ditetapkan : Depok, Januari 2012

## KATA PENGANTAR

Pertama-tama, penulis mengucapkan syukur kepada Allah SWT karena berkat restu, nikmat dan bimbingan-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik tanpa adanya hambatan yang cukup berarti dalam pengujian sampai akhirnya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka untuk memenuhi salah satu syarat untuk menggapai gelar Sarjana Teknik (S.T) jurusan Metalurgi dan Material di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

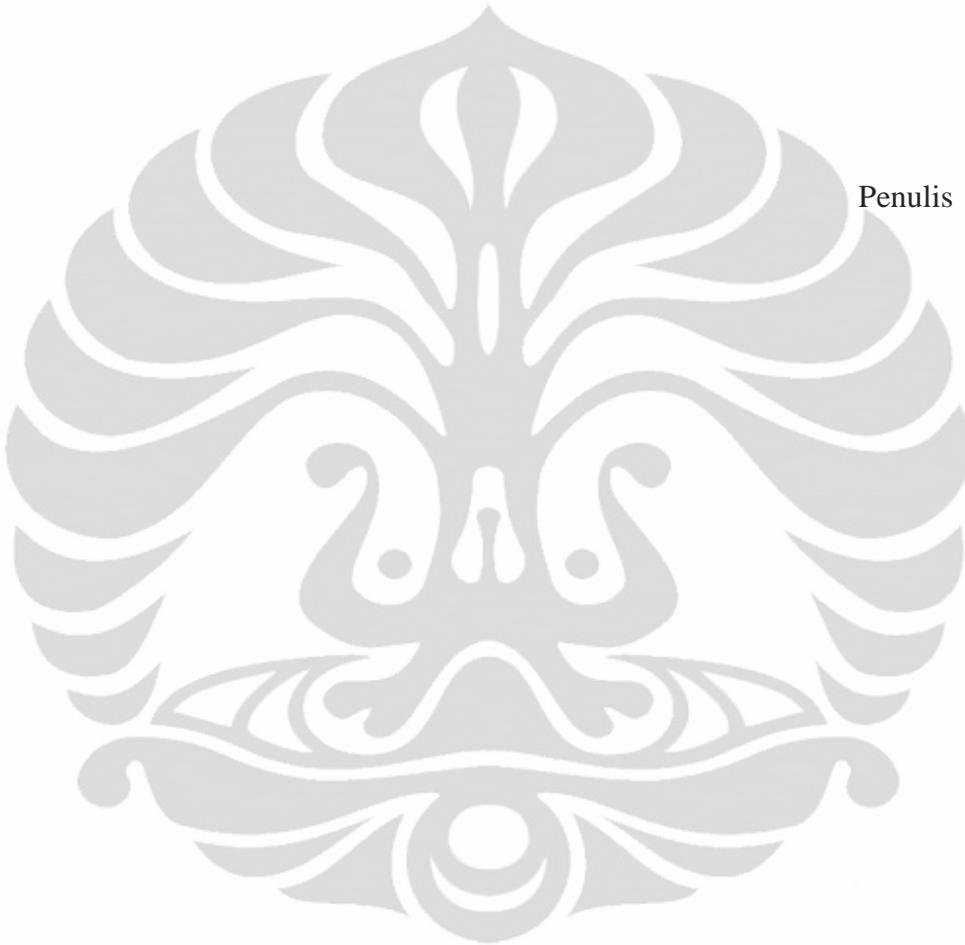
Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan masa perkuliahan dan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Rini Riastuti, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan Penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
3. Badrul Munir, Ph.D, selaku Pembimbing Akademis Penulis selama menempuh studi di Teknik Metalurgi dan Material.
4. Semua dosen beserta karyawan yang ada di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
5. Orang tuaku Amiruddin dan Jusmiarti, orang tua nomor satu di dunia, beserta kakak dan adikku Thesa Amijayanti dan Tiara Rizki Aulia yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan materil yang tak henti-hentinya. Penulis persembahkan skripsi ini untuk mereka.
6. Hariansyah Permana, Kholilah Saadah, Cyintia Anindita dan Dean Agasa Ardian selaku rekan kerja yang telah banyak membantu saya dalam penelitian ini.
7. Rekan-rekan Metalurgi 2008 atas doa dan dukungannya.
8. Dan semua pihak yang tak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata, Penulis ingin menghaturkan ucapan termakasih sebesar-besarnya pada seluruh pihak, baik yang telah disebut maupun tidak. Harapannya dengan adanya skripsi ini dapat memicu semangat baik untuk diri penulis maupun untuk semua pihak dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Januari 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini, :

Nama : Terry Atmajaya  
NPM : 0806315995  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non-eksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Studi Ketahanan Korosi Sumuran Baja Tahan Karat AISI 430 Hasil  
Deformasi Plastis Canai Hangat**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Nonekklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia atau formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : 20 Januari 2012

Yang menyatakan

( Terry Atmajaya )

## ABSTRAK

Nama : Terry Atmajaya  
NPM : 0806315995  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Ketahanan Korosi Sumuran Baja Tahan Karat  
AISI 430 Hasil Deformasi Plastis Canai Hangat.

Pada industri yang berhubungan dengan air laut dimana pada lingkungan tersebut banyak mengandung ion  $Cl^-$  sebagai pemicu terjadinya korosi sumuran. Pemilihan material merupakan hal yang sangat penting untuk membuat fasilitas-fasilitas struktural. Material *Stainless Steel* merupakan pilihan utama dalam membuat fasilitas ini. Material *Stainless Steel* AISI 430 mempunyai sifat mekanis dan ketahanan korosi yang cukup baik.

Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh canai hangat terhadap sifat mekanis dan ketahanan korosi sumuran *Stainless Steel* AISI 430. Penelitian dilakukan dengan proses canai hangat untuk melihat sifat mekanis *Stainless Steel* 430 dan metode *immersed solution* serta *weight loss* untuk menguji ketahanan korosi sumurannya. Hasil dari penelitian ini dapat menggambarkan sifat *Stainless Steel* AISI 430 saat digunakan sebagai material dasar fasilitas-fasilitas yang berada pada lingkungan yang kaya ion  $Cl^-$ .

*Stainless Steel* AISI 430 ini memiliki temperatur transisi karena berstruktur *Body Center Cubic* (BCC). Tetapi memiliki ketahanan terhadap serangan ion  $Cl^-$  yang tinggi. Adanya temperatur transisi ini sangat membahayakan bagi fasilitas struktural. Hasil dari penelitian ini merupakan tahap awal, sebagai bahan masukan untuk melakukan upaya peningkatan sifat mekanis *Stainless Steel* AISI 430 dan melihat pengaruh canai hangat terhadap ketahanan korosi sumuran *Stainless Steel* AISI 430 ini.

Kata kunci: *Stainless Steel* AISI 430, korosi sumuran, canai hangat, kekuatan, klorida, air laut.

## ABSTRACT

Name : Terry Atmajaya  
NPM : 0806315995  
Major : Metallurgy and Material Engineering  
Title : Study of Pitting Corrosion Resistance of Warm-Rolled Stainless Steel AISI 430

In industries associated with the sea water in which the environment contains a lot of  $\text{Cl}^-$  ion, as a trigger of pitting corrosion, material selection is very important to make structural facilities. Stainless Steel is the good choice to making this facilities. Stainless Steel AISI 430 having good mechanical properties and corrosion resistance

This study aims to see the effect of warm rolled on the mechanical properties and pitting corrosion resistance of Stainless Steel AISI 430. Research carried out by the warm-rolled to see mechanical properties of Stainless Steel AISI 430 and immersed solution method and weight loss to test pitting corrosion resistance. The results of this study can describe the properties of Stainless Steel AISI 430 when used as basic material in facilities which contain a lot of  $\text{Cl}^-$  ions.

The existence of this transition temperature is very dangerous for structural facilities because it's structure is Body Centered Cubic (BCC). But, this material have good chloride-stress corrosion cracking resistance. The results of this study is an early stage, as input to make efforts to improve the mechanical properties of Stainless Steel AISI 430 and see the effect of warm rolled against pitting corrosion resistance of Stainless Steel AISI 430.

Key words: Stainless Steel AISI 430, pitting corrosion, warm rolled, strength, chloride, sea water.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....	3
1.4.1 Material .....	3
1.4.2 Parameter Penelitian.....	3
1.4.3 Tempat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
2.1 Baja Tahan Karat.....	6
2.1.1 Baja Tahan Karat Feritik AISI 430 .....	10
2.2 Pengaruh Deformasi Plastis.....	14
2.3 Pengaruh Besar Butir terhadap Sifat Mekanis .....	17
2.4 Mekanisme Penguatan dengan Penghalusan Butir.....	18
2.5 Proses Canai .....	19
2.6 <i>Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)</i> .....	20

2.6.1 Canai Hangat ( <i>Warm Rolling</i> ).....	21
2.6.2 <i>Deformation Band</i> .....	22
2.6.3 <i>Strain Rate</i> .....	23
2.7 <i>Recovery, Recrystalilization, dan Grain Growth</i> .....	24
2.7.1 <i>Recovery</i> .....	24
2.7.2 <i>Recrystalilization</i> .....	25
2.7.2.1 <i>Dinamic Recrystalilization</i> .....	26
2.7.2.2 <i>Static Recrystalilization</i> .....	27
2.7.3 <i>Grain Growth</i> .....	27
2.7.4 <i>Sub-Grain</i> .....	28
2.8 Pengaruh Pendinginan Cepat pada Sifat Mekanis Baja.....	28
2.9 Korosi Sumuran pada <i>Stainless Steel AISI 430</i> .....	29
2.9.1 Mekanisme Korosi Sumuran.....	30
2.9.1 Evaluasi Korosi Sumuran.....	33
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>34</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	34
3.2 Alat dan Bahan .....	35
3.2.1 Alat.....	35
3.2.2 Bahan.....	35
3.3 Prosedur Penelitian.....	36
3.3.1 Pemilihan Material .....	36
3.3.2 Preparasi Benda Uji.....	36
3.3.3 Proses TMCP dan <i>Warm Rolling</i> .....	37
3.3.4 Pengamatan Metalografi .....	39
3.3.5 Perhitungan Besar Butir .....	46
3.3.5.1 Perhitungan Besar Butir <i>Equiaxed</i> .....	46
3.3.5.2 Perhitungan Besar Butir <i>Non-equiaxed</i> .....	48
3.3.7 Pengujian Nilai Kekerasan .....	49
3.3.8 Pengujian <i>Immersed Solution</i> .....	50
3.3.9 Pengujian <i>Weight Loss</i> .....	51
3.3.10 Pengamatan <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> .....	52

3.3.11 Pengujian <i>X-Rays Diffraction</i> (XRD) .....	54
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>58</b>
4.1 Hasil Uji Komposisi .....	58
4.2 Pengukuran Benda Uji.....	58
4.3 Hasil Pengamatan Metalografi .....	60
4.4 Ukuran Butir Ferit .....	66
4.4.1 Pengukuran Diameter Butir Ferit .....	66
4.5 Hasil Pengujian Kekerasan.....	67
4.6 Hasil Pengamatan SEM QBSD .....	69
4.7 Hasil Pengujian <i>X-rays Diffractometer</i> .....	72
4.8 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan .....	73
4.9 Hasil Uji Celup dan Kehilangan Berat .....	74
4.9.1 Pengaruh Ukuran Butir terhadap Laju Korosi.....	77
4.9.2 Evaluasi Korosi Sumuran.....	79
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>81</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>82</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>85</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Pengaruh Unsur Paduan pada Sifat <i>Stainless Steel</i> .....	7
Tabel 2.2 Sifat <i>Stainless Steel</i> .....	10
Tabel 2.3 Komposisi Baja Tahan Karat Feritik AISI 430 .....	11
Tabel 2.4 Sifat Mekanis Baja Tahan Karat Feritik .....	12
Tabel 3.1 Keuntungan dan Kerugian Pemolesan Elektrolit Kimia.....	42
Tabel 3.2 Kategori <i>Corrosion Rate</i> Standar NACE .....	52
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji.....	59
Tabel 4.2 Perhitungan Laju Regangan Tiap Sampel .....	59
Tabel 4.3 Diameter Rata-rata tiap Benda Uji .....	60
Tabel 4.4 Nilai Kekerasan Benda Uji.....	68
Tabel 4.5 Nilai Kekerasan Fasa ‘Putih’ dan Fasa ‘Hitam’ .....	69
Tabel 4.6 Konversi Nilai Kekerasan ke Kekuatan .....	73
Tabel 4.7 Perhitungan Nilai Laju Korosi (mpy) Tiap Sampel.....	75
Tabel 4.8 Ukuran Butir Tiap Benda Uji dan Nilai Laju Korosi Sumuran .....	77
Tabel 4.9 Diameter Lubang Sumuran pada Benda Uji O .....	79

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Self-repairing</i> Lapisan Tipis <i>Chromium Oxide</i> .....	6
Gambar 2.2	<i>Stainless Steel Family</i> .....	7
Gambar 2.3	Diagram Schaeffler-Delong .....	8
Gambar 2.4	Grafik Uji Tarik Berbagai Jenis <i>Stainless Steel</i> .....	9
Gambar 2.5	Grafik Ketangguhan berbagai <i>Stainless Steel</i> .....	9
Gambar 2.6	Ilustrasi Sensitisasi.....	11
Gambar 2.7	Diagram Fasa Biner Fe-Cr.....	12
Gambar 2.8	Diagram Fasa Terner Fe-Cr-C pada 1000°C.....	13
Gambar 2.9	Diagram Fasa Terner Fe-Cr pada 900°C.....	13
Gambar 2.10	Literatur Foto Mikro <i>Stainless Steel 430</i> .....	14
Gambar 2.11	Mekanisme <i>Roll Flattening</i> .....	16
Gambar 2.12	Ilustrasi Pergerakan Dislokasi.....	16
Gambar 2.13	Ilustrasi Bagaimana Batas Butir Menghalangi Dislokasi.....	17
Gambar 2.14	Nilai <i>Yield Strength</i> pada Variasi Ukuran Butir.....	18
Gambar 2.15	Skema Mesin <i>Rolling</i> .....	19
Gambar 2.16	Perubahan Mikrostruktur Hasil <i>Rolling</i> .....	19
Gambar 2.17	Perbedaan Mikrostruktur Proses Canai Hangat dan TMCP.....	21
Gambar 2.18	Pembentukan <i>Deformation Band</i> akibat Deformasi Canai ....	22
Gambar 2.19	Pengaruh <i>Strain Rate</i> terhadap Kurva Uji Tarik .....	23
Gambar 2.20	Skematik Proses Anil .....	24
Gambar 2.21	Proses <i>Annealing</i> dan Perubahan Sifat Mekanis.....	26
Gambar 2.22	Foto Mikro <i>Stainless Steel AISI 430</i> yang Mengalami Rekristalisasi Dinamis .....	27
Gambar 2.23	Tahapan pada <i>Quench</i> dengan Media Air .....	29
Gambar 2.24	Bentuk-bentuk Lubang Korosi Sumuran .....	30
Gambar 2.25	Mekanisme Pecahnya Lapisan Pasif Lokal Akibat Ion $Cl^-$ .....	31
Gambar 2.26	Mekanisme Proses Autokatalitik pada Korosi Sumuran.....	32
Gambar 2.27	Standar Pemeringkatan untuk Lubang Sumuran .....	33
Gambar 3.1	Dagram Alir Pengujian .....	34
Gambar 3.2	Alat Pengujian OES .....	36

Gambar 3.3 Ilustrasi Benda Uji .....	37
Gambar 3.4 Benda Uji yang Akan Dicanai Hangat .....	37
Gambar 3.5 Mesin <i>Furnace</i> Carbolite .....	38
Gambar 3.6 Mesin OnoRoll.....	38
Gambar 3.7 Benda Uji Hasil <i>Warm Rolling</i> .....	39
Gambar 3.8 Proses <i>Mounting</i> .....	40
Gambar 3.9 Sampel Copper yang Diamplas.....	41
Gambar 3.10 Arah Sinar pantul yang Mengenai Permukaan Sampel.....	41
Gambar 3.11 Sampel Copper yang Dipoles .....	43
Gambar 3.12 Hubungan Kuat Arus dan Tegangan dalam Etsa .....	44
Gambar 3.13 Mikroskop Optik .....	46
Gambar 3.14 Lingkaran Metode <i>Intercept Heyn</i> .....	47
Gambar 3.15 Skema Pengambilan Foto Mikro Butir <i>Elongated</i> .....	48
Gambar 3.16 Alat Uji Vickers .....	49
Gambar 3.17 Skematis Pengujian Kekerasan dengan Metode Vickers .....	50
Gambar 3.18 Distorsi oleh Indentor Piramid Intan .....	50
Gambar 3.19 Pengujian Celup .....	51
Gambar 3.20 Alat SEM.....	53
Gambar 3.21 Spektrum Sinar-X dari Berbagai Unsur Hasil EDX .....	54
Gambar 3.22 Alat Uji XRD Shimadzu .....	57
Gambar 4.1 Hasil Uji OES pada Benda Uji .....	58
Gambar 4.2 Benda Uji Hasil Deformasi Canai Hangat .....	58
Gambar 4.3 Sampel Original Etsa Kalling #1 Perbesaran 200x .....	60
Gambar 4.4 Sampel Original Elektroetsa <i>Nitric Acid</i> Perbesaran 1000x .....	61
Gambar 4.5 Sampel X .....	62
Gambar 4.6 Sampel Y .....	64
Gambar 4.7 Sampel Z .....	65
Gambar 4.8 Skema Pengambilan Titik Jejak pada Benda Uji .....	73
Gambar 4.9 Hasil Foto SEM Benda Uji <i>Original</i> .....	70
Gambar 4.10 Foto Uji Celup.....	75
Gambar 4.11 Foto Benda Uji Original yang Mengalami <i>Pitting</i> .....	76
Gambar 4.12 Benda Uji Sebelum Dilakukan <i>Immersed Test</i> .....	77

Gambar 4.13 Permukaan Benda Uji..... 78  
Gambar 4.14 Tampak Samping Lubang *Pitting* Sampel Z..... 78

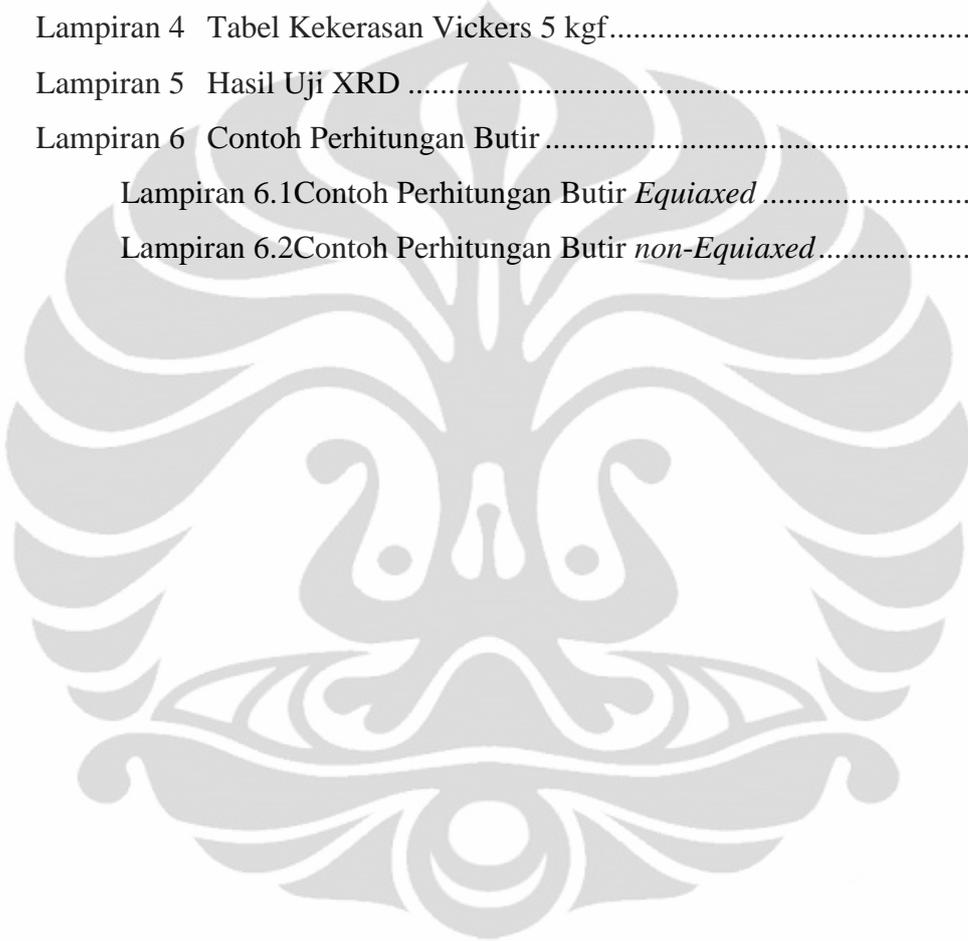


## DAFTAR GRAFIK

Grafik 1.1 Pengaruh Unsur Paduan pada Sifat <i>Stainless Steel</i> .....	9
Grafik 2.1 Sifat <i>Stainless Steel</i> .....	9
Grafik 4.1 Ukuran Butir Rata-rata terhadap Deformasi.....	67
Grafik 4.2 Nilai Kekerasan Tiap Benda Uji.....	68
Grafik 4.3 Hasil Pengujian SEM QBSD Benda Uji O.....	70
Grafik 4.4 Hasil Pengujian SEM QBSD Benda Uji X (50%).....	71
Grafik 4.5 Hasil Pengujian XRD Benda Uji X.....	72
Grafik 4.6 Perbandingan Nilai Kekuatan Tiap Benda Uji .....	74
Grafik 4.7 Laju Korosi Sumuran Benda Uji O terhadap Benda Uji Hasil Canai Hangat 650°C.....	76
Grafik 4.8 Ukuran Butir Benda Uji terhadap laju Korosi .....	77
Grafik 4.7 Grafik Literatur Ukuran Butir terhadap Laju Korosi .....	79

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Uji Komposisi.....	86
Lampiran 2 Grafik Rekaman Temperatur dan Waktu Proses Canai Hangat .	87
Lampiran 3 Tabel Konversi Kekerasan.....	89
Lampiran 4 Tabel Kekerasan Vickers 5 kgf.....	92
Lampiran 5 Hasil Uji XRD .....	95
Lampiran 6 Contoh Perhitungan Butir .....	97
Lampiran 6.1 Contoh Perhitungan Butir <i>Equiaxed</i> .....	97
Lampiran 6.2 Contoh Perhitungan Butir <i>non-Equiaxed</i> .....	98



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Baja memegang peranan penting sebagai material rekayasa dalam peradaban kemajuan manusia. Indeks konsumsi baja sering dijadikan sebagai salah satu indikator tingkat kemajuan/kemakmuran suatu negara<sup>[1]</sup>. Baja digunakan mulai dari peralatan yang sederhana seperti peralatan rumah tangga hingga peralatan dengan teknologi tinggi seperti *tool steel*. Dengan meningkatnya penggunaan baja maka dibutuhkan baja dengan karakteristik yang sesuai dengan aplikasinya.

Pada industri yang berhubungan dengan air laut, pemilihan material merupakan salah satu isu penting untuk keperluan konstruksi. Selain mengutamakan sifat mekanis yang baik, material yang digunakan juga harus tahan terhadap lingkungan korosi yang dalam hal ini banyak mengandung ion  $\text{Cl}^-$ . Material *Stainless Steel* sebagai pilihan utama sebagai material tahan karat dan juga mempunyai sifat mekanis yang baik merupakan alternatif utama dalam pemilihan material dalam aplikasi lingkungan air laut. Jenis *Stainless Steel* yang paling tahan terhadap lingkungan air laut adalah jenis Feritik dan Dupleks. *Stainless Steel Duplex* digunakan karena memiliki kekuatan dan ketangguhan yang paling baik daripada *Stainless Steel* lainnya. Selain itu ketahanan korosinya sangat bagus terutama terhadap *pitting corrosion*<sup>[2]</sup>. Kombinasi dari sifat-sifat tersebut menjadikan *Stainless Steel Duplex* cocok untuk aplikasi di lingkungan air laut. Namun, *Stainless Steel Duplex* ini relatif mahal harganya karena mengandung 20-30 % Cr dan 5-10 % Ni<sup>[2]</sup>.

Karena harganya yang relatif mahal, perlu adanya material alternatif yang bisa menyamai sifat *Stainless Steel Duplex*. Salah satu material yang juga memiliki ketahanan terhadap *pitting corrosion* adalah *Stainless Steel Ferritic* AISI 430. Karena *Stainless Steel Ferritic* AISI 430 ini berstruktur *body center cubic* (BCC) sehingga ketangguhannya relatif lebih rendah daripada *Stainless Steel Duplex* ataupun *Austenitic*. Untuk menggantikan penggunaan *Stainless Steel Duplex* pada lingkungan air laut, maka *Stainless Steel Ferritic* AISI 430 perlu pengembangan lebih lanjut terutama dari segi kekuatan dan ketangguhannya.

Salah satu metode yang digunakan adalah dengan menggunakan proses kontrol terhadap mikrostruktur pada saat proses manufaktur yang dapat dilakukan dengan menggunakan proses *Thermomechanical Control Process* (TMCP). Proses ini digunakan untuk mengecilkan ukuran butir ferit yang dapat memperbaiki sifat kekuatannya maupun ketangguhan dari baja<sup>[3]</sup>. Proses TMCP ini merupakan pengerjaan hangat (*warm working*) yang dilakukan pada temperatur kerja diantara pengerjaan panas dan pengerjaan dingin ( $500^\circ\text{C} - 800^\circ\text{C}$ ) sehingga material logam dapat menghasilkan struktur mikro yang lebih kecil. Deformasi yang terjadi dengan aplikasi temperatur pada rentang ini diharapkan tidak terlalu besar, seperti pada pengerjaan panas. Proses pengerjaan hangat (*warm working*) dapat menurunkan biaya produksi serta kualitas permukaan dan kontrol dimensionalnya terbukti lebih baik daripada pengerjaan panas<sup>[1,2]</sup>. Dengan metode TMCP ini diharapkan kekuatan *Stainless Steel Ferritic* AISI 430 dapat ditingkatkan dan ketahanan terhadap *pitting corrosion*-nya dapat dipertahankan.

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari perubahan mikrostruktur setelah dilakukan deformasi dengan temperatur canai hangat dan melihat pengaruhnya terhadap ketahanan korosi sumuran, serta mencari satu metode dan teknik yang tepat dalam peningkatan kinerja baja tahan karat feritik dalam aplikasi lingkungan yang banyak mengandung  $\text{Cl}^-$ . Dengan harapan metode ini bisa dilakukan untuk meningkatkan material alternatif dan membantu penghematan biaya perawatan.

### 1.2 Perumusan Masalah

Konsep dari penelitian ini adalah memperoleh sifat *Stainless Steel* AISI 430 yang lebih baik, khususnya kekuatan mekanis dan ketahanan korosi terhadap lingkungan yang banyak mengandung ion  $\text{Cl}^-$ , dengan metode canai hangat.

Masalah yang akan dikaji pada penelitian ini adalah melihat pengaruh material yang tidak dicanai hangat maupun yang dicanai hangat dengan deformasi. Material saat dicanai hangat akan di-*reheating* terlebih dahulu ke suhu  $1100^\circ\text{C}$ , ditahan selama 5 menit, kemudian diturunkan ke suhu deformasi yaitu  $650^\circ\text{C}$  kemudian didinginkan dengan air mengalir. Selama deformasi material akan mengalami *single pass* searah untuk mengetahui pengaruhnya terhadap ukuran butir ferit yang dihasilkan dan ketahanan terhadap korosi sumuran.

Parameter yang akan diberikan adalah variasi derajat deformasi 50%, 55%, dan 60%. Kemudian material akan mengalami uji celup menggunakan minimal 6%  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  untuk mengetahui pengaruh dari besar butir ferit yang dihasilkan pada proses canai hangat terhadap ketahanan korosi. Serta melihat pengaruh ukuran butir ferit terhadap sifat mekanis *Stainless Steel* AISI 430.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Studi pengaruh deformasi canai hangat terhadap sifat mekanis pada *Stainless Steel Ferritic* AISI 430.
2. Studi pengaruh variasi deformasi *warm rolling* terhadap ketahanan korosi sumuran pada *Stainless Steel Ferritic* AISI 430.

### 1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1.4.1 Material

Penelitian menggunakan material *Stainless Steel Ferritic* AISI 430 dengan komposisi 0.084% C, 18.7% Cr dan 0.09 Ni.

#### 1.4.2 Parameter Penelitian

Parameter yang divariabelkan:

- Besar deformasi : 50 %, 55 %, dan 60 %.
- Temperatur : *reheating* 1100°C, canai 650°C.
- Metode Deformasi : *single pass* searah.
- Media pendinginan : Air mengalir.
- Suhu Uji Korosi : Suhu Ruang
- Kecepatan *Stirring* : 5
- Waktu Uji Korosi : 74 jam

#### 1.4.3 Tempat Penelitian

Proses penelitian dilakukan di beberapa tempat, yaitu ;

1. Pengujian komposisi dilakukan di CMPFA Departemen Metalurgi dan Material.
2. Pengujian kekerasan Vickers dilakukan di BPPT Serpong dan PT FSCM Pulo Gadung.
3. Pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material dan BPPT Serpong.
4. Pengujian canai hangat dilakukan di Laboratorium TPB Departemen Metalurgi dan Material.
5. Pengujian korosi sumuran dilakukan di Laboratorium Korosi dan Ekstraksi dan Laboratorium Metalurgi Kimia Departemen Metalurgi dan Material.
6. Pengujian SEM dilakukan di CMPFA Departemen Metalurgi dan Material.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika ini dibuat agar konsep penulisan tersusun secara berurutan sehingga didapatkan kerangka dan alur pemikiran yang mudah dan praktis. Sistematika tersebut digambarkan dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan satu sama lain. Adapun sistematika penulisan laporan ini adalah sebagai berikut :

#### Bab 1 : Pendahuluan

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang dari penelitian yang dilakukan, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup, dan sistematika penulisan laporan.

#### Bab 2 : Dasar Teori

Dalam bab ini dijelaskan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini.

#### Bab 3 : Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, serta daftar alat dan bahan yang digunakan pada penelitian.

**Bab 4 : Hasil dan Pembahasan**

Bab ini berisi data-data hasil penelitian yang telah dilakukan dan analisisnya serta perbandingan terhadap hasil studi literatur.

**Bab 5 : Kesimpulan**

Bab ini berisi kesimpulan akhir dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

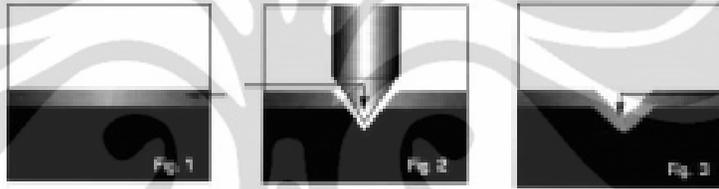


## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Baja Tahan Karat

Baja tahan karat adalah baja paduan (*iron-base*) yang mengandung minimal 11 % Cr, untuk mencegah pembentukan karat pada atmosfer<sup>[4]</sup>. Cr pada baja akan membentuk *chromium oxide film* pada permukaan baja<sup>[2]</sup>. Lapisan tipis oksida ini terbentuk dan dapat ‘menyembuhkan’ dirinya sendiri secara otomatis dengan adanya oksigen, selain itu kehadiran Cr dapat meningkatkan ketahanan terhadap abrasi, *cutting* atau permesinan<sup>[4]</sup>.



Gambar 2.1 *Self-repairing* Lapisan Tipis Chromium Oxide<sup>[2]</sup>

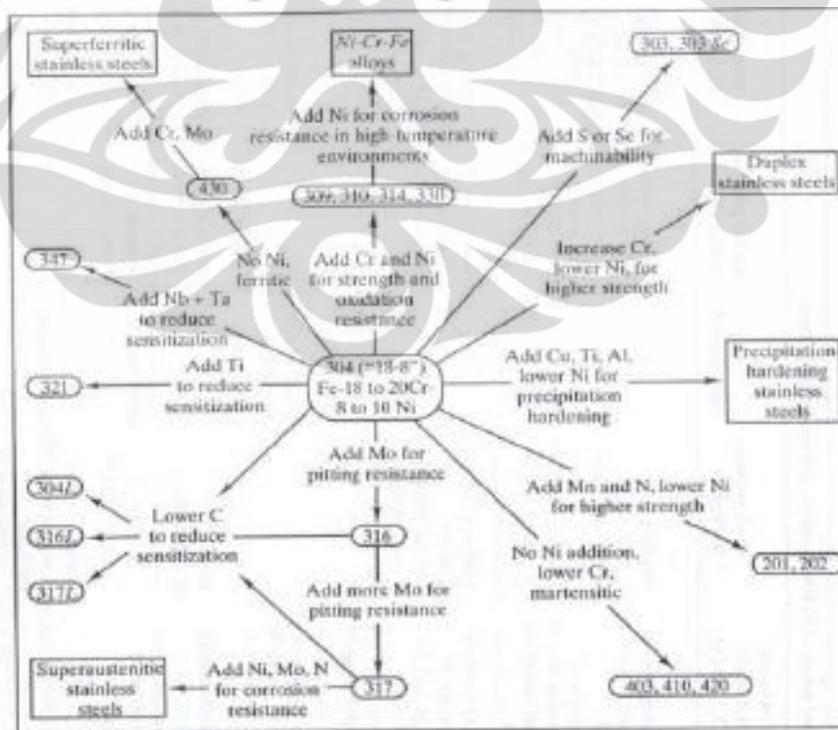
Elemen lain ditambahkan untuk meningkatkan karakteristik khusus seperti nikel, molibdenum, tembaga, titanium, aluminium, silikon, niobium, nitrogen, sulfur dan selenium. Unsur paduan ini berkontribusi terhadap :

- Pembentukan fasa *ferrite-austenite*
  - *Ferrite stabilizer* (contohnya : Cr, Mo, W, V)
  - *Austenite stabilizer* (contohnya : C, Cu, Ni, Mn, N)
- Pembentukan fasa kedua (*precipitate*) yang melibatkan unsur Cr, Mo, Cu, N
  - *Sigma phase*
  - *Chi phase*<sup>[2]</sup>

Efek penambahan unsur paduan terhadap sifat dari baja tahan karat dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

<i>Property</i>	C	Cr	Ni	S	Mn	Si	P	Cu	Mo	Se	Ti or Nb
<b><i>Corrosion Resistance</i></b>	-	ya	ya	tidak	-	-	ya	-	ya	-	-
<b><i>Mechanical Properties</i></b>	ya	ya	-	tidak	ya	ya	ya	ya	ya	-	ya
<b><i>High Temperature Resistance</i></b>	-	ya	ya	tidak	-	-	-	-	ya	-	ya
<b><i>Machinability</i></b>	tidak	tidak	-	ya	-	-	ya	-	-	ya	-
<b><i>Weldability</i></b>	tidak	tidak	-	tidak	ya	-	tidak	-	ya	-	ya
<b><i>Cold Workability</i></b>	tidak	tidak	tidak	-	-	-	ya	-	-	-	-

Tabel 2.1 Pengaruh Unsur Paduan pada Sifat *Stainless Steel*<sup>[2]</sup>

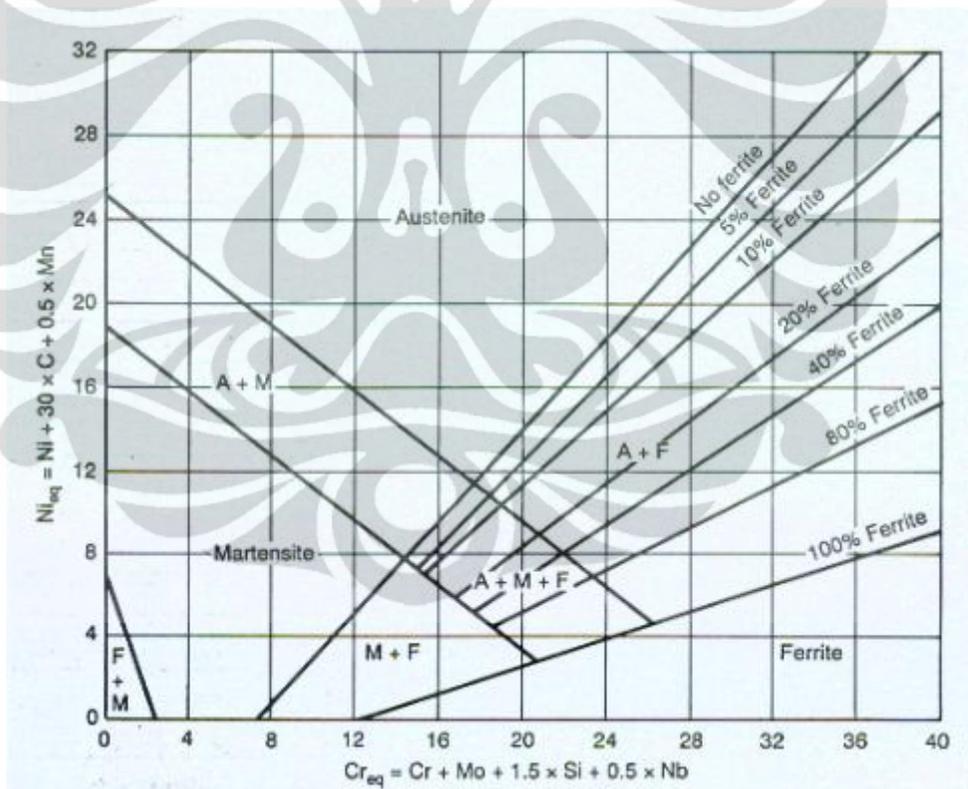


Gambar 2.2 *Stainless Steel Family*<sup>[4]</sup>

Berdasarkan mikrostrukturnya, baja tahan karat dibagi menjadi 5 kelompok, yaitu :

1. *Ferritic Stainless Steel* : 12-30 % Cr dan C rendah
2. *Martensitic Stainless Steel* : 12-17 % Cr dan 0,1-1,0 % C
3. *Austenitic Stainless Steel* : 17-25 % Cr dan 8-20 % Ni
4. *Duplex Stainless Steel* : 23-30 % Cr, 2,5-7 Ni , Ti,Mo
5. *Precipitation Hardening Stainless Steel* : bisa berbasis autenitik atau martensitik dengan penambahan Cu, Ti, Al, Mo, Nb atau N.

Mikrostruktur *Stainless Steel* (sangat tergantung dari komposisi) dapat diprediksi menggunakan diagram Schaeffler-Delong.



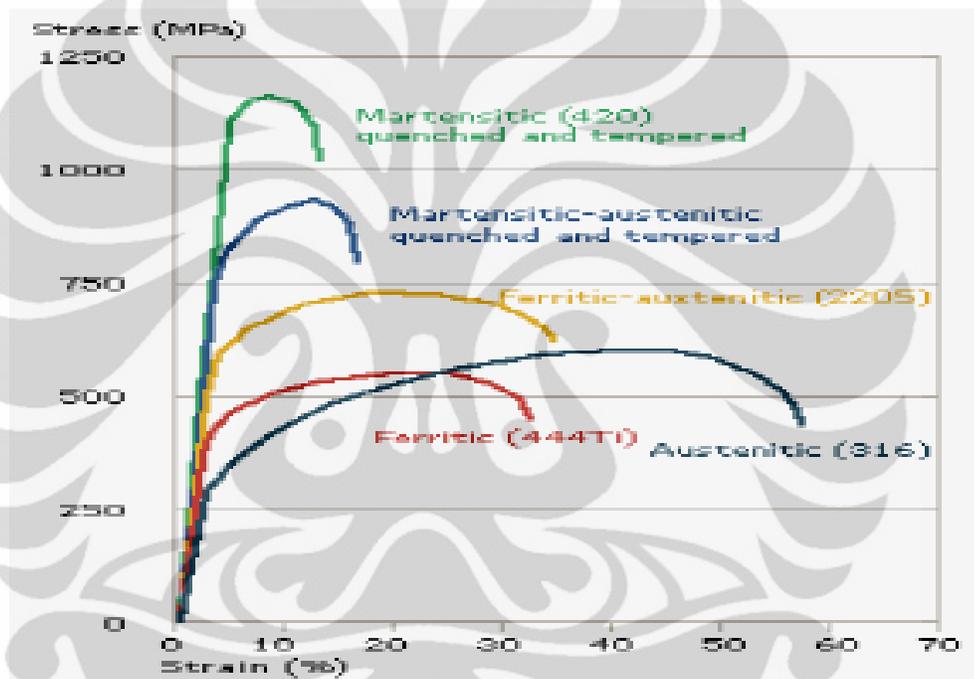
Gambar 2.3 Diagram Schaeffler-Delong<sup>[5]</sup>

Pada diagram Schaeffler-Delong, kita dapat menentukan termasuk jenis apakah suatu *Stainless Steel* tersebut hanya dengan menghitung *Chromium* dan *Nickel Equivalent*.

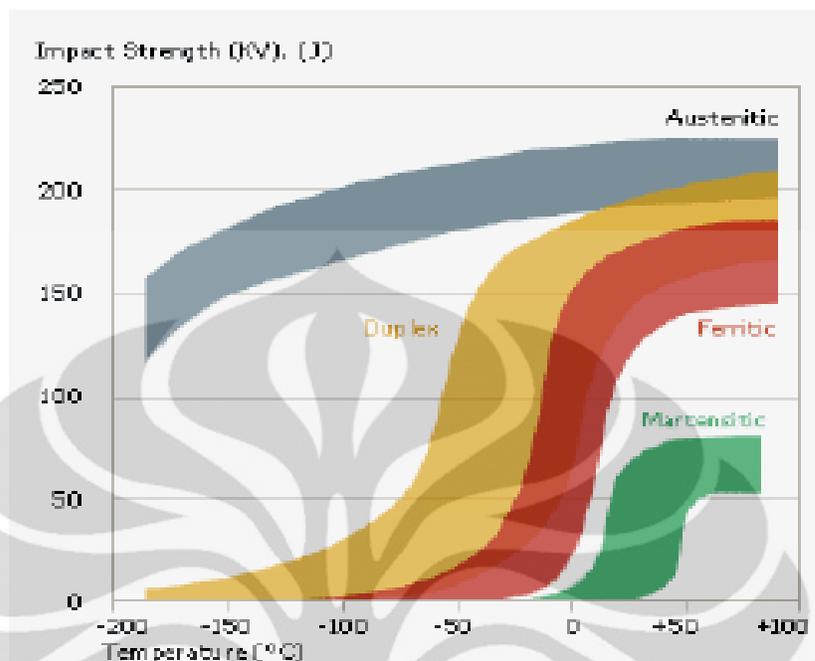
$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb \quad (2.1)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn \quad (2.2)$$

Kekuatan mekanis dan keuletan berbagai jenis baja tahan karat dapat dilihat pada diagram dibawah ini :



Gambar 2.4 Grafik Uji Tarik Berbagai Jenis *Stainless Steel*<sup>[2]</sup>.



Gambar 2.5 Grafik Ketangguhan berbagai *Stainless Steel*<sup>[2]</sup>.

Dari grafik ketangguhan, kita dapat mengetahui *Stainless Steel Austenitic* paling tangguh daripada *Stainless Steel* jenis lainnya. Hal ini dikarenakan *Stainless Steel* jenis Austenitik berstruktur FCC (*Face Center Cubic*).

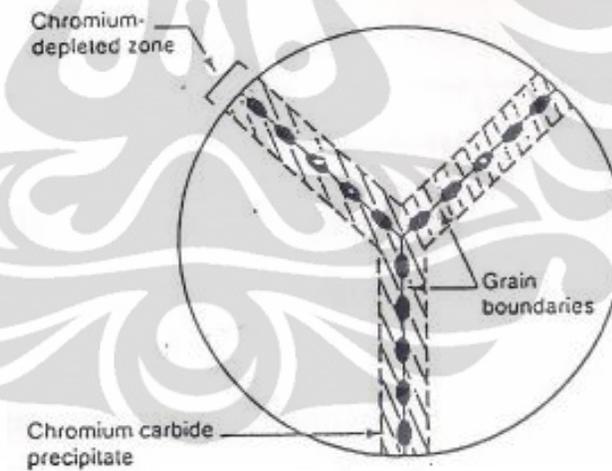
Tabel 2.2 Sifat *Stainless Steel*<sup>[2]</sup>.

Alloy Group	Magnetic Response <sup>1</sup>	Work Hardening Rate	Corrosion Resistance <sup>2</sup>	Hardenable
Austenitic	Generally No	Very High	High	By Cold Work
Duplex	Yes	Medium	Very High	No
Ferritic	Yes	Medium	Medium	No
Martensitic	Yes	Medium	Medium	Quench & Temper
Precipitation Hardening	Yes	Medium	Medium	Age Harden
Alloy Group	Ductility	High Temperature Resistance	Low Temperature Resistance <sup>3</sup>	Weldability
Austenitic	Very High	Very High	Very High	Very High
Duplex	Medium	Low	Medium	High
Ferritic	Medium	High	Low	Low
Martensitic	Low	Low	Low	Low
Precipitation Hardening	Medium	Low	Low	High

Baja tahan karat banyak digunakan pada berbagai aplikasi seperti industri kimia dan *power engineering*, industri makanan dan minuman, industri transportasi, arsitektur dan barang-barang konsumen contohnya barang elektronik. Umumnya baja tahan karat digunakan pada lingkungan yang mudah terkorosi dan juga membutuhkan sifat mekanis yang baik.

### 2.1.1 Baja Tahan Karat Feritik AISI 430

Baja tahan karat feritik dinamakan demikian karena struktur kristalnya adalah *body-center cubic* (BCC) sama seperti besi pada suhu ruang. Feritik bersifat magnetis dan dapat dikeraskan dengan perlakuan panas. Kekuatan *yield strength* dalam keadaan *annealed* berkisar antara 275 sampai 350 MPa (40-50 ksi)<sup>[6]</sup>, namun ketangguhannya dan *weldability* jelek serta rentan terhadap sensitisasi selama fabrikasi (Gambar 2.6).



Gambar 2.6 Ilustrasi Sensitisasi<sup>[18]</sup>

Sensitisasi ini terjadi pada rentang suhu  $600^{\circ}\text{--}800^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>, dimana terbentuk presipitat *chromium carbide* di batas butir. Selain itu sensitisasi ini menyebabkan terbentuknya *Chromium Depleted Zone* (CDZ), daerah dimana kekurangan atom Cr. Akibatnya, pada daerah ini sulit terbentuk lapisan pasif  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  sehingga rentan terhadap serangan korosi.

Namun, baja tahan karat feritik tahan terhadap *chloride-stress corrosion cracking*<sup>[2]</sup>, korosi atmosfer, dan oksidasi serta biaya yang relatif murah. Baja tahan karat feritik mengandung 11-30 % Cr, dengan sejumlah kecil elemen pembentuk austenite seperti karbon, nitrogen dan nikel.

Komposisi dari baja tahan karat AISI 430 adalah sebagai berikut :

**Tabel 2.3** Komposisi Baja Tahan Karat Feritik AISI 430<sup>[4]</sup>.

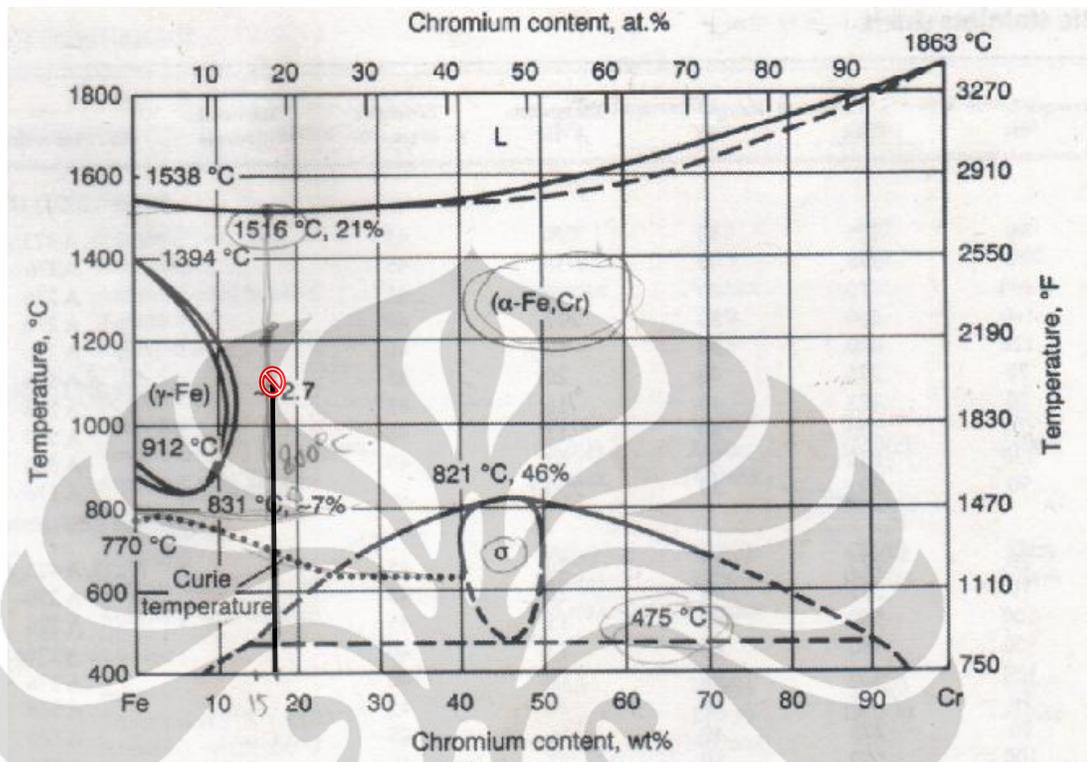
<i>Material Specification</i>	<i>Composition</i>										
	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	Cu	P	S	N	Ti
AISI 430	0.12	16-18	-	0.75	1.0	-	-	0.04	0.3	-	-

Kehadiran unsur paduan pada baja tahan karat feritik ini untuk meningkatkan sifat-sifat tertentu. *Carbon* berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja. *Chromium* dan *Mangan* berfungsi untuk meningkatkan ketahanan korosi dan oksidasi baja serta meningkatkan hardenability baja. Sedangkan *Silicon* berfungsi untuk meningkatkan kekuatan ferit<sup>[4]</sup>.

Sifat mekanis baja tahan karat feritik dapat dilihat pada table di bawah ini :

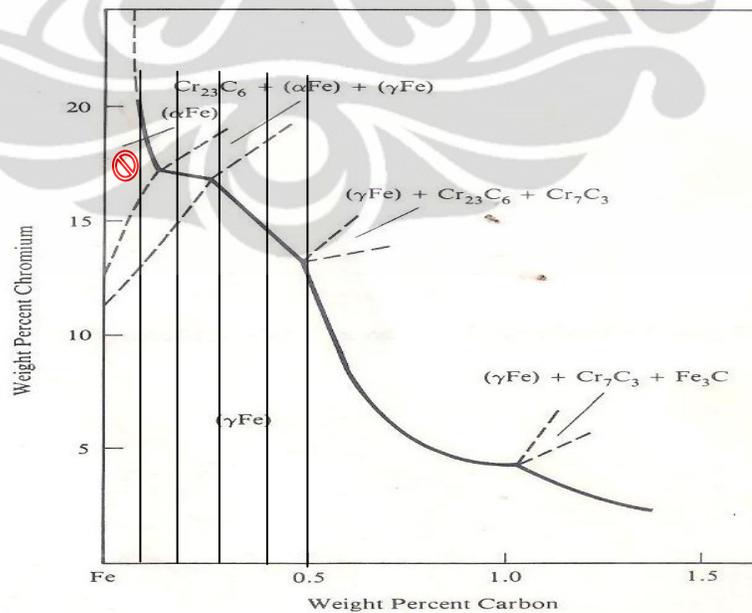
**Tabel 2.4** Sifat Mekanis Baja Tahan Karat Feritik<sup>[4]</sup>.

<i>AISI type</i>	<i>condition</i>	<i>Rockwell hardness</i>	<i>Yield Strength</i>	<i>Ultimate Strength</i>	<i>Elongation in 50.8 mm</i>	<i>Reduction of are, %</i>	<i>Charpy, Impact strength</i>
430	<i>annealed</i>	82 HRB	310 MPa	517 MPa	30	65	217 J

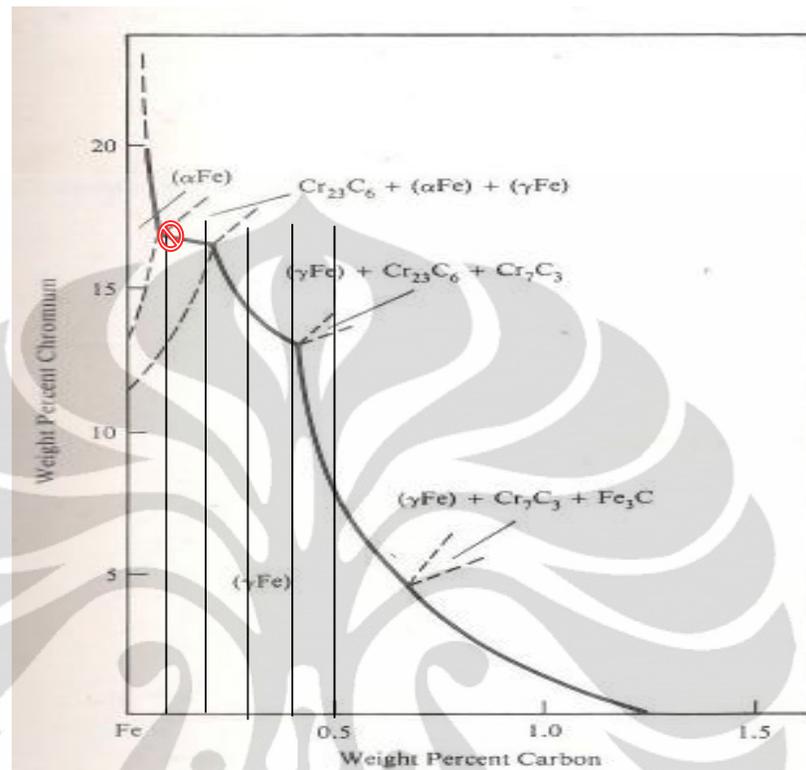


Gambar 2.7 Diagram fasa biner Fe-Cr<sup>[4]</sup>

C-Cr-Fe (Fe) isothermal section at 1100 °C [88Ray]



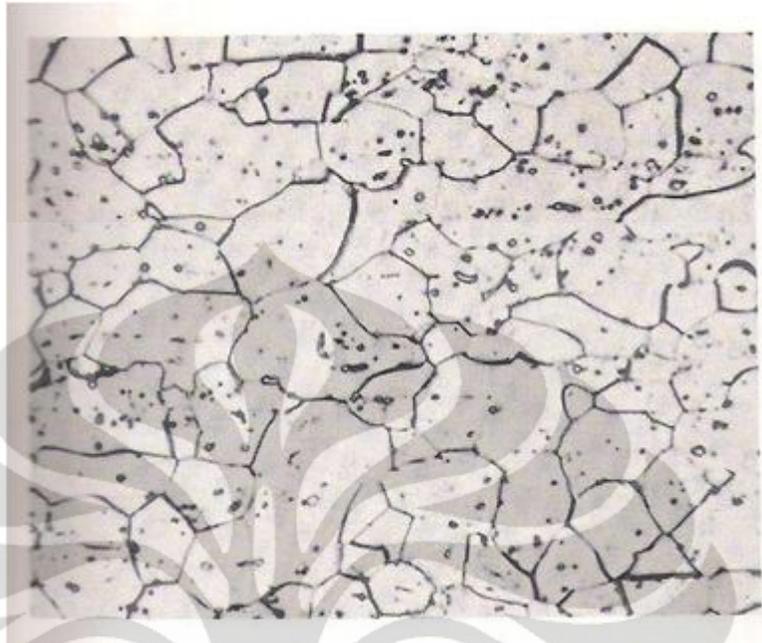
Gambar 2.8 Diagram Terner Fe-Cr-C pada 1100°C<sup>[4]</sup>



**Gambar 2.9** Diagram Ternern Fe-Cr-C pada suhu 900°C<sup>[4]</sup>

Pada Gambar 2.6 dan 2.7, terlihat bahwa ketika Stainless Steel AISI 430 dipanaskan ke suhu 1100°C, dengan kandungan C 0.084% dan Cr 18%, fasa yang didapat adalah ferit. Sehingga pada suhu 1100°C, dipastikan tidak ada presipitat karbida. Pada Gambar 2.8, yang menerangkan fasa-fasa yang terbentuk pada suhu 900°C dengan C 0.084% dan Cr 18%, daerah ferit semakin sempit. Sementara daerah presipitat karbida makin meluas. Sehingga pada rentang suhu dibawah 900°C, rentan terbentuk karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (sensitisasi).

Baja tahan karat feritik tipe 430 merupakan golongan *intermediate-chromium alloys* dengan rentang persentase 16-18% Cr<sup>[7]</sup>. Sering digunakan untuk *automotive trim*, peralatan memasak, *heat exchanger* dan *tube exchanger*.



**Gambar 2.10** Literatur Foto Mikro *Stainless Steel* 430 yang Dianil pada Suhu 845°C (1550°F) dan Didinginkan dengan Udara. Struktur Terdiri dari Butir Ferit yang *Equiaxed* dan Partikel *Chromium Carbide* yang Terdispersi Secara Acak. Zat Etsa Vilella. Perbesaran 500x<sup>[4]</sup>

## 2.2 Pengaruh Deformasi Plastis

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau dimensi dari suatu benda akibat suatu gaya mekanik atau beban. Deformasi dibagi menjadi 2 jenis, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis ialah deformasi yang diberikan kepada suatu benda dimana beban atau gaya yang diberikan masih dibawah titik elastisnya sehingga perubahan bentuk dari benda tersebut bersifat sementara. Benda akan kembali ke bentuk semula apabila beban atau gaya tersebut tidak lagi diaplikasikan. Sedangkan deformasi plastis adalah deformasi yang diberikan kepada benda yang mengakibatkan perubahan bentuk secara permanen karena beban atau gaya yang diberikan telah melebihi batas elastis dari benda tersebut.

Pada pengerjaan dingin maupun panas, deformasi yang diberikan adalah deformasi plastis. Pada pengerjaan dingin, hanya terjadi deformasi plastis tanpa diikuti oleh rekristalisasi. Sedangkan pada pengerjaan panas, deformasi plastis dan rekristalisasi terjadi secara bersamaan.

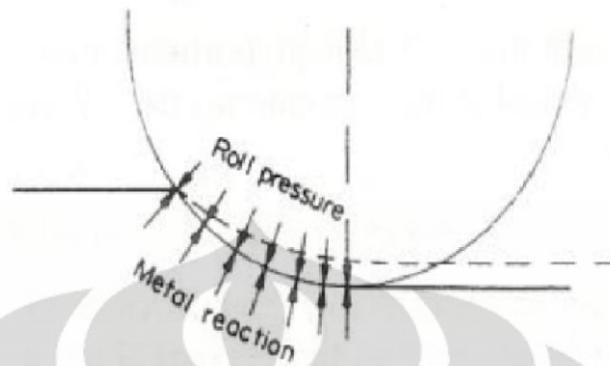
Karakteristik dari pengerjaan panas adalah sebagai berikut :

1. Secara umum permukaannya lebih halus
2. Gaya yang dibutuhkan kecil
3. Energi panas yang dibutuhkan lebih besar
4. Kekuatan dan ketangguhannya rendah
5. Struktur butirnya bulat (*equiaxed*)
6. Sifat setelah pengerjaan hampir sama dengan sebelum pengerjaan.
7. Porositas dapat dieliminasi
8. Terjadi oksidasi karena adanya panas
9. Dimensi akhir susah dikendalikan

Karakteristik pengerjaan dingin adalah sebagai berikut :

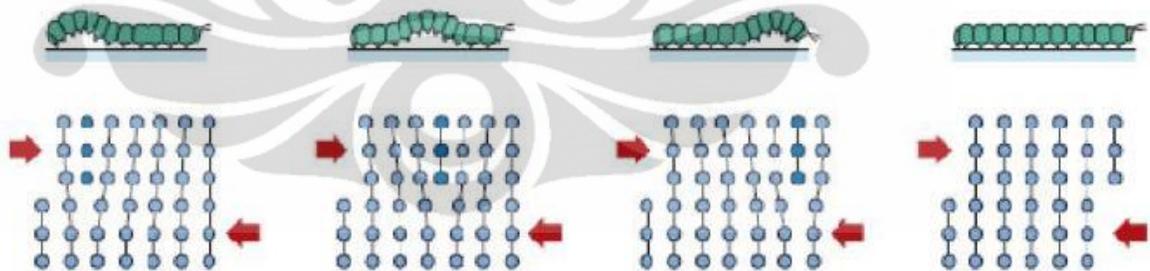
1. Memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi
2. Tidak memerlukan panas
3. Gaya deformasi yang dibutuhkan lebih besar.
4. Ketangguhan dan keuletannya rendah
5. Struktur butirnya lebih pipih (*elongated*)
6. Butuh proses lanjutan untuk menghilangkan tegangan sisa, seperti *annealing*, untuk meningkatkan ketangguhan dan keuletannya kembali.
7. Permukaan logam lebih bersih karena tidak terjadi oksidasi.
8. Dimensi akhir lebih baik.

Pada mesin *roll*, sering terjadi fenomena *roll flattening*. Ketika sampel uji masuk ke dalam *roller*, terjadi interaksi antara *roller* dengan material, *roller* melakukan tekanan dan material akan memberikan reaksi. Jika benda uji memiliki kekerasan yang cukup tinggi, reaksi yang diberikan benda uji juga akan meningkat yang mengakibatkan *roller* akan terdeformasi elastik<sup>[8]</sup>. *Roll flattening* ini dapat menyebabkan deformasi aktual tidak sesuai dengan deformasi yang diinginkan.



**Gambar 2.11** Mekanisme *Roll Flattening*<sup>[8]</sup>

Deformasi plastis berhubungan dengan pergerakan dislokasi<sup>[9]</sup>. Proses terjadinya deformasi plastis melalui pergerakan dislokasi merupakan mekanisme *slip*. *Slip* merupakan mekanisme terjadinya deformasi yang paling sering dijumpai. *Slip* merupakan pergerakan dislokasi pada bidang tertentu (*slip plane*) dan arah tertentu (*slip direction*) sesuai dengan arah kristalografinya. Umumnya slip terjadi pada bidang dan arah kristalografi yang densitas atomnya terpadat karena dibutuhkan energi yang lebih kecil untuk menggerakkan atom-atom tersebut. Ilustrasi dari pergerakan dislokasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.12** Ilustrasi Pergerakan Dislokasi<sup>[9]</sup>

Apabila pergerakan dislokasi ini telah mencapai batas butir maka dislokasi ini akan tertahan dibatas butir karena butir disebelahnya memiliki arah dan bidang kristalografi yang berbeda. Dibutuhkan gaya yang lebih besar agar dislokasi dapat

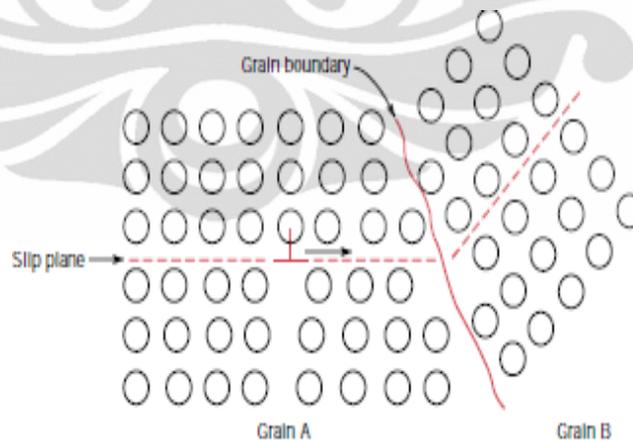
‘loncat’ ke butir lainnya. Tertahannya dislokasi pada butir-butir ini akan mengakibatkan logam menjadi lebih kuat dan keras.

### 2.3 Pengaruh Besar Butir terhadap Sifat Mekanis

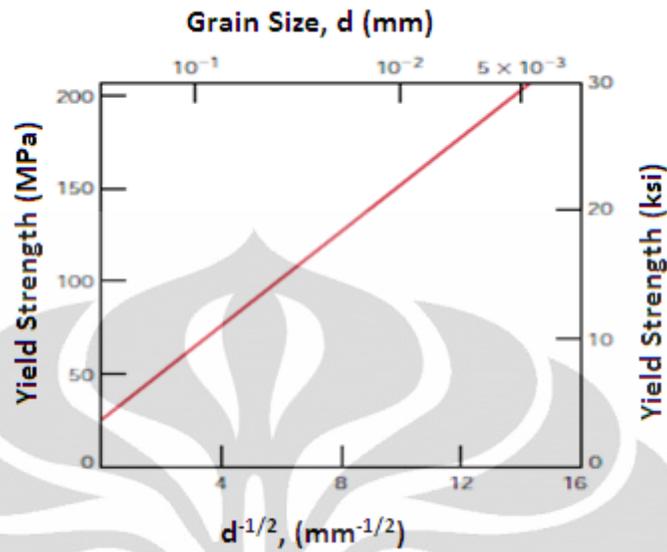
Ukuran butir pada material polikristalin ternyata mempengaruhi sifat mekanis material tersebut. Berdasarkan literatur yang ada, butir yang lebih kecil ukurannya akan memiliki kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan ukuran butir yang kasar<sup>[9]</sup>. Hal ini dikarenakan terjadinya peningkatan batas butir (*grain boundary*) selama pengecilan butir sehingga dengan semakin banyaknya batas butir maka dislokasi akan semakin terhambat pergerakannya. Hubungan antara besarnya ukuran butir dengan kekuatan *yield* dituliskan pada persamaan Hall-Petch (*Hall-Petch Equation*) dibawah ini<sup>[9]</sup> :

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y \cdot d^{-1/2} \quad (2.3)$$

Dimana  $\sigma_y$  adalah kekuatan yield (MPa),  $\sigma_0$  dan  $K_y$  adalah konstanta material, dan  $d$  adalah diameter butir rata-rata. Persamaan diatas tidak berlaku untuk material polikristalin dengan butir yang sangat kasar (*very large*) dan butir yang sangat halus (*extremely fine*)<sup>[9]</sup>.



**Gambar 2.13** Ilustrasi bagaimana batas butir menghalangi pergerakan dislokasi<sup>[9]</sup>



Gambar 2.14 Nilai *Yield Strength* pada Variasi Ukuran Butir<sup>[9]</sup>.

#### 2.4 Mekanisme Penguatan dengan Penghalusan Butir

Sifat mekanis suatu material polikristalin sangat dipengaruhi oleh ukuran butir. Pada umumnya, tiap-tiap butir yang bersebelahan pada material polikristalin memiliki orientasi yang berbeda-beda. Inilah yang menyebabkan timbulnya batas butir. Pada gambar 2.8, saat terjadinya deformasi plastis, slip atau pergerakan dislokasi berada dalam butir, misalkan dari *Grain A* ke *Grain B*. Batas butir yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 dapat menghambat pergerakan dislokasi karena dua alasan, yaitu :

1. Ketidaksamaan susunan dalam area batas butir akan menghasilkan berubahnya *slip plane* dari butir satu ke butir lainnya.
2. Butir memiliki orientasi atau arah yang berbeda-beda sehingga dislokasi yang bergerak ke butir selanjutnya juga harus merubah arah pergerakannya. Perbedaan orientasi tersebut juga mengakibatkan tingkat energi yang berbeda pula. Hal tersebut semakin sulit ketika *misorientasi* kristalografinya meningkat.

Pada Gambar 2.9 dapat dilihat bahwa kekuatan ( $\sigma$ ) akan meningkat jika diameter rata-rata ( $d$ ) material lebih kecil. Dengan meningkatnya kekuatan maka

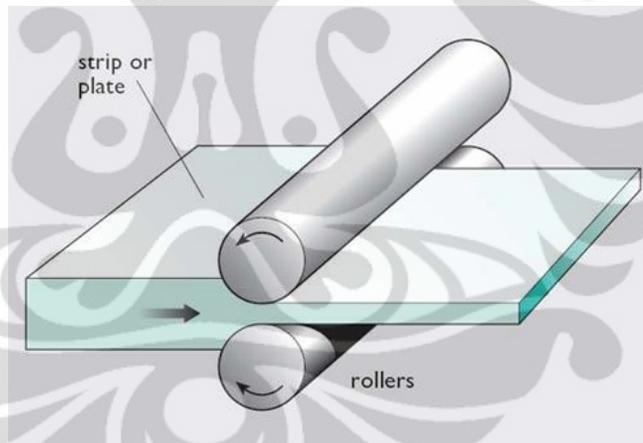
kekerasanpun akan meningkat, sebagaimana dapat dilihat pada persamaan dibawah ini<sup>[9]</sup> :

$$\sigma_{TS}(MPa) = 3.45 \times BHN \quad (2.4)$$

$$\sigma_{TS} (psi) = 500 \times BHN \quad (2.5)$$

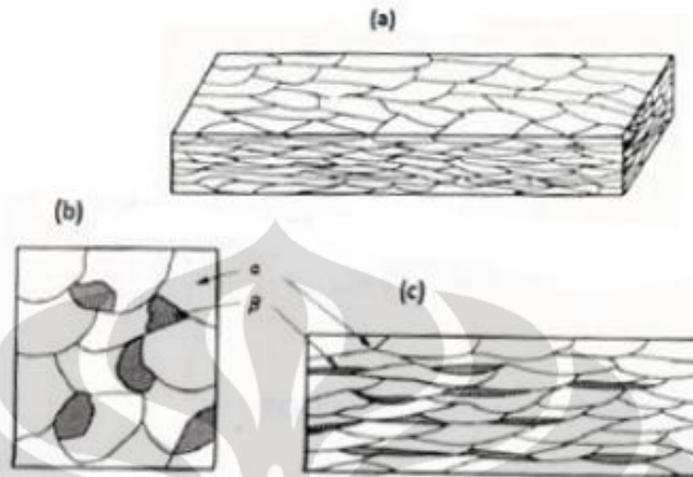
## 2.5 Proses Canai

Proses Canai (*rolling*) didefinisikan sebagai reduksi luas area penampang dari logam atau pembentukan umum dari produk logam menggunakan canai yang berputar (*rotating roll*)<sup>[10]</sup>. Selama proses canai terjadi proses perubahan bentuk pada benda uji dimana pada saat proses tersebut adanya gaya tekan (*compressive load*) terjadi pengurangan ketebalan dan penambahan panjang akan tetapi massa tetap konstan tidak mengalami perubahan.



Gambar 2.15 Skema Mesin Rolling<sup>[11]</sup>

Setelah terjadi proses canai, butir-butir dalam material yang sebelumnya *equiaxed* akan terdeformasi menjadi lebih panjang (*elongated grain*).



**Gambar 2.16** Perubahan Mikrostruktur Hasil *Rolling*<sup>[11]</sup>

Berdasarkan temperatur operasi, proses canai dapat dibagi menjadi 2 jenis, yaitu :

1. Canai dingin (*cold rolling*) yaitu proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur ruang atau temperatur dibawah rekristalisasi material.
2. Canai panas (*hot rolling*) yaitu proses canai yang dilakukan dengan menggunakan temperatur diatas rekristalisasi dari material.

Besarnya regangan dan % deformasi canai yang diberikan pada material dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini<sup>[11]</sup> :

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_f} \quad (2.6)$$

$$\% \text{ Deformasi} = \frac{h_0 - h_f}{h_0} \times 100\% \quad (2.7)$$

Dimana :

$\varepsilon$  = regangan

$h_0$  = tebal awal material (mm)

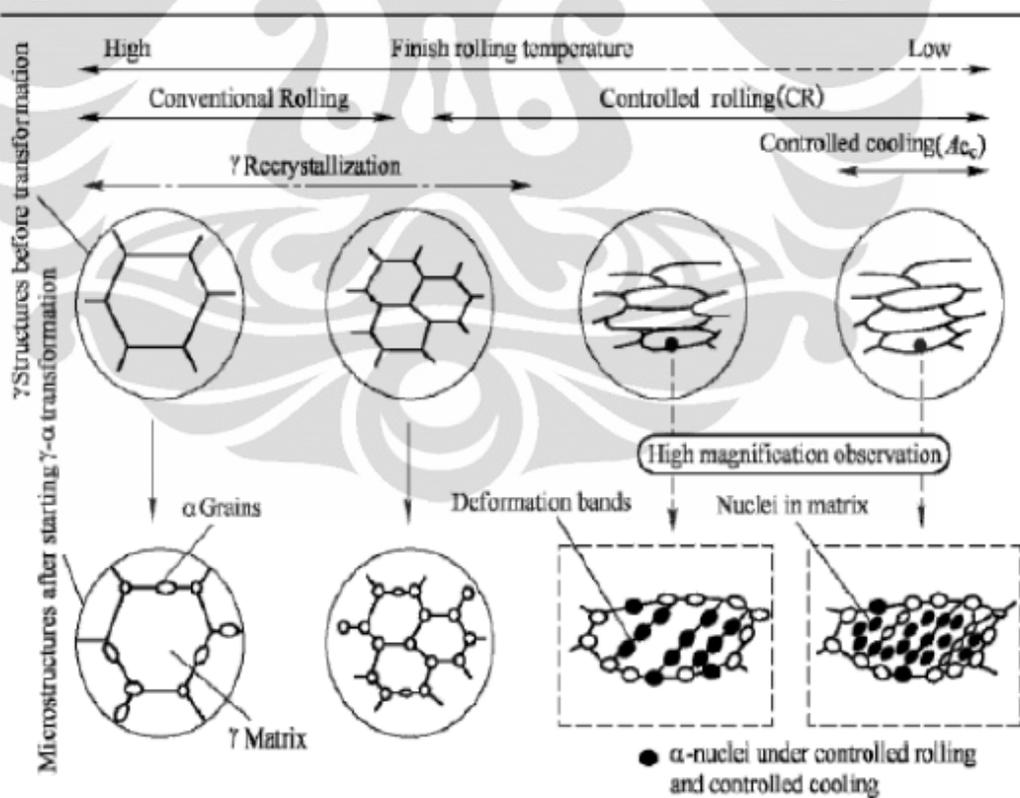
$h_f$  = tebal akhir material (mm)

## 2.6 Thermo-Mechanical Controlled Process (TMCP)

TMCP merupakan suatu proses untuk mengontrol struktur mikro suatu material selama proses berlangsung agar menghasilkan sifat mekanis yang baik. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP didapat dari adanya mekanisme penghalusan butir dengan proses deformasi panas yang terkontrol (*controlled rolling*) dan pendinginan yang terkontrol (*controlled cooling*)<sup>[6]</sup>.

Pada baja TMCP, sifat mekanis (*mechanical properties*) terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanik (*mechanical working*), proses recovery (*recovery process*), rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)<sup>[5]</sup>.

Perbedaan mikrostruktur antara canai konvensional dengan TMCP dapat dilihat pada Gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2.17 Perbedaan Mikrostruktur antara Proses Canai Konvensional dan TMCP<sup>[12]</sup>.

Dari gambar tersebut, proses canai konvensional dapat menghasilkan butir yang *equiaxed* dengan butir baru muncul dibatas butir. Pada metode TMCP, nukleasi dapat terjadi di dalam matriks sehingga dapat memunculkan sub-butir (*sub-grain*) tetapi morfologi butirnya cenderung pipih (*elongated*) dan terdapat banyak *deformation band*.

### 2.6.1 Canai Hangat (*Warm Rolling*)

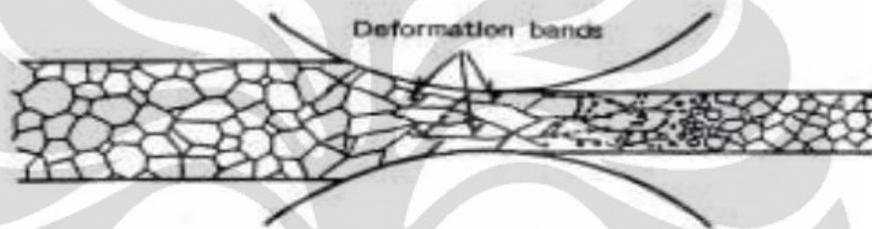
Canai hangat atau *warm rolling* adalah salah satu metode perlakuan terhadap material logam untuk menghasilkan mikrostruktur yang halus pada material logam dan paduannya dengan temperatur kerja berada diantara temperatur canai panas (*hot rolling*) dan temperatur canai dingin (*cold rolling*). Kisaran temperatur pengerjaan hangat berada pada kisaran  $500^{\circ}\text{C}$ - $800^{\circ}\text{C}$ <sup>[13]</sup>. Pada *range* suhu tersebut, setelah terjadi deformasi plastis, material mengalami pengerasan regangan / *strain hardened* dan sebagian lagi mengalami rekristalisasi<sup>[14]</sup>.

Pada proses ini tidak dibutuhkan lagi perlakuan panas lainnya. Selain menghasilkan butir yang lebih halus, proses ini akan membentuk sub-butir (*subgrain*) yang berukuran mikrometer pada butir yang berukuran lebih besar. Hasilnya, sifat mekanis material akan meningkat.

Dibandingkan dengan metode canai panas, metode canai hangat ini hanya memerlukan energi panas yang lebih rendah daripada canai panas. Kemudian canai hangat ini mampu menghasilkan produk dengan dimensi yang mendekati dimensi akhir. Kualitas permukaan dari produk juga baik. Kelemahan lainnya dari canai panas, kemungkinan terjadinya perubahan fasa selama proses canai hangat sehingga sifat mekanis material juga akan ikut berubah. Jika dibandingkan dengan canai dingin, canai hangat membutuhkan gaya deformasi yang lebih kecil dan menghasilkan tegangan sisa yang kecil.

### 2.6.2 Deformation Band

*Deformation band* merupakan cacat dalam butir (*intergranular defect*) yang diakibatkan oleh deformasi. *Deformation band* ini merupakan salah satu tempat terjadinya nukleasi butir (*nucleation site*). Pada *deformation band* ini, dislokasi mempunyai densitas yang sangat tinggi<sup>[15]</sup>. Jika densitas dislokasi sangat tinggi maka sulit bagi dislokasi tersebut untuk bergerak sehingga material akan menjadi lebih kuat dan keras. Deformasi akan meningkat apabila temperatur deformasi diturunkan.



Gambar 2.18 Pembentukan *Deformation Band* akibat Deformasi Canai

### 2.6.3 Strain Rate

Untuk menghitung laju regangan benda yang mengalami deformasi canai, dapat menggunakan rumus pada persamaan 2.8 dibawah ini<sup>[16]</sup>.

$$\dot{\epsilon} = \frac{V/R}{\sqrt{r}} \times \sqrt{\frac{R}{H_0}} \times \ln \left[ \frac{1}{(1-r)} \right] \quad (2.8)$$

dimana ;

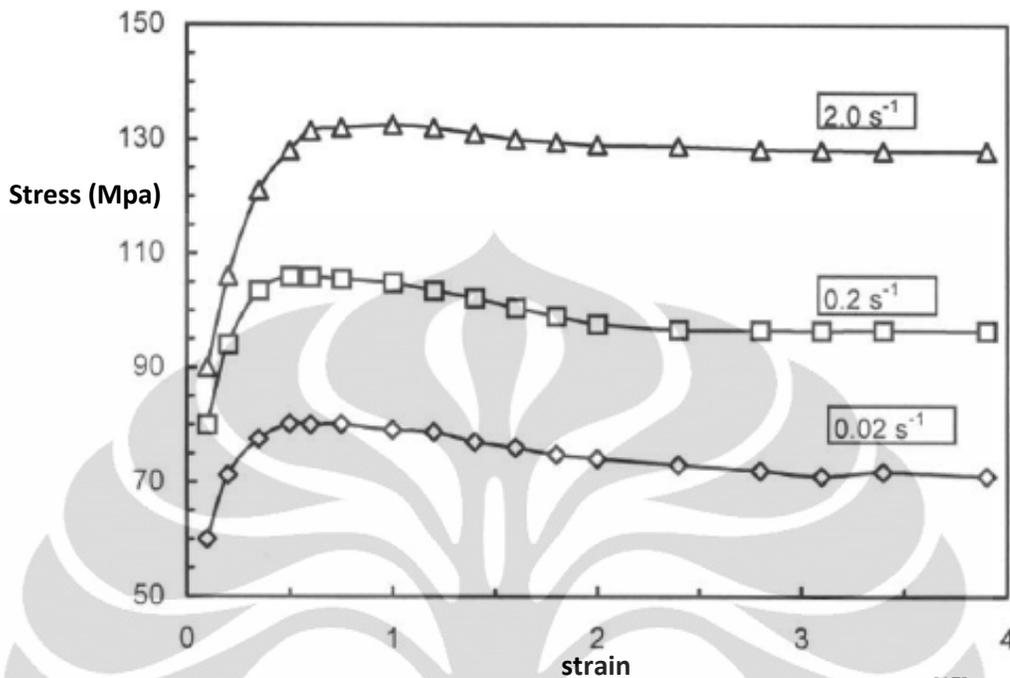
$\dot{\epsilon}$  = laju regangan (/s)

V = kecepatan roll (133.33 mm/s)

R = jari-jari roll (52 mm)

r = reduksi (dalam decimal)

$H_0$  = tebal awal (mm)

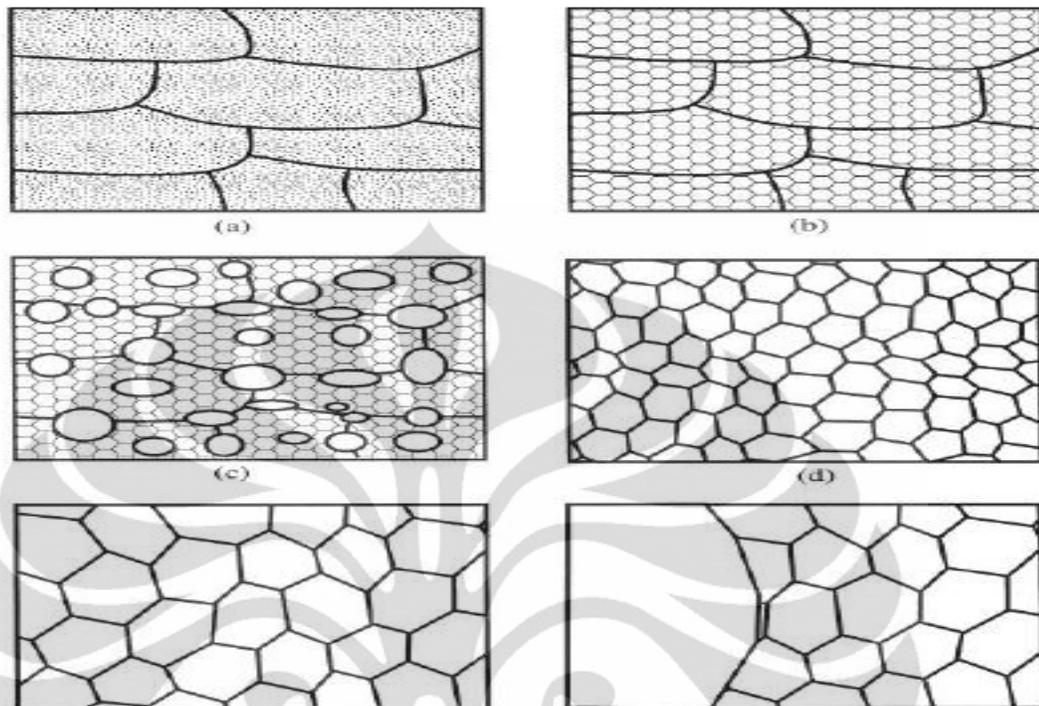


Gambar 2.19 Pengaruh *Strain Rate* terhadap Kurva Uji Tarik<sup>[17]</sup>

Dari gambar diatas, terlihat bahwa laju regangan sangat mempengaruhi kurva uji tarik. Semakin tinggi laju regangan yang diberikan pada benda, maka kekuatan akan semakin meningkat karena laju regangan yang tinggi akan membuat dislokasi tak memiliki waktu untuk bergerak.

## 2.7 Recovery, Recrystallization, dan Grain Growth

Material polikristalin yang mengalami deformasi plastis menunjukkan terjadinya perubahan bentuk butir, pengerasan regang (*strain hardening*) dan peningkatan pada kepadatan dislokasi. Beberapa sisa energi internal disimpan didalam material sebagai energi regangan (*strain energy*), yang mana berhubungan dengan area tegangan (*tensile*), tekan (*compressive*), dan geser (*shear*) di sekeliling dislokasi yang baru terbentuk. Pada pengerjaan dingin, kecenderungan penyimpanan energi regangan ini dapat dihilangkan dengan perlakuan panas seperti *annealing*. Proses *annealing* ini meliputi proses *recovery*, *recrystallization*, dan *grain growth*.



**Gambar 2.20** Skematik Proses Anil a) Butir yang Terdeformasi. b) *Recovery*. c) Rekrystalisasi Sebagian. d) Rekrystalisasi Penuh. e) Pertumbuhan Butir. f) *Abnormal Grain Growth*<sup>[18]</sup>

### 2.7.1 *Recovery*

Proses *recovery* merupakan proses yang pertama ketika material yang telah dideformasi dipanaskan ke temperatur tinggi. *Recovery* bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa (*internal strain energy*) pada material akibat dari pengerjaan dingin. Mekanisme dari penghilangan energi ini dengan cara penghilangan dan penyusunan kembali dislokasi<sup>[19]</sup>. Selama pengerjaan *recovery*, sifat mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin<sup>[12]</sup>.

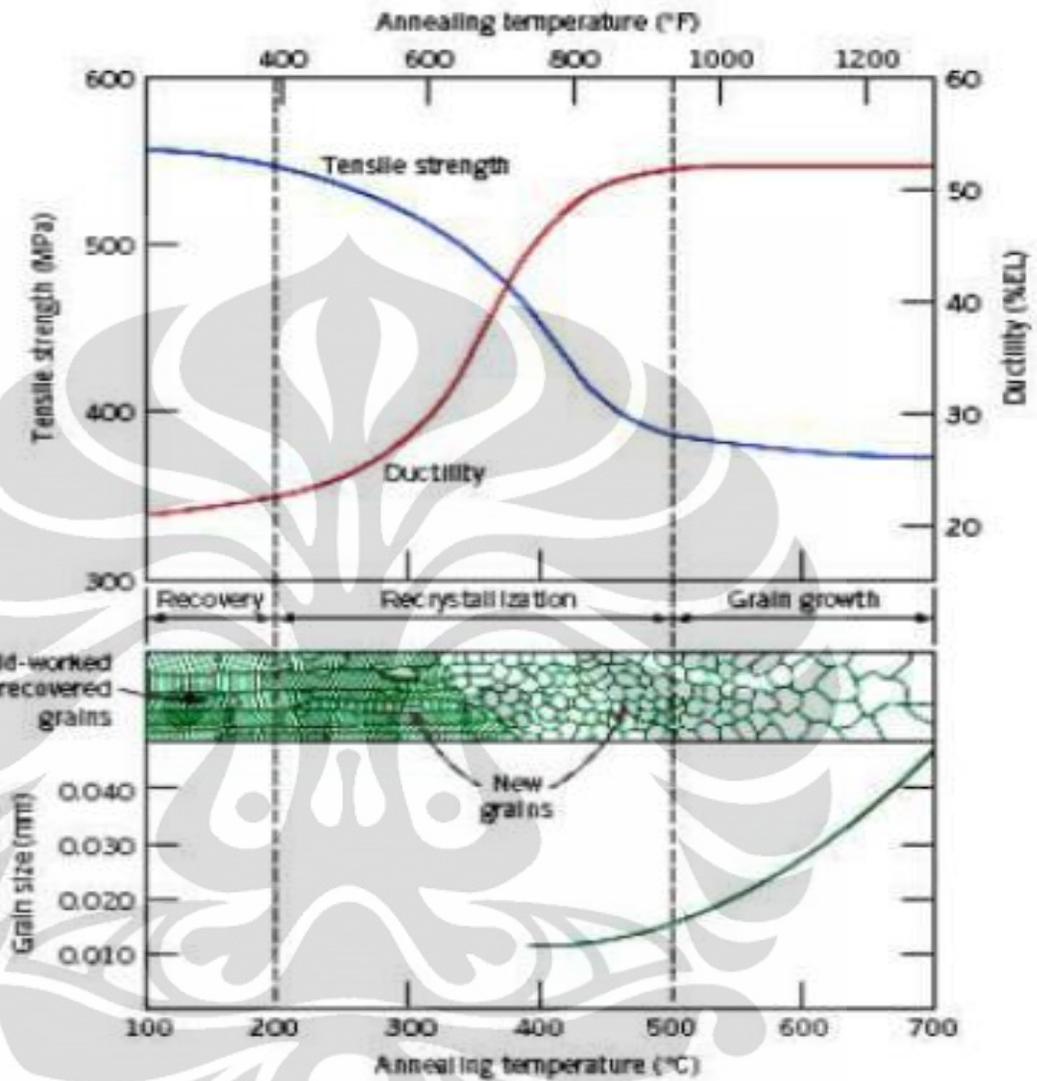
### 2.7.2 *Recrystallization*

Tidak semua dislokasi menghilang ketika tahap *recovery* dan ketika tahap *recovery* akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi dengan

memanfaatkan energi internal yang masih tersimpan setelah tahap *recovery*. Proses ini disebut rekristalisasi. Proses rekristalisasi ini merupakan proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Proses rekristalisasi ini melibatkan proses aktivasi termal dalam perubahan mikrostruktur dengan cara pembentukan butir baru bebas regang yang terjadi karena adanya penggabungan sub-butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat mikrostruktur seperti permukaan batas butir dan inklusi. Butir baru yang tumbuh merupakan butir yang bebas regang (*strain-free*) dan terikat dengan batas butir bersudut besar. Syarat dari pertumbuhan butir baru ini adalah tercapainya jari-jari kritis ( $r_c$ ). Jika jari-jari kritis ini tidak tercapai maka butir ini akan melebur kembali atau bergabung dengan butir yang lainnya karena adanya fenomena kanibalisme.

Ketika semua butir terdahulu telah digantikan dengan butir baru yang bebas regang tadi, maka dapat dikatakan bahwa telah terjadi rekristalisasi sempurna (*fully recrystallization*). Jika energi yang tersimpan akibat pengerjaan dingin tinggi, maka energi termal yang dibutuhkan untuk terjadinya rekristalisasi semakin kecil, berarti semakin rendah temperatur rekristalisasinya.

Proses rekristalisasi ini memungkinkan untuk mengontrol ukuran besar butir dari material. Jika ukuran butir dapat dikontrol maka sifat mekanis material dapat berubah karena ada hubungan antara besar butir dengan sifat mekanis dari material tersebut seperti persamaan Hall-Petch (lihat Persamaan 2.3). Parameter dari pengontrolan butir ini adalah temperatur *annealing*, waktu tahan dan komposisi dari material tersebut.



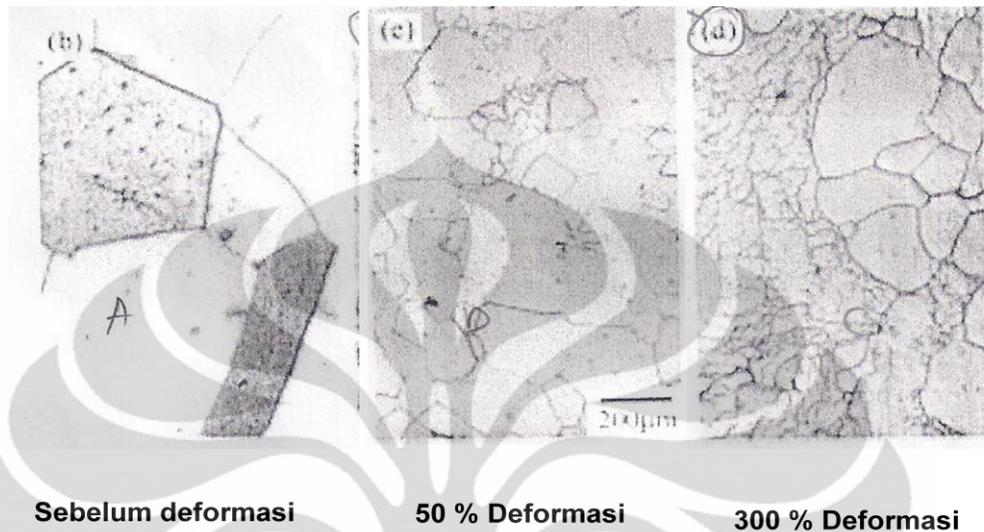
Gambar 2.21 Proses *Annealing* dan Perubahan Sifat Mekanis Selama Proses<sup>[9]</sup>

Rekristalisasi ini terbagi menjadi dua, yaitu rekristalisasi dinamis dan statis.

### 2.7.2.1 *Dinamic Recrystallization*

Proses rekristalisasi dinamis merupakan proses rekristalisasi yang terjadi saat deformasi berlangsung. Kombinasi dari deformasi plastis dan pemanasan memicu terjadinya proses ini. Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan

kritis ( $\epsilon_0$ ) maka akan tersedia cukup energi untuk membentuk nuklei pada batas butir yang terdeformasi.



**Gambar 2.22** Foto Mikro *Stainless Steel* AISI 430 yang Mengalami Rekristalisasi Dinamis<sup>[23]</sup>

Ciri dari terjadinya rekristalisasi dinamis adalah terbentuknya butir baru yang lebih *equiaxed* disekitar butir besar. Pada gambar 2.22, terlihat jelas bahwa *Stainless Steel* AISI 430 yang mengalami deformasi plastis 50% dan 300% membentuk butir yang lebih *equiaxed*. Semakin besar deformasi yang diberikan maka semakin banyak butir baru yang tumbuh. Butir baru yang tumbuh ini merupakan butir yang bebas regang. Dengan adanya butir baru yang lebih *equiaxed* ini, maka sifat mekanis dari material akan meningkat.

### 2.7.2.2 *Static Recrystallization*

Rekristalisasi statis terjadi setelah proses deformasi akibat pengerjaan dingin. Tujuan dari rekristalisasi statis ini sama dengan rekristalisasi dinamis yaitu membentuk nuklei yang merupakan cikal-bakal terbentuknya butir baru yang bebas regang.

### 2.7.3 Grain Growth

Setelah tahap rekristalisasi selesai, makan butir akan tumbuh menjadi ukuran tertentu. Hal ini dikarenakan adanya proses migrasi pada batas butir. Tidak semua butir dapat membesar, butir yang lebih besar akan ‘memakan’ butir yang lebih kecil atau lebih dikenal dengan fenomena kanibalisme pada butir. Pada proses ini kita dapat mengontrol ukuran diameter rata-rata butir material polikristalin. Semakin lama waktu dan semakin tinggi suhu *annealing*, maka butir tumbuh menjadi lebih besar. Ukuran butir akan mempengaruhi sifat mekanis dari material tersebut.

### 2.7.4 Sub-Grain (Sub-Butir)

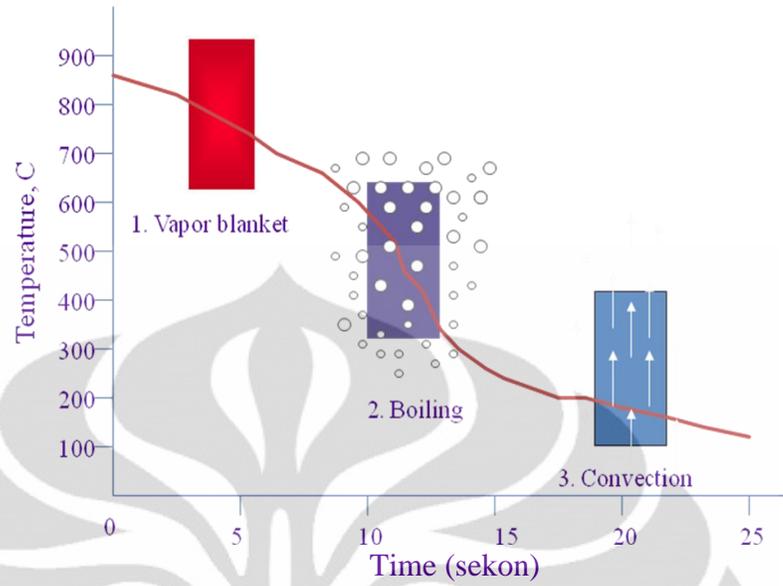
Butir-butir baru yang bebas regang hasil dari proses rekristalisasi merupakan penggabungan antara sub-butir. Sub-butir ini terbentuk akibat adanya deformasi sehingga terjadi perubahan mikro pada butir. Perubahan mikro ini bisa dikatakan cacat karena arah sub-butir menjadi sedikit berbeda dengan arah butirnya ( $2-3^\circ$  *misorientasi*).

## 2.8 Pengaruh Pendinginan Cepat pada Sifat Mekanis Baja

Setelah baja dipanaskan pada suhu austenisasi, baja selanjutnya di-*quenching* ke media pendinginan tertentu. Tujuannya untuk mendapatkan fasa akhir yang diinginkan. Ada banyak media *quenching* yang umum digunakan, diantaranya adalah air, oli dan udara.

Pemilihan media *quench* diatas didasarkan pada *hardenability* baja, geometri dan ketebalan benda, serta kecepatan *quench* . Air memiliki daya serap panas yang baik. Pada pencelupan dengan media air terjadi beberapa tahap. Tahapan-tahapan yang terjadi yaitu :

1. *Vapor Blanket Stage* (tahap pembentukan lapisan uap)
2. *Vapor Transport* atau *Boiling Stage* (tahap penguapan lapisan uap)
3. *Convection* (tahap konveksi atau pendinginan cair).



**Gambar 2.23** Tahapan Pada *Quench* Dengan Media Air <sup>[20]</sup>.

Air merupakan media *quenching* yang cepat. Kelemahannya media *quench* air adalah sifat air yang korosif terhadap baja. Dan pendinginan yang cepat kadang dapat menyebabkan distorsi dan *cracking*.

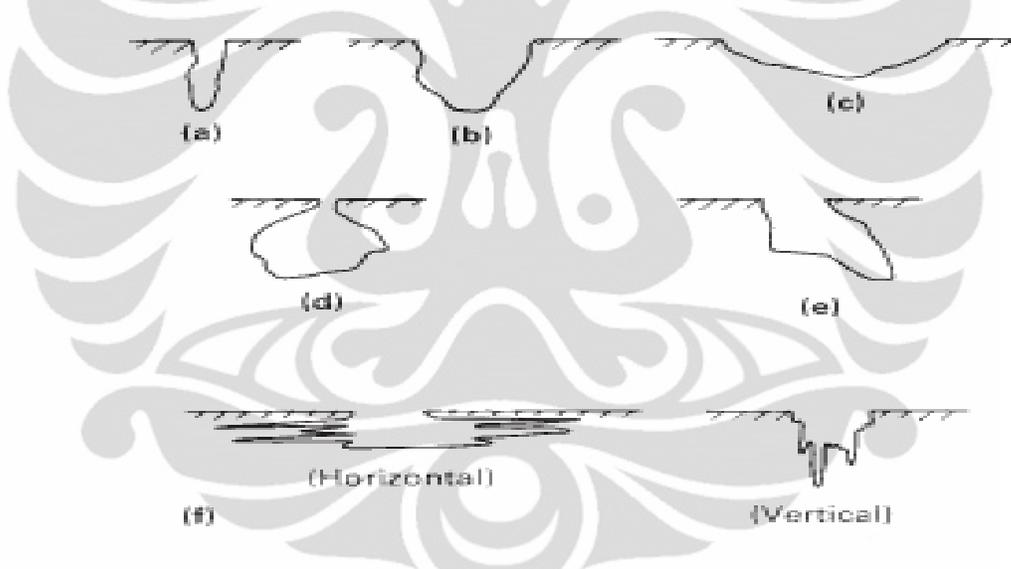
Pada material *Stainless Steel Ferritic* AISI 430, *quenching* tidak akan membentuk fasa martensit karena kadar karbon tidak mencukupi untuk terbentuknya fasa tersebut. Hal ini dikarenakan mekanisme penguatan pada material *Stainless Steel* adalah *solution hardening* atau *precipitation hardening* yaitu dengan memasukkan elemen padu sehingga didapat sifat mekanis yang diinginkan. Fungsi *quenching* pada material *Stainless Steel* ini hanya untuk menghentikan pertumbuhan butir (*grain growth*) atau pertumbuhan karbida dengan cara menghilangkan panas yang tersimpan pada material.

## 2.9 Korosi Sumuran pada *Stainless Steel* AISI 430

Korosi sumuran (*pitting corrosion*) adalah korosi lokal yang secara selektif (serangan dari ion Cl<sup>-</sup>) menyerang bagian tertentu dari permukaan logam. Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya korosi sumuran antara lain <sup>[21]</sup>.

- Ketidakhomogenan permukaan material, seperti adanya inklusi, cacat material dan lainnya, sehingga merupakan faktor yang dapat memacu terjadinya reaksi elektrokimia.
- Adanya daerah yang merupakan tempat terjadinya konsentrasi tegangan.
- Lingkungan yang korosif (lingkungan garam-garam halida) seperti ion  $\text{Cl}^-$ .

Korosi sumuran dapat berbentuk *cavity* atau *hole* (lubang) yang dihasilkan di dalam material. Korosi jenis ini sangat berbahaya dibandingkan dengan korosi seragam (*uniform corrosion*) dikarenakan lebih sulit terdeteksi, diprediksi serta produk korosi sering menutupi lubang-lubang hasil korosi di permukaan material.

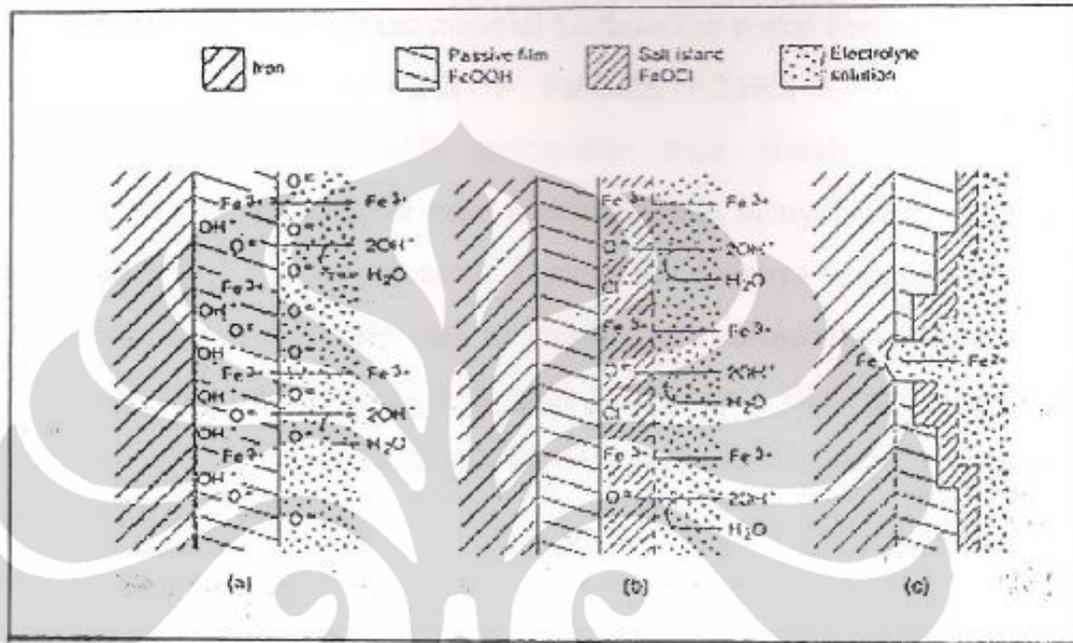


**Gambar 2.24** Bentuk-bentuk Lubang Korosi Sumuran (a) *Narrow and Deep*. (b) *Elliptical*. (c) *wide and Shallow*. (d) *Subsurface*. (e) *Undercutting*. (f) *Shape Determine by microstructural Orientation*.<sup>[21]</sup>

### 2.9.1 Mekanisme Korosi Sumuran

Adanya kombinasi faktor internal material dan faktor lingkungan yang korosif akan mengakibatkan terjadinya serangan korosi pada logam. Terjadinya korosi sumuran pada logam adalah akibat pecahnya lapisan pasif lokal yang

terdapat pada permukaan material. Mekanisme pecahnya lapisan pasif dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

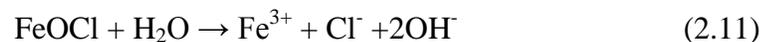


Gambar 2.25 Mekanisme Pecahnya Lapisan Pasif Lokal Akibat Ion Cl<sup>-</sup>.<sup>[22]</sup>

Pada kondisi normal terdapat lapisan oksida pasif pada permukaan material. Tanpa kehadiran ion Cl<sup>-</sup> lapisan pasif ini membentuk ion *ferric* yang berada dalam kondisi teroksidasi berdasarkan reaksi berikut<sup>[22]</sup> :



Adanya ion Cl<sup>-</sup> yang berasal dari lingkungan, akan terjadi peningkatan kecepatan reaksi pelepasan Fe<sup>3+</sup> dari lapisan pasif ke lapisan luar menjadi FeOCl, yang memiliki kemampuan melarut lebih tinggi dibandingkan dengan FeOOH dan akan berdisosiasi berdasarkan reaksi berikut :



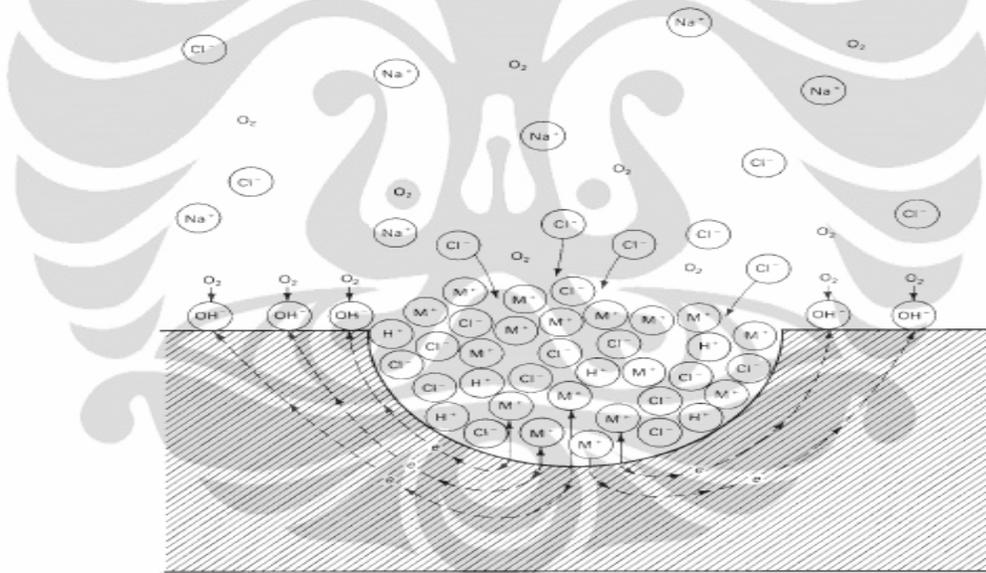
Dengan rusaknya lapisan pasif FeOOH, akan terbentuk daerah katodik dan anodic dan mulai terjadi reaksi antara material dengan lingkungan, sehingga terbentuk awal sumuran (*initiation pit*). Ion Fe<sup>3+</sup> yang terbentuk dihasilkan tanpa terjadinya perubahan arus anodik, yang berarti bahwa walaupun ion Fe<sup>3+</sup> tetapi belum

meningkatkan laju korosi sumuran material yang bersangkutan atau belum terjadinya pertumbuhan sumuran (*propagation pit*).

Hasil korosi sumuran kemudian akan terhidrolisa menjadi asam klorida dan mengendap pada permukaan material berdasarkan reaksi berikut<sup>[22]</sup> :



$\text{Fe}(\text{OH})_2$  yang terbentuk merupakan basa lemah, sedangkan HCl merupakan asam kuat sehingga hasil kali reaksi ini akan menyebabkan pH disekitar sumuran akan menurun cepat. Dengan dominannya suasana asam, maka akan mempercepat reaksi pelarutan di anoda dan meningkatkan konsentrasi ion  $\text{Cl}^-$  pada sumuran yang terbentuk dengan sendirinya. Efek percepatan proses korosi sumuran disebabkan sifat autokatalitik dari ion  $\text{Cl}^-$  seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini :



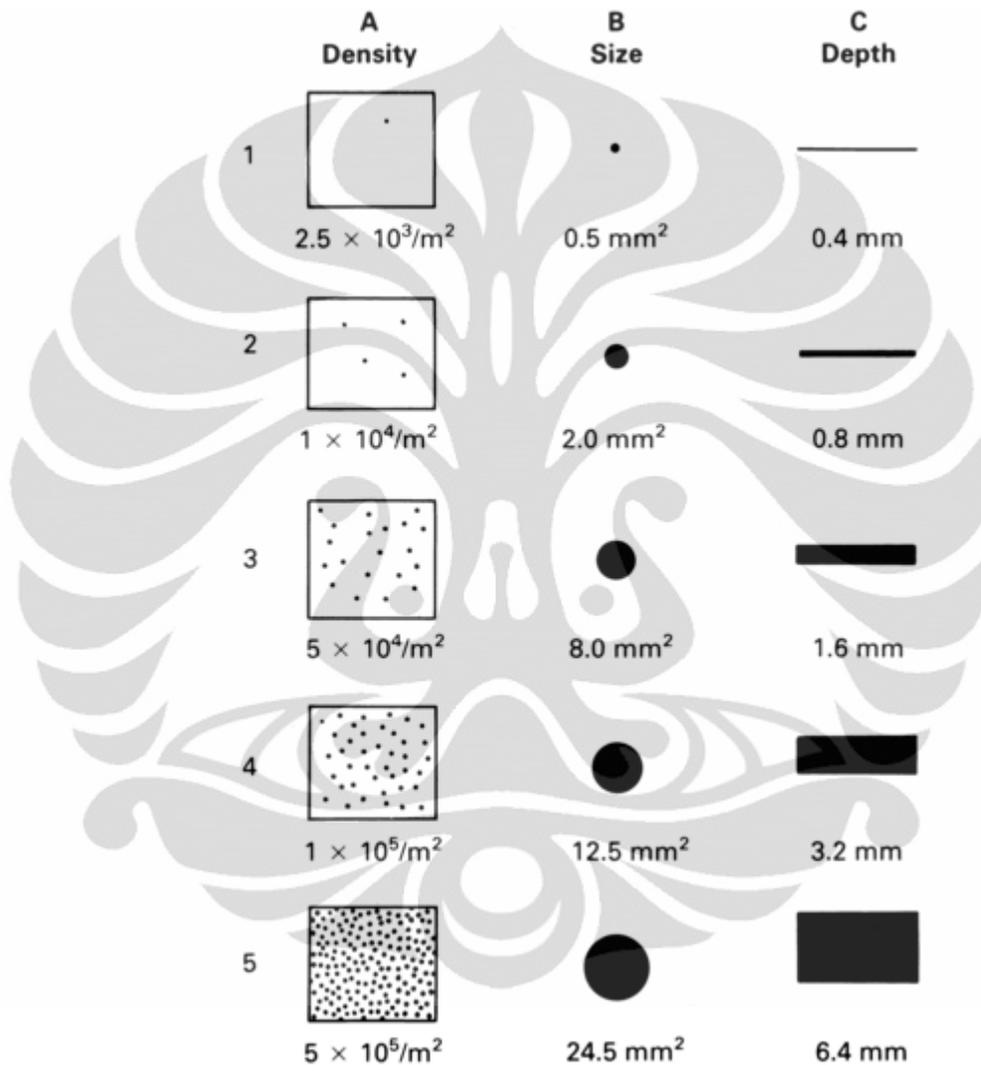
**Gambar 2.26** Mekanisme Proses Autokatalitik pada Korosi Sumuran<sup>[22]</sup>.

Mekanisme proses autokatalitik secara singkat dapat dijelaskan sebagai berikut :

Permukaan logam setelah mengalami pembentukan awal sumuran akan teroksidasi kembali membentuk suatu lapisan  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  yang merupakan lapisan yang bersifat porous. Lapisan ini mudah ditembus oleh ion-ion  $\text{Cl}^-$  tetapi tidak demikian halnya dengan ion  $\text{Fe}^{2+}$ . Hal ini mengakibatkan konsentrasi ion  $\text{Cl}^-$  didalam sumuran

akan semakin meningkat sehingga reaksi yang terjadi antara  $\text{Fe}^{2+}$  dengan  $\text{Cl}^-$  dalam membentuk HCl didalamnya juga meningkat.

### 2.9.2 Evaluasi Korosi Sumuran



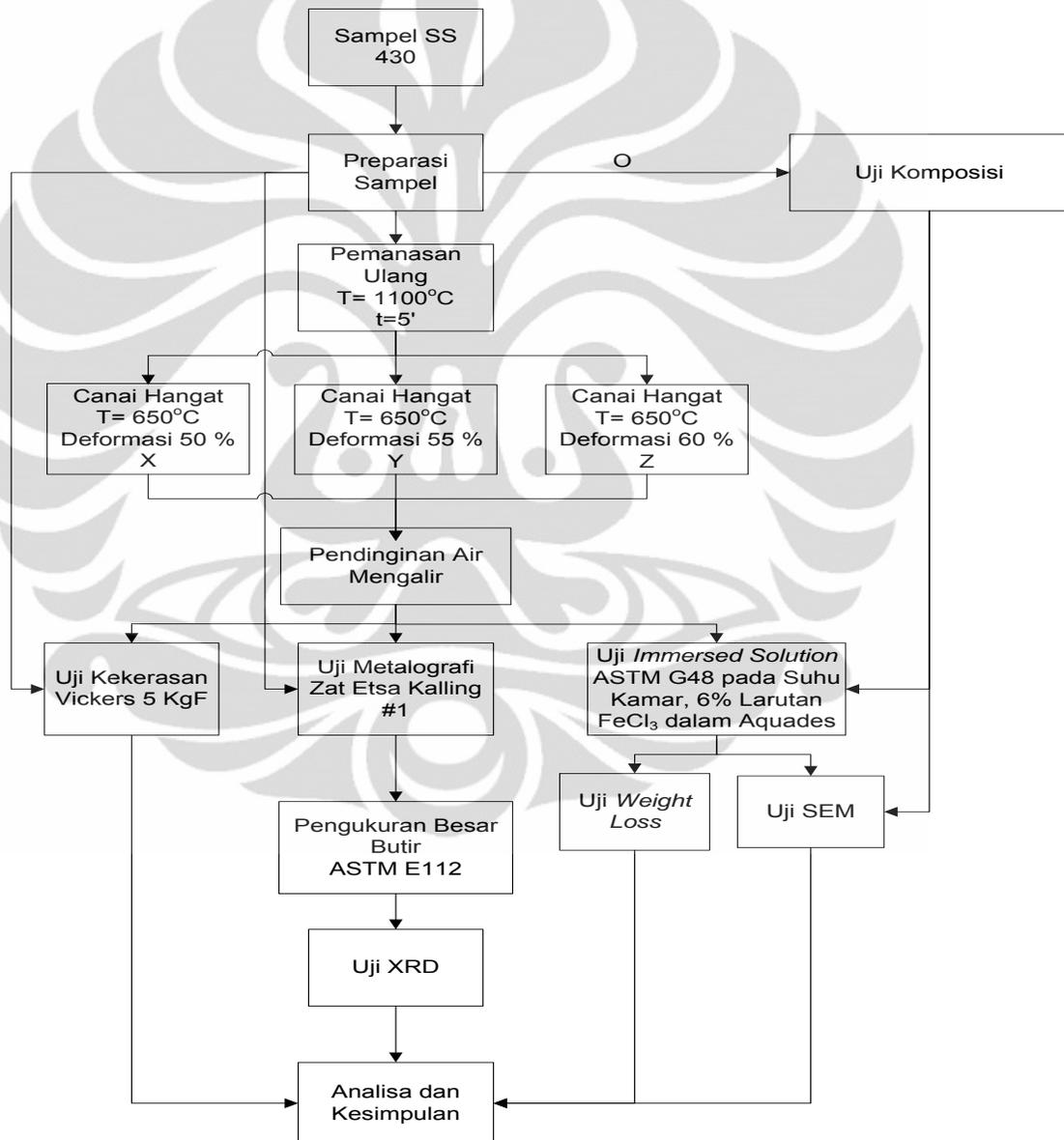
**Gambar 2.27** Standar Pemerinkatan untuk Lubang Sumuran<sup>[37]</sup>.

Gambar 2.27 di atas digunakan untuk membandingkan korosi sumuran antar material. Parameter yang dibandingkan adalah densitas, ukuran luas, dan kedalaman lubang sumuran. Contoh urutan penulisan pemerinkatan lubang sumuran adalah A-4, B-3, C-2. Artinya benda uji itu mempunyai densitas rata-rata lubang sumuran  $1 \times 10^5/\text{m}^2$ , luas rata-rata lubang sumuran  $8 \text{ mm}^2$ , dan mempunyai kedalaman 0.8 mm.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian ini adalah :



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengujian

## 3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan selama penelitian adalah sebagai berikut :

### 3.2.1 Alat

1. Mesin Roll merek Ono Roll dengan kapasitas 20 ton
2. Dapur pemanas (*Furnace*)
3. Pengatur temperatur dapur (*controller*)
4. *Termocouple*
5. Kawat thermocouple tipe K, diameter 2 mm.
6. Mesin Komputer Pendeteksi Temperatur
7. Jangka sorong
8. Mesin amplas
9. Mesin poles
10. Mikroskop optik
11. *Beaker glass*
12. Pipet
13. *Rectifier*
14. *Magnetic stirrer + magnetic bar*
15. SEM
16. Mesin uji Vickers
17. Mesin pemotong/gerinda
18. Palu dan tang
19. Timbangan digital

### 3.2.2 Bahan

1. *Stainless Steel Ferritic* AISI 430 (*flat*)
2. Resin + *hardener*
3. Kertas amplas *grid* #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, dan #1200

4. Serbuk  $\text{TiO}_2$  dan *diamond paste*
5. Kain beludru
6. Zat Etsa Kimia : *Nitric Acid (60/40)*, dan *Kalling's Reagent 1*
7. Serbuk padatan  $\text{FeCl}_3$  100 gr
8. Aquades

### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Pemilihan Material

Pemilihan material berdasarkan relevansi antara studi literatur. Material yang menjadi sampel uji berbentuk *flat* dalam kondisi *annealed*. Kemudian dilakukan uji komposisi material dengan menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

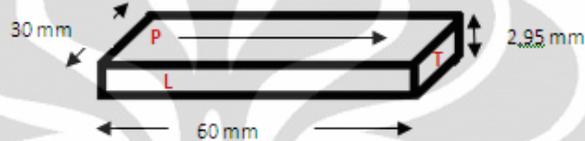
OES merupakan suatu metode karakterisasi material dengan cara mengeksitasi atom pada material dengan menggunakan perbedaan potensial antara sampel dan elektroda. Akibat dari energi yang ditimbulkan tersebut, electron pada sampel akan memancarkan sinar yang akan ditangkap oleh *detector*. Perbedaan intensitas yang terjadi kemudian dikarakterisasi oleh *analyzer* sehingga didapatkan komposisi penyusun dari material yang akan dijadikan sampel. Skema pengujian OES dapat digambarkan dibawah ini :



**Gambar 3.2** Alat Pengujian OES di CMPFA DTMM FTUI

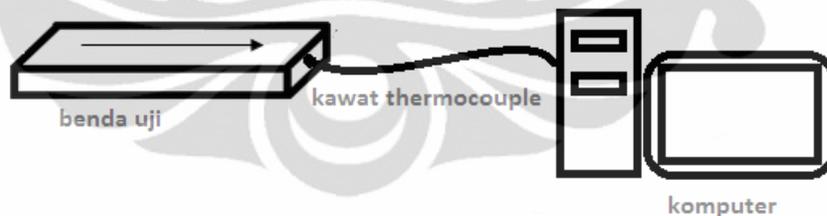
### 3.3.2 Preparasi Benda Uji

*Stainless Steel Ferritic* AISI 430 yang tadinya berukuran (600 x 300 x 2.95) mm dipotong menjadi berukuran (60 x 30 x 2,95) mm dengan bentuk *flat* juga.



**Gambar 3.3** Ilustrasi Benda Uji

Pemotongan sampel menggunakan alat *blanking* dan gergaji tangan. Kemudian di salah satu ujung benda uji dibor untuk membuat lubang sebesar 2 mm yang digunakan sebagai penjepit kawat *thermocouple*. Kawat *thermocouple* yang dimasukkan ke lubang harus terjepit dengan sempurna karena pada saat *rolling*, kawat juga akan ikut terdeformasi. Jika penjepitan kurang sempurna, maka kawat akan terlepas dan data suhu saat proses *rolling* tidak dapat diambil.



**Gambar 3.4** Benda Uji yang Akan Dicanai Hangat

Tanda panah pada permukaan benda uji melambangkan arah *rolling*, sedangkan huruf L melambangkan bidang longitudinal, huruf T melambangkan bidang transversal dan huruf P melambangkan bidang planar.

### 3.3.3 Proses TMCP dan Warm Rolling

Seluruh benda yang telah dipreparasi selanjutnya dilakukan proses canai hangat. Suhu dan waktu proses canai hangat ini mengikuti prosedur Sung-il Kim dkk<sup>[23]</sup>. Benda uji dipanaskan hingga suhu 1100°C kemudian ditahan selama 5 menit lalu suhu diturunkan ke suhu deformasi canai hangat (650°C) lalu di canai menggunakan mesin OnoRoll. Sesaat setelah dicanai, sampel kemudian di-*quenching* dengan air mengalir. % Deformasi yang digunakan adalah 50%, 55%, dan 60%.



**Gambar 3.5** Mesin *Furnace Carbolite* di Lab. Teknik Pengubahan Bentuk DTMM FTUI

Selanjutnya, benda uji yang mengalami % deformasi 50 disebut X, benda uji yang mengalami % deformasi 55 disebut Y, dan benda uji yang mengalami % deformasi 60 disebut Z.



**Gambar 3.6** Mesin OnoRoll Lab. Teknik Pengubahan Bentuk DTMM FTUI

Pada proses *warm rolling* sendiri, benda uji akan mengalami penambahan panjang yang cukup signifikan. Selain itu, benda uji juga akan memipih akibat gaya tekan yang diberikan oleh *roll*. Perubahan dimensi akibat *rolling* selanjutnya diukur dengan menggunakan jangka sorong. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik pada benda uji, tujuannya untuk mendapatkan data yang lebih valid. Selanjutnya dimensi akhir dibandingkan dengan data dimensi awal sebelum dilakukan proses *warm rolling* untuk diukur deformasi aktual yang terjadi pada benda uji.



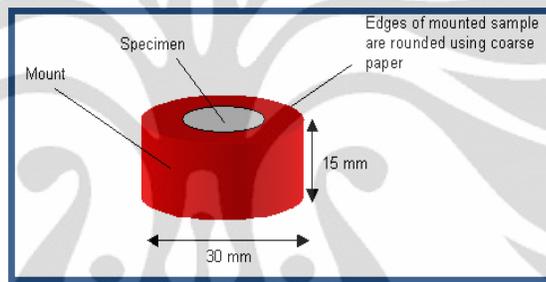
Gambar 3.7 Benda Uji Hasil *Warm Rolling*

### 3.3.4 Pengamatan Metalografi

Pengujian metalografi ini bertujuan untuk mengamati mikrostruktur benda uji. Preparasi yang dilakukan terhadap benda uji mengikuti standar ASTM E3-01 “*Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens*”<sup>[24]</sup>. Untuk memudahkan penanganan sampel berukuran kecil saat diamplas maupun dipoles, benda uji dilakukan *mounting* terlebih dahulu. Ketinggian monting diusahakan tidak boleh lebih dari 1 cm.

Secara umum syarat-syarat yang harus dimiliki bahan *mounting* adalah :

- a. Bersifat *inert* (tidak bereaksi dengan material maupun zat etsa).
- b. Sifat eksotermis rendah.
- c. Viskositas rendah.
- d. Penyusutan linier rendah.
- e. Sifat adhesi baik.
- f. Memiliki kekerasan yang sama dengan sampel.
- g. Flowabilitas baik, dapat menembus pori, celah dan bentuk ketidakraturan yang terdapat pada sampel.
- h. Khusus untuk etsa elektrolitik dan pengujian SEM, bahan *mounting* harus konduktif.



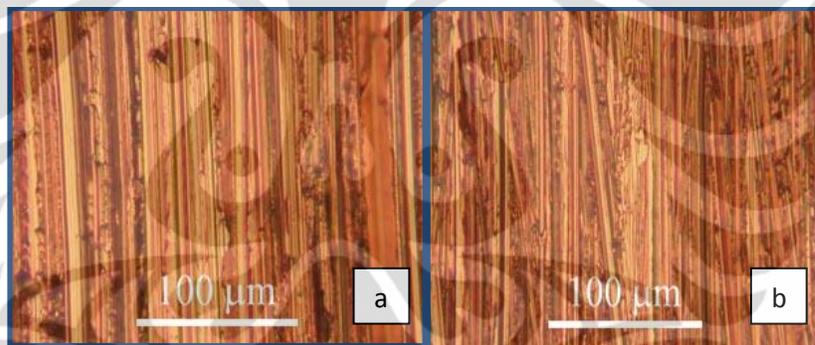
**Gambar 3.8** Proses *mounting*<sup>[13]</sup>.

Media *mounting* yang dipilih haruslah sesuai dengan material dan jenis reagen etsa yang akan digunakan. Pada umumnya mounting menggunakan material plastik sintetik. Materialnya dapat berupa resin (*castable resin*) yang dicampur dengan *hardener*, atau *bakelit*. Penggunaan *castable resin* lebih mudah dan alat yang digunakan lebih sederhana dibandingkan bakelit, karena tidak diperlukan aplikasi panas dan tekanan. Namun bahan *castable resin* ini tidak memiliki sifat mekanis yang baik (lunak) sehingga kurang cocok untuk material-material yang keras. Teknik mounting yang paling baik adalah menggunakan *thermosetting resin* dengan menggunakan material bakelit. Material ini berupa bubuk yang tersedia dengan warna yang beragam. *Thermosetting mounting* membutuhkan alat khusus, karena dibutuhkan aplikasi tekanan (4200 lb/in<sup>2</sup>) dan panas (149<sup>0</sup>C) pada mold saat mounting.

Setelah di-*mounting*, benda uji selanjutnya diampelas. Tujuan dari pengamplasan ini untuk menghaluskan dan meratakan permukaan benda uji.

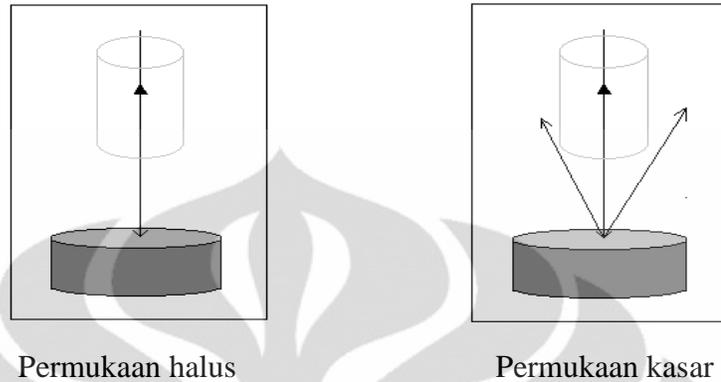
Permukaan yang kasar ini harus diratakan agar pengamatan struktur mudah dilakukan. Pengamplasan dimulai dengan kertas amplas mulai dari #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, hingga #1200.

Hal yang harus diperhatikan pada saat pengamplasan adalah pemberian air. Air berfungsi sebagai pemindah geram, memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul yang dapat merubah struktur mikro sampel dan memperpanjang masa pemakaian kertas amplas. Ketika ingin melakukan pengamplasan pada dua material yang tak sejenis, maka material yang lebih keras diamplas dilingkarannya luar agar geram material itu tidak mengenai material yang lebih lunak. Sehingga struktur mikro tidak terganggu akibat adanya geram itu. Hal lain yang harus diperhatikan adalah ketika melakukan perubahan arah pengamplasan, maka arah yang baru adalah  $45^\circ$  atau  $90^\circ$  terhadap arah sebelumnya.



**Gambar 3.9** (a) Sampel Copper digerinda dengan amplas #180. (b) Sampel Copper digerinda dengan amplas #400<sup>[25]</sup>.

Setelah diamplas, benda uji dipoles. Tujuannya Untuk memperoleh permukaan sampel yang halus bebas goresan dan mengkilap seperti cermin dan menghilangkan ketidakteraturan sampel hingga orde  $0.01 \mu\text{m}$  harus dilakukan pemolesan. Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata. Apabila permukaan sampel kasar atau bergelombang, maka pengamatan struktur mikro akan sulit untuk dilakukan karena cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan secara acak oleh permukaan sampel. Hal ini dapat dijelaskan pada gambar berikut.



**Gambar 3.10** Arah Sinar Pantul yang Mengenai Permukaan Sampel<sup>[25]</sup>.

Tahap pemolesan dimulai dengan pemolesan kasar terlebih dahulu kemudian dilanjutkan dengan pemolesan halus. Ada 3 metode pemolesan antara lain yaitu sebagai berikut :

**a. Pemolesan elektrolit kimia**

Hubungan rapat arus & tegangan bervariasi untuk larutan elektrolit dan material yang berbeda dimana untuk tegangan, terbentuk lapisan tipis pada permukaan, dan hampir tidak ada arus yang lewat, maka terjadi proses etsa. Sedangkan pada tegangan tinggi terjadi proses pemolesan.

**Tabel 3.1** Keuntungan dan Kerugian Pemolesan Elektrolit Kimia<sup>[25]</sup>.

KEUNTUNGAN	KERUGIAN
<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Permukaan dicapai sama atau lebih baik dari proses poles dan etsa mekanik yang terbaik.</li> <li>⊕ Dapat untuk logam yang sulit diproses etsa dan poles secara mekanik; contoh logam yang amat lunak atau keras atau amat tipis.</li> <li>⊕ Seorang teknisi Metalografi dapat dilatih dengan cepat melakukan poles dan etsa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Larutan elektrolit explosive dan bersifat korosif.</li> <li>⊕ Hanya sesuai untuk logam murni atau paduan fasa tunggal.</li> <li>⊕ Untuk elektrolit terdiri dari asam perchlorik, tidak dapat digunakan mounting plastik.</li> <li>⊕ Harus menghindarkan terbentuknya lapisan pasif yang menyebabkan sulit dietsa.</li> </ul>

elektrolitik.

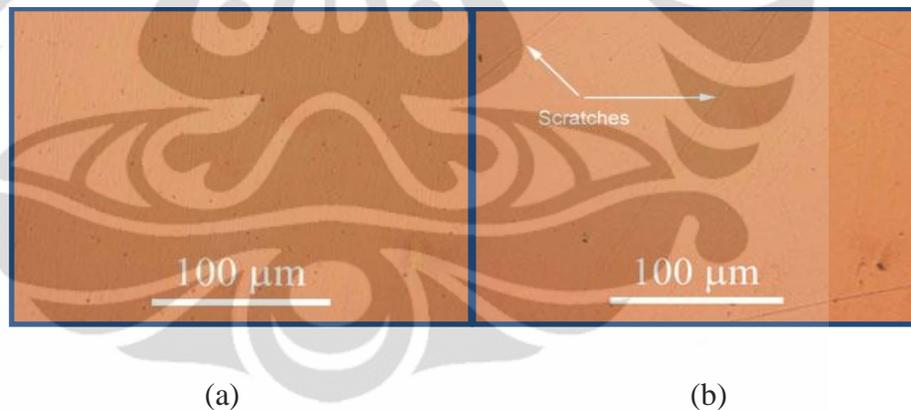
- ⊕ Mengurangi langkah yang biasa dilakukan dengan poles dan etsa elektrolitik.

**b. Pemolesan kimia mekanis**

Merupakan kombinasi antara etsa kimia dan pemolesan mekanis yang dilakukan serentak di atas piringan halus. Partikel pemoles abrasif dicampur dengan larutan pengetsa yang umum digunakan.

**c. Pemolesan elektro mekanis (Metode Reinacher)**

Merupakan kombinasi antara pemolesan elektrolit dan mekanis pada piring pemoles. Metode ini sangat baik untuk logam mulia, tembaga, kuningan, dan perunggu.



**Gambar 3.11** (a) Sampel *Copper* dipoles dengan partikel intan ukuran 6  $\mu\text{m}$ . (b) Sampel *Copper* dipoles dengan partikel intan ukuran 1  $\mu\text{m}$ <sup>[25]</sup>.

Setelah benda uji benar-benar mengkilap dan bebas goresan, benda uji selanjutnya dietsa dengan reagen kimia tertentu. Etsa merupakan proses penyerangan atau pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan pencelupan ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak ke permukaan sampel sehingga detail struktur yang akan diamati akan terlihat

dengan jelas dan tajam. Untuk beberapa material, mikrostruktur baru muncul jika diberikan zat etsa. Sehingga perlu pengetahuan yang tepat untuk memilih zat etsa yang tepat.

Ada beberapa jenis etsa, yaitu :

**a. Etsa kimia**

Merupakan proses pengetsaan dengan menggunakan larutan kimia dimana zat etsa yang digunakan ini memiliki karakteristik tersendiri sehingga pemilihannya disesuaikan dengan sampel yang akan diamati. Memunculkan mikrostruktur bahan kristalin berdasarkan reaksi kimia secara diferensial. Laju reaksi kimia bagian butir berbeda dengan bagian batas butir. Batas butir di bawah mikroskop optik tampak sebagai garis gelap.

Sebagian contohnya antara lain:

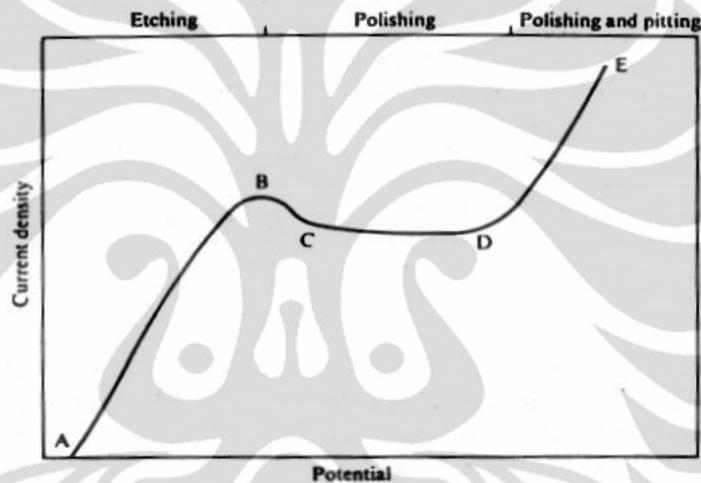
- ⊕ **Nitrid acid / nital** : asam nitrit + alkohol 95% (khusus untuk baja karbon) yang bertujuan untuk mendapatkan perlit, ferit, dan ferit dari martensit.
- ⊕ **Picral** : asam picric + alkohol (khusus untuk baja) yang bertujuan untuk mendapatkan perlit, ferit, dan ferit dari martensit.
- ⊕ **Ferric Chloride** : *ferric chloride* + HCl + air untuk melihat struktur SS, nikel austenitik, dan paduan tembaga.
- ⊕ **Hydrofluoric acid** : HF + air untuk mengamati struktur pada aluminium dan paduannya.
- ⊕ **Kalling #1** : 33 mL HCl (*concentrated*) + 33 mL etil alkohol + 1,5 gr CuCl<sub>2</sub> + 33 mL air.
- ⊕ **Kalling #2** : 100 mL HCl (*concentrated*) + 5 gr CuCl<sub>2</sub> + 100 mL etil alkohol.

Untuk material Stainless steel AISI 430, zat etsa yang digunakan adalah reagen Kalling #1. Waktu etsa tidak boleh terlalu lama (umumnya sekitar 4 – 30

detik), dan setelah dietsa, segera dicuci dengan air mengalir lalu dengan alkohol kemudian dikeringkan dengan alat pengering.

### b. Elektro etsa (Etsa Elektrolitik)

Merupakan proses etsa dengan menggunakan reaksi elektroetsa. Cara ini dilakukan dengan pengaturan tegangan dan kuat arus listrik serta waktu pengetsaan. Etsa jenis ini biasanya khusus untuk stainless steel karena dengan etsa kimia susah untuk mendapatkan detil strukturnya.



Gambar 3.12 Hubungan Kuat Arus dan Tegangan dalam Etsa<sup>[13]</sup>.

- Daerah A – B : daerah proses etsa
- Daerah B – C : daerah tidak stabil
- Daerah C – D : daerah poles
- Daerah D – E : daerah evolusi dan *pitting*

Daerah di atas merupakan rangkaian dasar alat elektro etsa yang umum digunakan dalam skala percobaan laboratorium. Hubungan kuat arus dan tegangan dalam etsa dapat dijelaskan pada gambar 3.8 dimana kurva tersebut terbagi menjadi beberapa daerah karakteristik, antara lain yaitu;

- ⊕ **Daerah A – B:** daerah proses etsa, dimana ion logam sebagai anoda larut dalam larutan elektrolit.

- ⊕ **Daerah B – C:** daerah tidak stabil, karena permukaan logam merupakan gabungan dari daerah pasif dan aktif yang disebabkan oleh perbedaan energi bebas antara butir dan batas butir.
- ⊕ **Daerah C – D:** daerah poles, terjadi kestabilan arus meskipun tegangan ditambahkan. Hal ini disebabkan oleh stabilnya larutan meskipun pada daerah ini logam berubah menjadi logam oksida, tetapi oleh larutan elektrolit logam itu dilarutkan kembali.
- ⊕ **Daerah D – E:** terjadi evolusi oksigen pada anoda, dimana gelembung gas melekat menetap pada permukaan anoda untuk waktu yang lama sehingga menyebabkan *pitting*. Dengan penambahan tegangan, rapat arus melonjak tinggi tak terkendali.

Setelah benda uji dietsa, kemudian dilakukan foto mikro dengan menggunakan mikroskop optik. Pengamatan melalui mikroskop ini menggunakan perbesaran 200x, 500x, dan 1000x. Dari foto mikro yang didapat, kita bisa menghitung ukuran diameter rata-rata butir dan morfologinya.

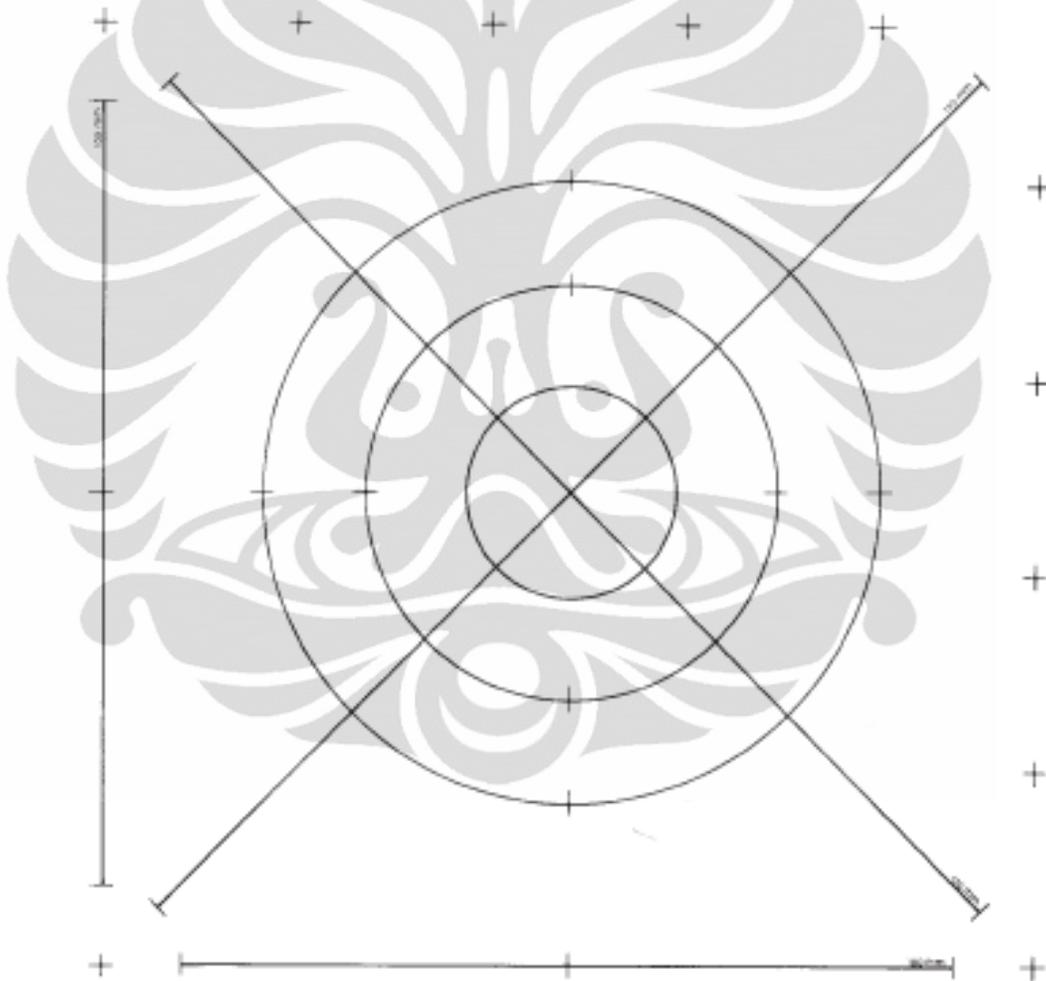


**Gambar 3.13** Mikroskop Optik Olympus DTMM FTUI

### 3.3.5 Perhitungan Besar Butir

#### 3.3.5.1 Perhitungan Besar Butir *Equiaxed*

Butir yang berbentuk *equiaxed*, dapat dihitung diameter rata-rata butirnya dengan menggunakan metode *Intercept Heyn*<sup>[26]</sup>. Pada metode ini, kita menggunakan 3 buah lingkaran dengan diameter yang berbeda-beda, yaitu 79.58 mm, 53.05 mm, dan 26.53 mm. Total keliling ( $L_T$ ) dari ketiga lingkaran tersebut adalah 500 mm.



**Gambar 3.14** Lingkaran metode *Intercept Heyn*<sup>[26]</sup>

Kemudian, banyaknya batas butir yang berpotongan (P) dengan ketiga lingkaran tersebut dihitung. Lalu dimasukkan ke rumus berikut<sup>[26]</sup> :

$$P_L = \frac{P \times M}{L_T} \quad (3.1)$$

$$L_3 = 1/P_L \quad (3.2)$$

$$G = [-6.643 \log(L_3) - 3.2877] \quad (3.3)$$

Dimana :

P = jumlah titik potong (P) batas butir dari total garis yang dalam hal ini berbentuk lingkaran.

$P_L$  = Jumlah titik potong per satuan panjang

M = Perbesaran (jika 200x, nilai M=200)

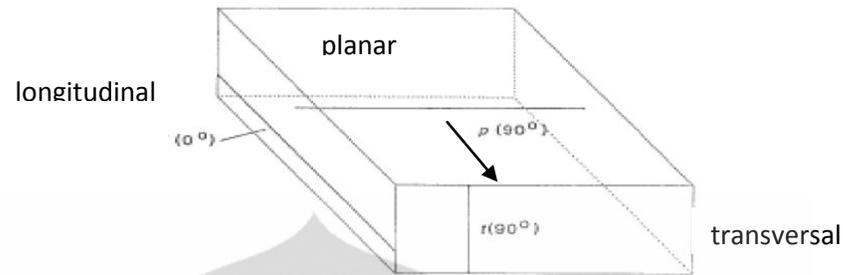
$L_T$  = panjang garis total (500 mm)

$L_3$  = Panjang garis perpotongan (mm)

Foto mikro yang didapat dari metalografi ukurannya harus dalam bentuk *postcard* (3.5 x 5 inchi). Selanjutnya nilai G yang didapat dikonversi ke nilai diameter rata-rata butir yang dapat dilihat pada ASTM E112. Jika nilai G yang didapat berada diantara nilai-nilai G yang ada di ASTM E112, nilai diameter butir rata-rata dapat dihitung dengan menggunakan metode interpolasi.

### 3.3.5.2 Perhitungan Besar Butir *non-equiaxed*

Perhitungan diameter rata-rata butir *non-equiaxed* seperti butir yang di *rolling* dapat menggunakan metode *Straight Line*<sup>[21]</sup>. Pada metode ini kita menghitung diameter rata-rata butir secara longitudinal, transversal dan planar. Sehingga setiap sisi (longitudinal, transversal dan planar) dari benda uji harus didapat foto mikronya terlebih dahulu. Ukuran fotomikro tersebut harus diubah dahulu ke ukuran *postcard* (3.5 x 5 inchi)



**Gambar 3.15** Skema Pengambilan Foto Mikro Butir *Elongated*<sup>[26]</sup>

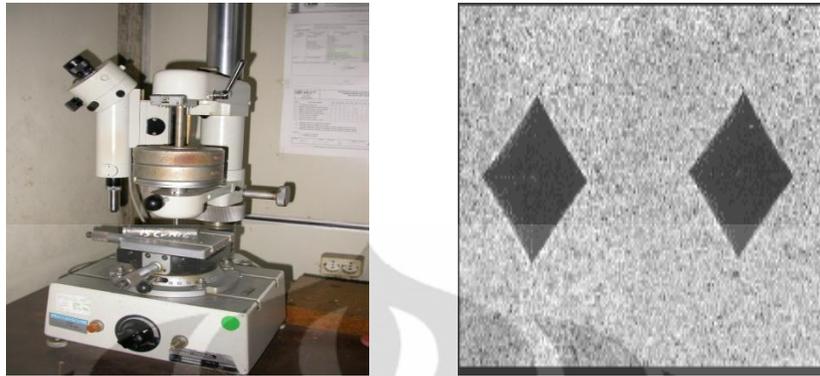
Selanjutnya setelah mendapat foto mikro dari ketiga sisi tersebut, buat garis (3-6 buah) yang panjang totalnya 500 mm pada bidang masing-masing bidang/sisi. Selanjutnya, dicari nilai  $G$  dari masing-masing bidang dengan rumus yang sama dengan rumus perhitungan butir *equiaxed*. Setelah didapat nilai  $G$  masing-masing bidang, selanjutnya masukkan nilai  $G$  tersebut ke rumus berikut<sup>[26]</sup> :

$$G_{\text{Total}} = (G_{\text{Longitudinal}} \times G_{\text{Transversal}} \times G_{\text{Planar}})^{0.33} \quad (3.4)$$

Nilai  $G_{\text{Total}}$  yang telah didapat dikonversi ke diameter rata-rata butir pada ASTM E112.

### 3.3.7 Pengujian Nilai Kekerasan

Pengujian nilai kekerasan benda uji original dan benda uji setelah *warm rolling* dilakukan dengan menggunakan metode Vickers. Pada metode ini digunakan indenter intan berbentuk piramida dengan sudut  $136^\circ$ . Prinsip pengujian adalah sama dengan metode Brinell, walaupun jejak yang dihasilkan berbentuk bujur sangkar berdiagonal. Panjang diagonal diukur dengan skala pada mikroskop pengukur jejak.



**Gambar 3.16** Alat Uji Vickers BPPT Serpong (kiri) dan Jejak Indentasi Vickers (kanan)

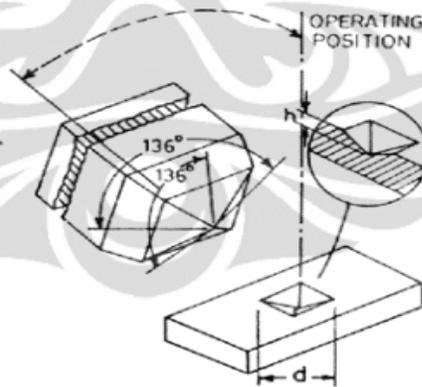
Nilai kekerasan suatu material diberikan oleh<sup>[27]</sup>:

$$VHN = \frac{1.8544 \times P}{d^2} \quad (3.5)$$

Dimana:

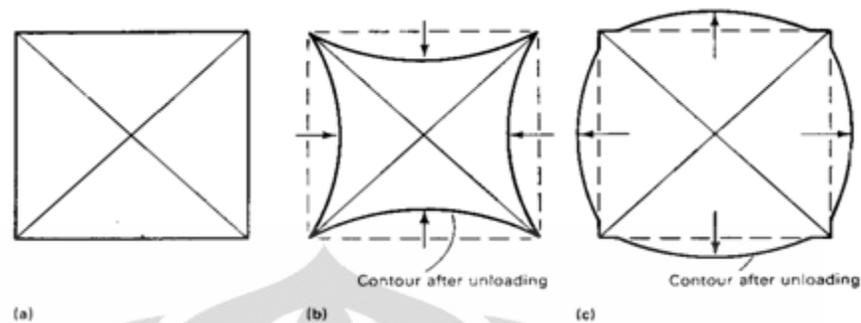
**P** = beban ( $\text{kg/mm}^2$ )

**d** = panjang diagonal rata-rata dari jejak berbentuk bujur sangkar (mm).



**Gambar 3.17** Skematis pengujian kekerasan dengan metode Vickers<sup>[28]</sup>

Pengujian metode Vickers akan memberikan dampak hasil yang berbeda-beda tergantung pada elastisitas material. Apabila material lunak atau keelastisitasnya tinggi, maka hasil indentasi akan mengempis. Dan pada material yang kaku, maka akan berbentuk mengembang.



**Gambar 3.18.** Distorsi oleh indenter pyramid intan karena efek elastisitas; (a)Indentasi sempurna; (b)Indentasi mengempis; (c)Indentasi menggebung<sup>[27]</sup>

Standard pengujian kekerasan Vickers menggunakan ASTM E 92-82 dan JIS Z 2244:2003.

### 3.3.8 Pengujian *Immersed Solution*

Dalam uji *immersed solution* yang ada hanyalah larutan. Berdasarkan standar ASTM G48-03 – *Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion resistance of Stainless Steel and Related Alloys by Use Ferric Chloride Solution*<sup>[29]</sup>, larutan yang digunakan adalah ferit klorida ( $\text{FeCl}_3$ ). Serbuk  $\text{FeCl}_3$  sebanyak 100 gr diletakkan di dalam *beaker glass* dan dilarutkan dengan aquades hingga volumenya mencapai 900 ml sehingga larut menjadi  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

Sampel yang berukuran (20 x 20) mm, diampelas terlebih dahulu dengan ampelas #800 untuk menghilangkan oksida yang menempel pada permukaan benda uji. Kemudian diikat dengan menggunakan benang nilon. Lalu digantungkan ke dalam *beaker glass* yang berisi larutan  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  sebanyak 100 ml. *Beaker glass* kemudian ditutup agar udara luar khususnya oksigen tidak masuk kedalam.

Selanjutnya *beaker glass* tadi diletakkan diatas *magnetic stirrer*. Kecepatan putar *magnetic bar*-nya diatur pada skala 5, kemudian suhu pengujian adalah suhu ruangan. Pengujian dilakukan selama 3 hari non-stop dengan kecepatan putar *magnetic bar* yang sama sepanjang hari.



Gambar 3.19 Pengujian Celup

### 3.3.9 Pengujian *Weight Loss*

Setelah sampel diuji *Immersed Solution* selama kurang lebih 3 hari, maka setelah itu dilakukan uji *weight loss*. Uji *weight loss* ini dilakukan untuk menghitung besarnya berat/massa benda uji yang hilang akibat korosi sumuran dengan menggunakan timbangan digital yang memiliki ketelitian 4 digit dibelakang koma. Uji ini dilakukan sesudah dan sebelum melakukan pengujian *immersed solution*.

Setelah mendapatkan massa benda uji yang hilang maka, nilai itu dimasukkan kedalam rumus *mpy* (*miles per year*)<sup>[22]</sup>, yaitu :

$$mpy = \frac{534 W}{D.A.T} \quad (3.6)$$

Dimana :

- W : massa yang hilang (mg)
- D : densitas benda uji ( $\text{gr/cm}^3$ )
- A : luas area yang terekspos ( $\text{inch}^2$ )
- T : waktu celup (jam)

Selanjutnya, setelah mendapatkan nilai *corrosion rate* dalam mpy dari hasil perhitungan rumus diatas, maka kita dapat menentukan kategori *corrosion rate* benda uji berdasarkan Tabel 3.2 dibawah ini :

**Tabel 3.2** Kategori *Corrosion Rate* Standar NACE<sup>[30]</sup>.

Kategori	mpy
<i>outstanding</i>	<1
<i>excellent</i>	1 - 5
<i>good</i>	5 - 20
<i>fair</i>	20 - 50
<i>poor</i>	50 - 200
<i>unacceptable</i>	> 200

### 3.3.10 Pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM)

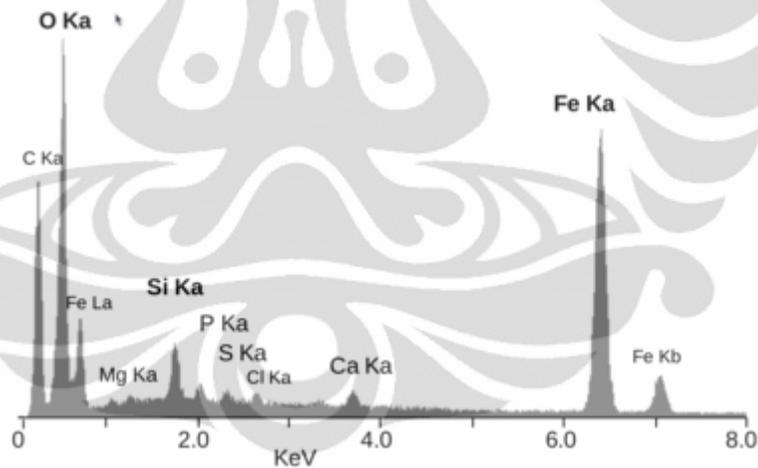
Pengujian metalografi ini menggunakan alat *Scanning Electron Microscope* (SEM).



**Gambar 3.20** Alat *Scanning Microscope* LEO 420i DTMM FTUI

SEM yang digunakan pada pengujian ini adalah *detector* QBSD. QBSD merupakan suatu teknik untuk membedakan fasa sehingga bisa melihat fasa-fasa, seperti karbida, yang ada didalam material yang ingin diuji. Pembedaan fasa tersebut dilakukan berdasarkan perbedaan warna yang ditimbulkan. Jika fasa sudah dapat dilihat selanjutnya ditembakkan EDS ke daerah tertentu untuk diketahui unsur yang

terkandung pada fasa tersebut. EDS atau *Energy-dispersive X-Ray spectroscopy* merupakan teknik analitis yang digunakan untuk menganalisa unsur-unsur atau karakterisasi kimia dari sampel. EDX bekerja dengan memanfaatkan interaksi sumber eksitasi sinar X dengan sampel. Kemampuan pengkarakterisasian ini berkaitan dengan sifat masing-masing unsur yang memiliki struktur atom yang unik yang membedakannya dengan yang lainnya sehingga dapat diidentifikasi<sup>[31]</sup>. Bila elektron dengan energi yang cukup besar menumbuk pada sampel, mereka menyebabkan terjadinya emisi sinar-X yang energinya dan intensitasnya bergantung pada komposisi elemental sampel. Dengan menggunakan fenomena ini untuk menganalisa komposisi elemental dari volume-mikro (kasarnya satu sampai beberapa ratus kubik mikrometer) itulah yang disebut sebagai analisis mikro. Pada EDX di mana sinar-x yang diemisikan dikonversi dan disimpan secara elektronik dan bukan dengan difraksi kristal. Gambar 3.21 berikut adalah contoh hasil dari pengujian EDX.



**Gambar 3.21** Spektrum Sinar-X dari Beberapa Unsur Sebagai Hasil EDX.

EDX Spektroskopi ini dapat digunakan untuk menganalisa sampel secara kualitatif dan kuantitatif. Analisa kualitatif adalah proses identifikasi unsur-unsur yang ada dalam sampel sedangkan analisa kuantitatif bertujuan untuk menjawab berapa banyak unsur X, Y, Z yang ada dalam sampel.

Analisa kualitatif dilakukan dengan cara menentukan energi dari *peak* yang ada dalam *spectrum* dan membandingkan dengan tabel energi emisi sinar-x dari unsur-unsur yang sudah diketahui. Namun hal itu tidak perlu dilakukan sekarang, karena komputer akan secara otomatis memberikan simbol unsur untuk setiap *peak* pada *spectrum*. Analisa kuantitatif menampilkan data unsur dan konsentrasi unsur yang terdapat di dalam sampel. Untuk melakukan analisa kuantitatif maka perlu dilakukan beberapa proses seperti: meniadakan *background*., dekonvolusi *peak* yang bertumpang tindih dan menghitung konsentrasi unsur<sup>[31]</sup>.

### 3.3.11 Pengujian X-Rays Diffraction (XRD)

Pengujian XRD ini bertujuan untuk melihat ada tidaknya senyawa karbida ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) pada batas butir benda uji hasil canai hangat. Pengujian difraksi sinar-X (*X-ray diffraction*/XRD) merupakan salah satu metode karakterisasi material yang paling tua dan paling sering digunakan hingga sekarang ini. Sinar X pertama kali ditemukan pada 1895 oleh Willhelm C Rontgen.

Pada pengujiannya, benda yang ingin diuji bisa dalam bentuk serbuk atau padatan (*bulk*). Jika dalam bentuk padatan, sebaiknya benda dipreparasi terlebih dahulu misalnya diampelas. Pengampelasan ini bertujuan untuk menghilangkan oksida yang terbentuk pada permukaan benda uji yang dapat mengganggu hasil pengujian. Kemudian benda uji diletakkan pada penjepit yang ada di alat. Posisi benda uji setelah dijepit harus datar. Kemudian sinar-X yang berasal dari radiasi  $\text{CuK}\alpha$  ditembakkan ke benda uji. Sudut awal ( $2\theta$ ) penembakan adalah  $10^\circ$  dan sudut akhirnya  $80^\circ$ . Kecepatan rotasi sinar-X nya adalah  $2^\circ$  per menit. Pantulan sinar X yang dihasilkan selanjutnya akan ditangkap oleh *detector* untuk selanjutnya dianalisa.

Energi dari sinar X besar karena memiliki panjang gelombang 10 sampai  $0.0001 \text{ nm}$ <sup>[34]</sup>. Energi yang besar ini dapat menembus ke dalam material dan memberikan informasi mengenai struktur fasa, dengan pengolahan lebih lanjut, ukuran butir atau kristalit juga dapat diketahui. Salah satu informasi dari reaksi

tersebut adalah penghamburan (difraksi). Sifat inilah yang dimanfaatkan sebagai salah satu teknik untuk karakterisasi material.

Difraksi sinar X digunakan untuk karakterisasi serbuk nanopartikel ZnO. Ukuran nanopartikel diukur dengan menggunakan difraksi sinar X. Difraksi menggunakan radiasi  $\text{CuK}\alpha$  dengan  $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ . Secara khusus untuk menentukan pengukuran besar kristalit nanopartikel ZnO dilakukan dengan mengolah data yang diperoleh dari hasil XRD yaitu dengan menggunakan persamaan Scherrer, sesuai dengan persamaan 3.1 berikut<sup>[32]</sup>:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.1)$$

dimana,  $D$  adalah ukuran diameter kristalit,  $k$  adalah konstanta Scherer ( $=0.89$ ),  $\lambda$  adalah panjang gelombang difraksi sinar-X yang digunakan ( $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ ),  $\beta$  adalah lebar pertengahan dari puncak difraksi maksimum (*full width at half maximum*, FWHM) dihitung dalam radian; dan  $\theta$  adalah sudut difraksi (*Bragg Angle*) yang terbaca oleh mesin XRD. Dari persamaan ini akan didapatkan besar ukuran kristalit rata rata.

Dalam penggunaan persamaan Scherrer ini, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan agar tidak terjadi kesalahan yang diakibatkan oleh pelebaran (*broadening*) pada puncak-puncak difraksi karena faktor instrument dan regangan. Faktor adanya regangan yang tidak seragam di dalam material mengakibatkan pengaruh pelebaran dan hasil akhirnya berupa puncak-puncak difraksi yang melebar. Selain itu pelebaran hasil uji difraksi sinar-X dapat juga disebabkan oleh instrument pada mesin itu sendiri dan operator yang berbeda. Jadi, didapatkan secara ringkas pelebaran hasil uji sinar-X yaitu<sup>[32]</sup>:

$$B_{\text{total}} = B_{\text{kristal}} + B_{\text{regangan}} + B_{\text{instrumen}} \quad (3.3)$$

Selain itu, perlu diperhatikan apakah kurva yang dihasilkan menunjukkan tipikal Lorentzian, Gaussian, dan atau campuran keduanya. Ketiga tipikal ini memberikan perbedaan perhitungan yaitu<sup>[32]</sup>:

Lorentzian: 
$$B_r = B_{\text{total}} - B_{\text{instrumen}} \quad (3.4)$$

Gaussian:  $B_r^2 = B_{\text{total}}^2 - B_{\text{instrumen}}^2$  (3.5)

Campuran:  $B_r^2 = (B_{\text{total}}^2 - B_{\text{instrumen}}^2) (B_{\text{total}}^2 - B_{\text{instrumen}}^2)^{1/2}$  (3.6)

Dengan menggunakan persamaan Scherer dan dari penggabungan semua rumus yang dibahas di atas persamaan dapat didapatkan secara ringkas<sup>[32]</sup>:

$$B \cos \varnothing = \frac{k\lambda}{t} + n \sin \varnothing$$
 (3.7)

$$y = c + mx$$
 (3.8)

Konstanta  $c$  dapat dicari dengan memanfaatkan grafik pengolahan data pelebaran pada beberapa puncak data, dimana<sup>[32]</sup>:

$$c = \frac{k\lambda}{t}$$
 (3.9)

Sehingga nilai ukuran kristalit rata-rata ( $t$ ) didapatkan<sup>[32]</sup>:

$$t = \frac{k\lambda}{c}$$
 (3.10)



**Gambar 3.22** Alat Uji XRD Shimadzu di PLT UIN Jakarta

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Uji Komposisi

Kode Sampel Sample Code	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
1	0.084	0.542	0.036	<0.003**	0.153	0.096	18.7
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	0.031	0.006	0.037	<0.002**	0.023	0.074	Bal.

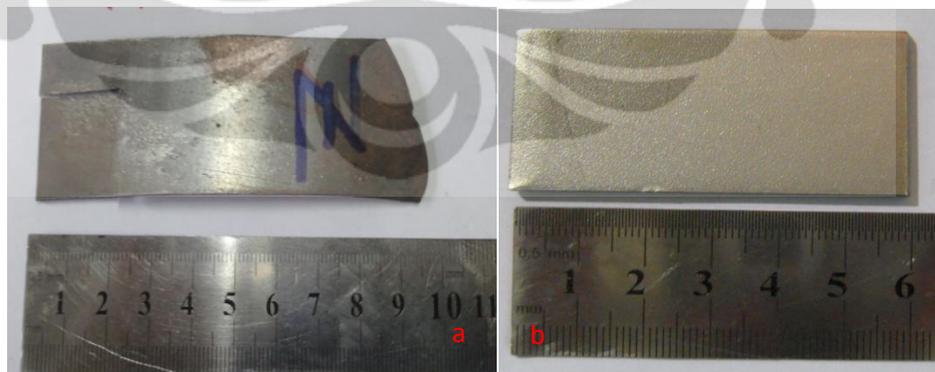
catatan :  
\* ketidakpastian bentangan dengan tingkat kepercayaan 95% dengan factor cakupan K=2  
\*\* (<) menunjukkan nilai berada di bawah *quantification limit* dari alat uji

Gambar 4.1 Hasil Uji OES pada Benda Uji

Berdasarkan hasil uji komposisi dengan menggunakan OES, maka dapat dipastikan bahwa benda uji tersebut adalah *Stainless Steel AISI 430* dimana kadar C 0.084%, Cr 18.7%, Ni 0.096%. Komposisi kimia benda uji sesuai dengan spesifikasi material *Stainless Steel AISI 430*.

### 4.2 Pengukuran Dimensi Benda Uji

Hasil pengukuran dimensi benda uji yang telah mengalami canai hangat dapat dilihat pada Tabel 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.2 Foto Benda Uji (a) Hasil Deformasi Canai Hangat dan (b) *Original*

**Tabel 4.1** Hasil Pengukuran Dimensi Benda Uji Sebelum dan Sesudah Proses Penacanaan 50%, 55%, dan 60% pada Suhu 650°C dengan Media Pendinginan Air.

Sampel	Ukuran Awal (mm)			% Deformasi Teoritis	Ukuran Akhir Aktual (mm)			$t_f$ Teoritis (mm)	% Deformasi Aktual
	$P_0$	$L_0$	$t_0$		$P_f$	$L_f$	$t_f$		
X	59.6	30	2.95	50	92.67	31.37	1.72	1.475	41.81
Y	60	30.75	2.95	55	99.8	31.7	1.68	1.3275	42.94
Z	60.9	30.9	2.95	60	105.43	32.53	1.46	1.18	50.28

Dari Tabel 4.1 terlihat bahwa terdapat perbedaan ketebalan untuk tiap sampel yang mengalami deformasi yang berbeda. Semakin besar deformasi yang diberikan pada benda uji, maka ketebalan dari benda uji akan semakin kecil. Namun, deformasi yang diinginkan tidak sesuai dengan deformasi aktual. Dimana deformasi aktual lebih kecil daripada deformasi teoritis. Perbedaan ini dikarenakan adanya mekanisme *roll flattening* pada saat proses canai. Skala angka untuk menentukan gap roller pada mesin roll yang terlalu besar juga berkontribusi pada masalah ini.

Benda uji yang mengalami deformasi, sifat mekanis dan mikrostrukturnya akan berubah. Dimana sifat mekanis seperti kekerasan dan kekuatan akan meningkat. Butir benda yang semula bulat (*equiaxed*) akan lebih memipih (*elongated*).

Hasil Perhitungan laju regangan untuk tiap-tiap benda uji disajikan pada tabel dibawah ini :

**Tabel 4.2** Perhitungan Laju Regangan Tiap Sampel

Sampel	Diameter roll (mm)	Jari-jari roll (mm)	V roll (mm/s)	$\epsilon$	$\dot{\epsilon}$ actual (/s)
X (50%0)	104	52	133.33	0.54	9.01
Y (55%)				0.56	9.22
Z (60%0)				0.69	10.61

Dari Tabel 4.2 dapat terlihat bahwa laju regangan benda uji Z yang mengalami deformasi aktual sebesar 50.3 % paling tinggi dibandingkan benda uji

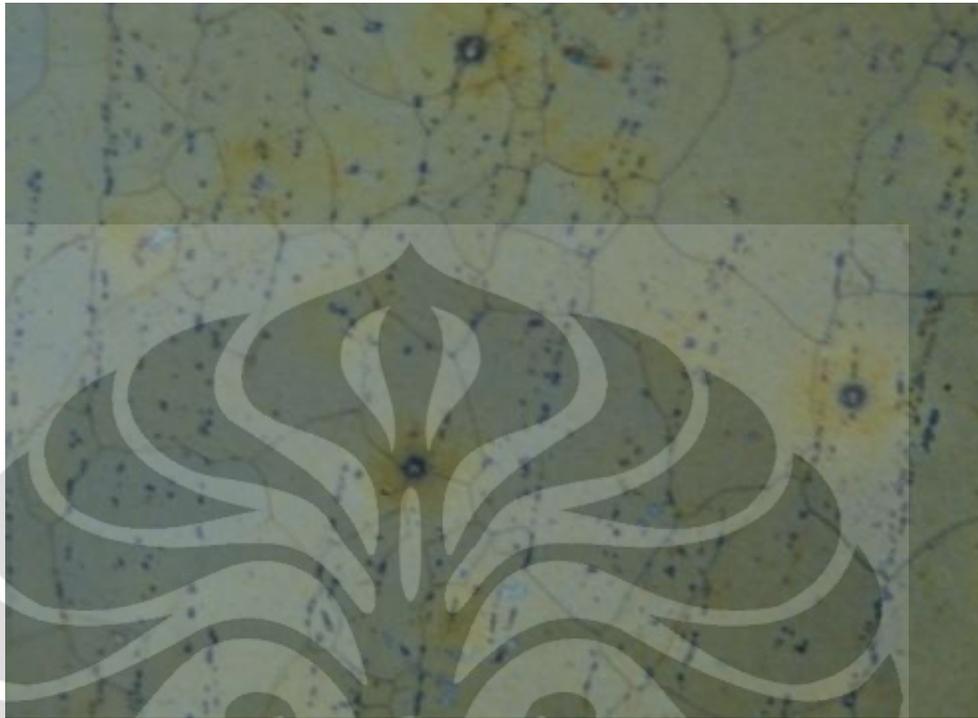
lainnya. Hal ini berarti semakin banyak tumpukan dislokasi sehingga kekerasan semakin meningkat.

### 4.3 Hasil Pengamatan Metalografi

Akibat adanya deformasi yang diberikan pada benda uji, maka mikrostruktur dari benda uji akan ikut berubah. Untuk mengetahui mikrostruktur dari benda uji yang telah dideformasi dilakukan pengamatan metalografi. Benda uji yang telah diampelas, dipoles, dan dietsa dengan menggunakan zat Kalling #1 selama 10 detik. Selain menggunakan larutan Kalling #1, proses etsa juga dilakukan dengan menggunakan elektroetsa *Nitric Acid* (60/40) dengan tegangan sebesar 1-3 V selama 1-3 detik. Setelah terlihat jelas, maka morfologi dan ukuran butir dari benda uji sebelum dan sesudah perlakuan diamati.

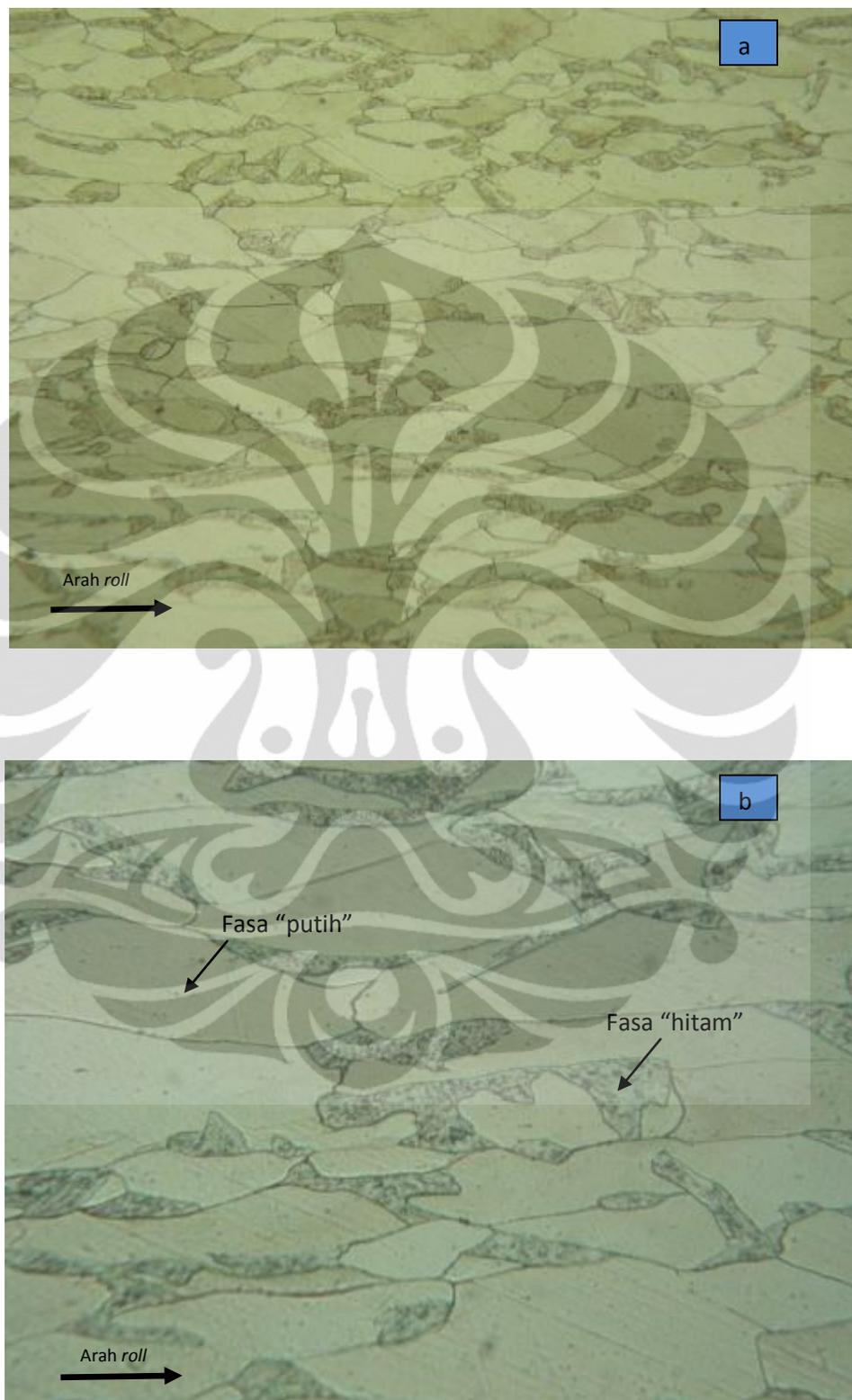


**Gambar 4.3** Benda Uji *Original* Bidang Longitudinal, Etsa Kalling#1 Perbesaran 200x



**Gambar 4.4** Sampel *Original* Bidang Longitudinal, Elektroetsa *Nitric Acid* (60/40) Perbesaran 1000x

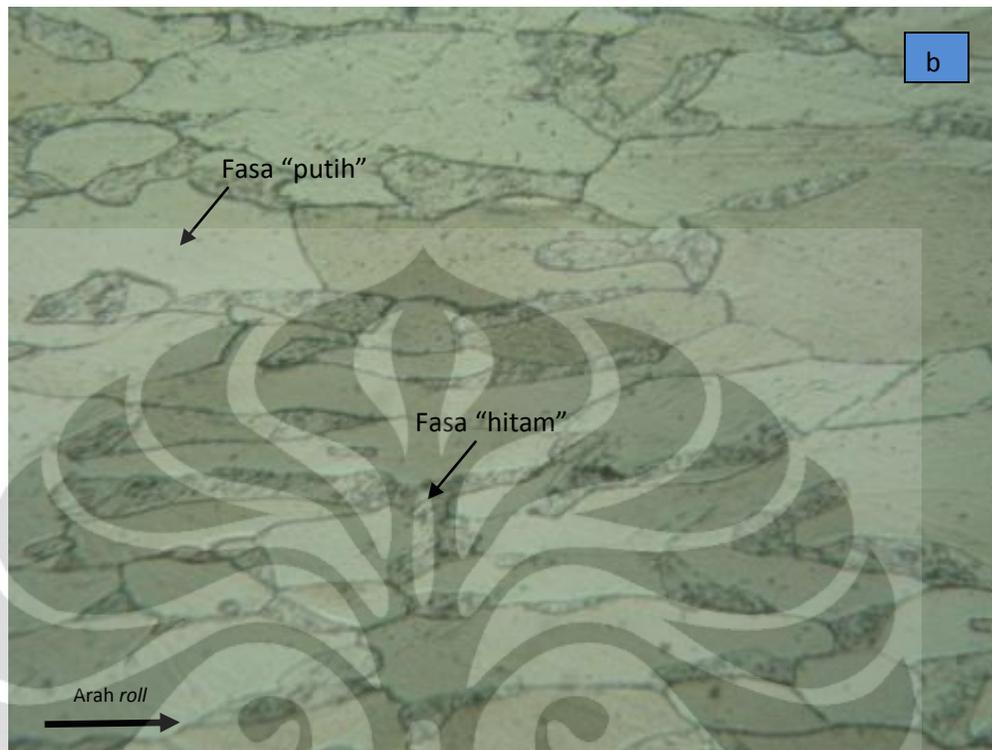
Pada Gambar 4.3 dan 4.4, yang merupakan foto mikro dari sampel *Original*, butirnya berbentuk *equiaxed*. Pada gambar juga terdapat titik-titik hitam yang tersebar baik didekat batas butir maupun di dalam butir ferit. Menurut gambar literatur *Stainless Steel* AISI 430 yang ada seperti pada Gambar 2.9, disebutkan bahwa titik-titik hitam tersebut merupakan presipitat *chromium carbide* yang tersebar secara acak. Untuk membuktikan hal ini, perlu dilakukan pengujian lebih lanjut seperti EDS. Pembahasan selanjutnya dapat dibaca pada Sub-bab 4.5 mengenai hasil uji EDS.



**Gambar 4.5** Sampel X Bidang Longitudinal, Etsa Kalling#1 Perbesaran (a) 200x (b) 500x,

Pada Gambar 4.5, sampel X, yang mengalami perlakuan *reheating* 1100°C selama 5 menit lalu diturunkan ke suhu 650°C dan dideformasi 50% dan didinginkan oleh air mengalir, terlihat bahwa ukuran butirnya lebih kecil daripada benda uji O. Kemudian terdapat butir-butir kecil *equiaxed* disekitar butir besar. Ini membuktikan bahwa telah terjadi rekristalisasi dinamis pada benda uji X. Butir berukuran besar pada benda uji X terlihat masih banyak, namun pada butir-butir besar tersebut terdapat *deformation bond* yang merupakan cikal-bakal terbentuknya sub-butir.





**Gambar 4.6** Sampel Y Bidang Longitudinal, Etsa Kalling#1 Perbesaran (a) 200x (b) 500x

Begitu juga dengan benda uji Y seperti yang terlihat pada Gambar 4.6, ukuran butirnya menjadi lebih kecil dan butir-butir berukuran besar terlihat lebih sedikit daripada benda uji X. Butir-butir besar yang ada juga terdapat *deformation band*. *Deformation band* tampak terlihat lebih jelas daripada benda uji X. hal ini dikarenakan deformasi yang diberikan memang lebih besar daripada benda uji X. Butir kecil yang berbentuk *equiaxed* juga lebih banyak daripada benda uji X. Berarti rekristalisasi dinamis terjadi juga pada benda uji Y.



**Gambar 4.7** Sampel Z Bidang Longitudinal, Etsa Kalling#1 Perbesaran (a) 200x (b) 500x

Untuk benda uji Z, seperti tampak pada Gambar 4.7, butir-butirnya menjadi lebih kecil dan pipih. Tampak pula bahwa mikrostruktur benda uji Z lebih didominasi oleh butir-butir dengan ukuran yang lebih kecil. Butir-butir yang kecil umumnya berbentuk *elongated* karena deformasi yang diberikan memang paling besar. Ini menandakan bahwa benda uji Z juga mengalami rekristalisasi dinamis sama seperti benda uji X dan Y. *Deformation band* juga lebih jelas terlihat pada benda uji Z. Jika dilakukan deformasi yang lebih besar lagi, *deformation band* ini akan berubah menjadi sub-butir sehingga diameter butir rata-rata benda uji dapat lebih diperkecil lagi.

Berarti pada suhu 650°C dengan laju regang di atas nilai kritisnya dan semakin besar deformasi yang diberikan pada benda uji, maka dapat menghasilkan diameter butir yang lebih kecil.

Dari ketiga gambar benda uji hasil canai hangat, terlihat bahwa ada dua jenis butir yang memiliki warna berbeda yaitu warna putih dan hitam. Dicurigai bahwa benda uji hasil canai hangat ini memiliki fasa yang berbeda (selanjutnya disebut fasa ‘hitam’ dan fasa ‘putih’). Untuk itu dilakukan pengujian SEM QBSD + EDS, XRD, dan *microvickers* untuk memastikan kedua fasa tersebut. Hasil dan pembahasan kedua pengujian tersebut dapat dibaca pada Sub-bab 4.5, 4.6 dan 4.7.

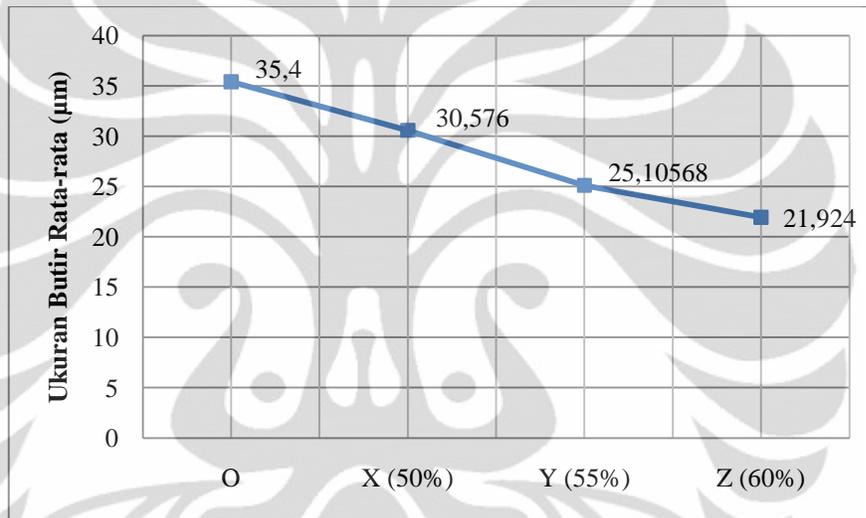
#### **4.4 Ukuran Butir Ferit**

##### **4.4.1 Pengukuran Diameter Butir Ferit**

Untuk tiap benda uji, perhitungan butir dilakukan sebanyak 3 kali. Kemudian didapat rata-rata diameter butir. Perhitungan diameter rata-rata butir benda uji menggunakan metode *Intercept Heyn*<sup>[26]</sup> untuk butir *equiaxed* dan *non-equiaxed*. Hasil dari perhitungan berdasarkan metode tersebut dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

**Tabel 4.3** Diameter Rata-rata Butir tiap Benda Uji

Sampel	G No (ASTM E112)	Diameter Butir Rata-rata ( $\mu\text{m}$ )
O	6.712365941	35.4
X	7.127736739	30.58
Y	7.689806132	25.11
Z	8.080819338	21.92

**Grafik 4.1** Ukuran Butir Rata-rata terhadap Deformasi

Dari perhitungan, semakin besar deformasi yang diberikan maka diameter butir rata-rata yang didapat akan semakin kecil. Pada gambar 4.5, terlihat adanya butir-butir kecil disekitar butir besar. Ini menandakan telah terjadi rekristalisasi dinamis pada sampel X yang dipanaskan pada suhu  $1100^{\circ}\text{C}$  kemudian diturunkan ke  $650^{\circ}\text{C}$ , lalu dideformasi 50 % dan didinginkan oleh air mengalir.

Ukuran butir ferit yang didapat pada benda uji X sebesar  $30.576 \mu\text{m}$ . Benda uji Y yang mengalami deformasi 55 %, diameter rata-rata ukuran butirnya lebih kecil daripada benda uji X. Benda uji Z yang mengalami *reheating*  $1100^{\circ}\text{C}$ , ditahan selama 5 menit, dan diturunkan suhunya ke  $650^{\circ}\text{C}$  lalu dicanai dengan besar deformasi 60 %, ternyata menunjukkan indikasi yang sama. Diameter rata-rata ukuran butir feritnya paling kecil diantara benda uji lainnya. Hasil pengujian yang didapat sesuai dengan

teori yang ada dimana semakin besar deformasi akan menghasilkan ukuran butir yang kecil pula.

#### 4.5 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan alat uji Vickers dengan beban 5 kgf. Pengujian kekerasan dilakukan sebanyak 3 kali penjejakan untuk tiap benda uji untuk mendapatkan nilai kekerasan rata-rata. Skema pengambilan titik penjejakan diperlihatkan pada gambar dibawah ini :



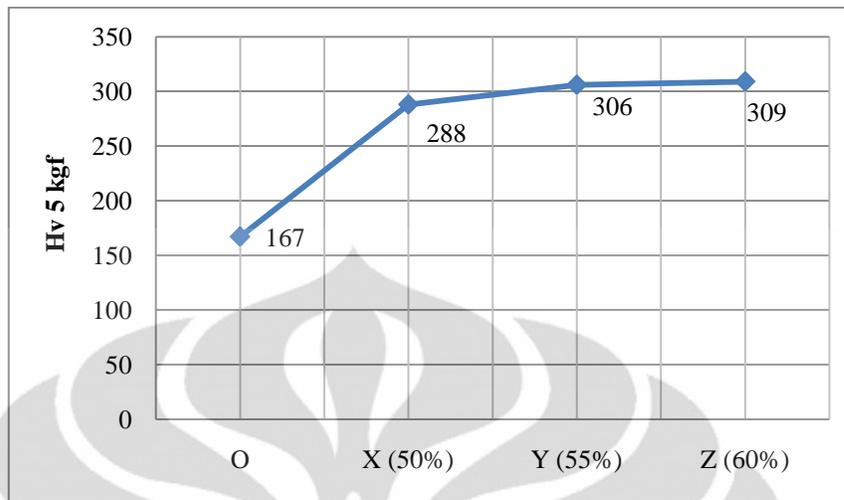
**Gambar 4.8** Skema Pengambilan Titik Jejak pada Benda Uji pada Bidang Longitudinal

Kemudian setelah nilai kekerasan rata-rata tiap benda uji disajikan pada Tabel 4.3 dibawah ini:

**Tabel 4.4** Nilai Kekerasan Benda Uji

Sampel	Kekerasan (Hv 5kgf)	HRB	BHN
O	167	84.01	158.4
X (50%)	288	104.8	274
Y (55%)	306	-	291
Z (60%)	309	-	294

Bila data pada tabel tersebut disajikan dalam bentuk grafik, maka didapatkan grafik nilai kekerasan tiap benda uji seperti terlihat dibawah ini :



**Grafik 4.2** Nilai Kekerasan Tiap Benda Uji

Dari grafik diatas dapat terlihat bahwa kekerasan semakin meningkat dengan menurunnya ukuran butir. Sesuai dengan persamaan Hall-Petch, semakin kecil ukuran butir, maka kekerasan dan kekuatan akan semakin meningkat. Berdasarkan teori yang ada, pengecilan ukuran butir akan menghasilkan batas butir yang lebih banyak. Batas butir merupakan tempat dimana dislokasi sulit atau bahkan berhenti bergerak. Hal ini disebabkan karena perbedaan orientasi antar butir. Sehingga untuk bergerak ke butir lainnya dislokasi membutuhkan energi yang lebih besar. Dengan sulitnya dislokasi bergerak maka kekerasan dan kekuatan akan meningkat.

Pengujian kekerasan juga dilakukan pada fasa “hitam” dan fasa “putih” karena dicurigai kedua fasa ini adalah fasa yang berbeda. Berikut adalah hasil pengujian yang dilakukan dengan menggunakan alat uji *MicroVickers* dengan beban 200 gr.

**Tabel 4.5** Nilai Kekerasan Fasa “Putih” dan fasa “Hitam”

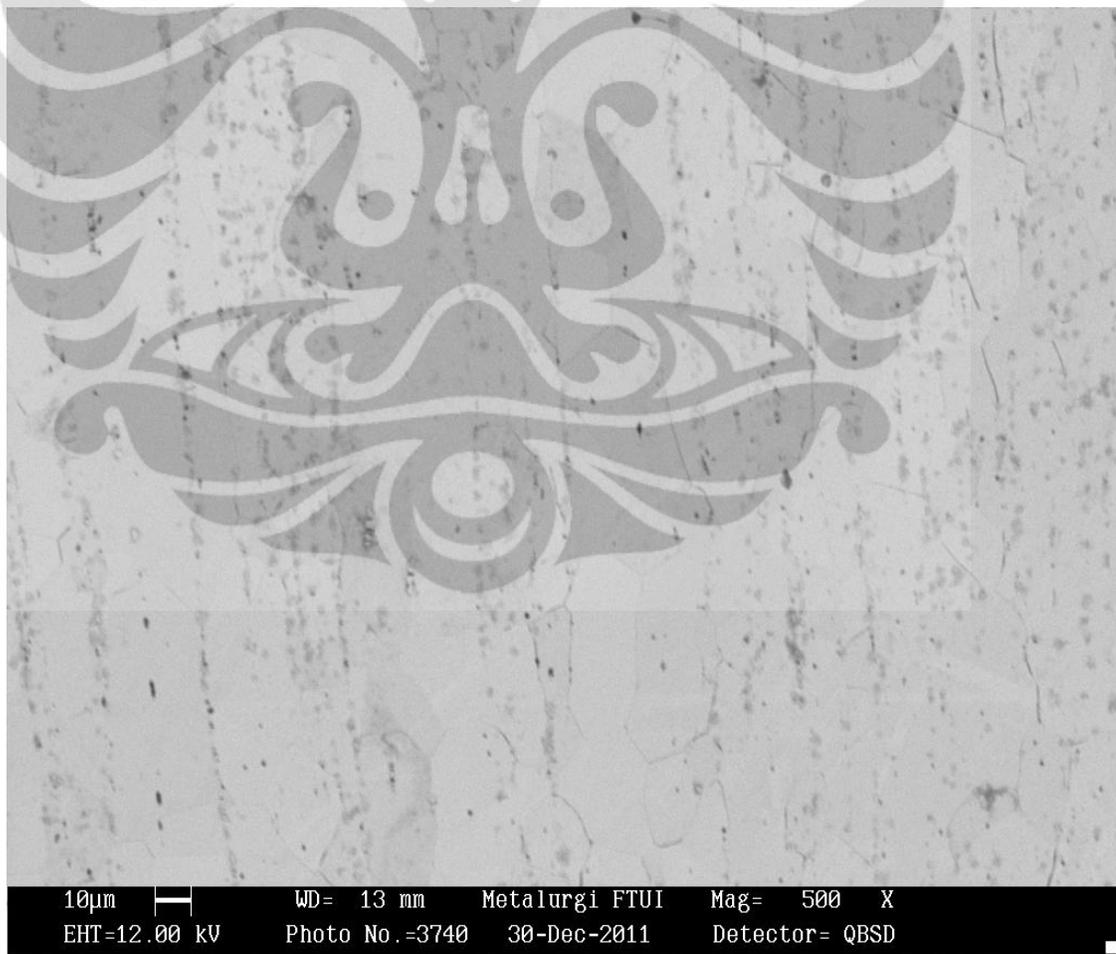
Fasa	Jejak 1	Jejak 2	Jejak 3	HVN Rata-rata
"Putih"	237.6	248.3	264.2	250.03
"Hitam"	288.8	298.7	270.3	285.93

Dari pengujian dengan alat uji *microvickers*, diketahui bahwa kekerasan kedua fasa tersebut berbeda sekitar 30 HVN. Ini mengindikasikan bahwa ada sesuatu yang berbeda pada kedua fasa tersebut. Hasil dari pengujian kekerasan ini tidak dapat

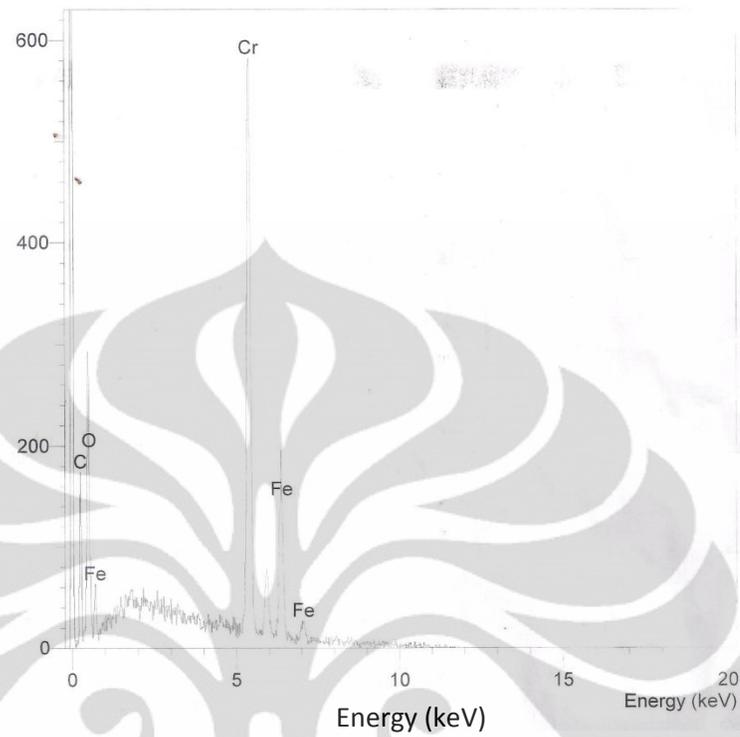
memutuskan jenis fasanya. Untuk itu diperlukan data pendukung lainnya seperti data SEM, EDS dan XRD.

#### 4.6 Hasil Pengamatan SEM QBSD

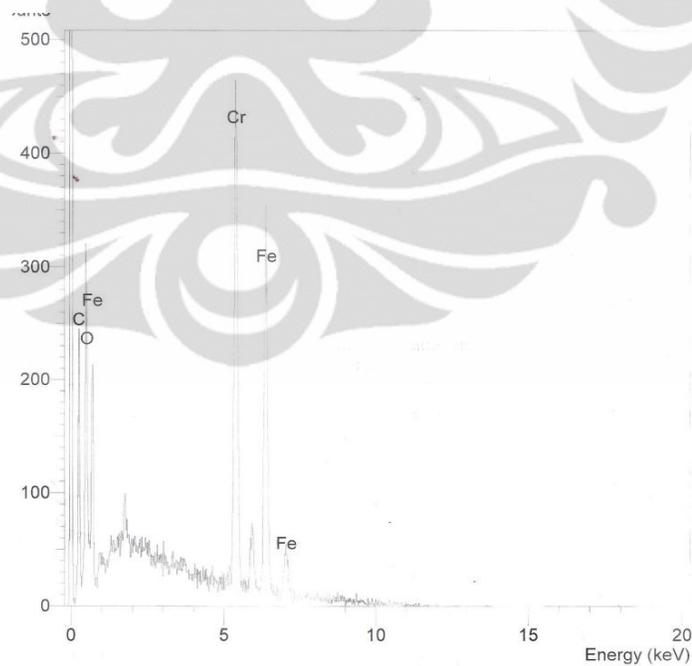
Pengamatan SEM QBSD (*Quantum Back Scattered Detector*) hanya dilakukan pada benda uji O dan benda uji X yang mewakili benda uji hasil canai hangat. Karena pada foto miko benda uji X, Y, dan Z terlihat adanya 2 warna yang berbeda yaitu 'putih' dan 'hitam'. Fasa yang berwarna 'hitam' diindikasikan adalah karbida karena material *Stainless Steel* sangat rentan terjadi sensitasi saat diekspos pada suhu tinggi. Kemudian pada benda uji O, tampak adanya lubang hitam/pori pada batas butir maupun di dalam butir.



**Gambar 4.9** Hasil Foto SEM QBSD Benda Uji *Original*



**Grafik 4.3** Hasil Pengujian EDS Benda Uji *Original*



**Grafik 4.4** Hasil Pengujian EDS pada Batas Butir Benda Uji X (50%)

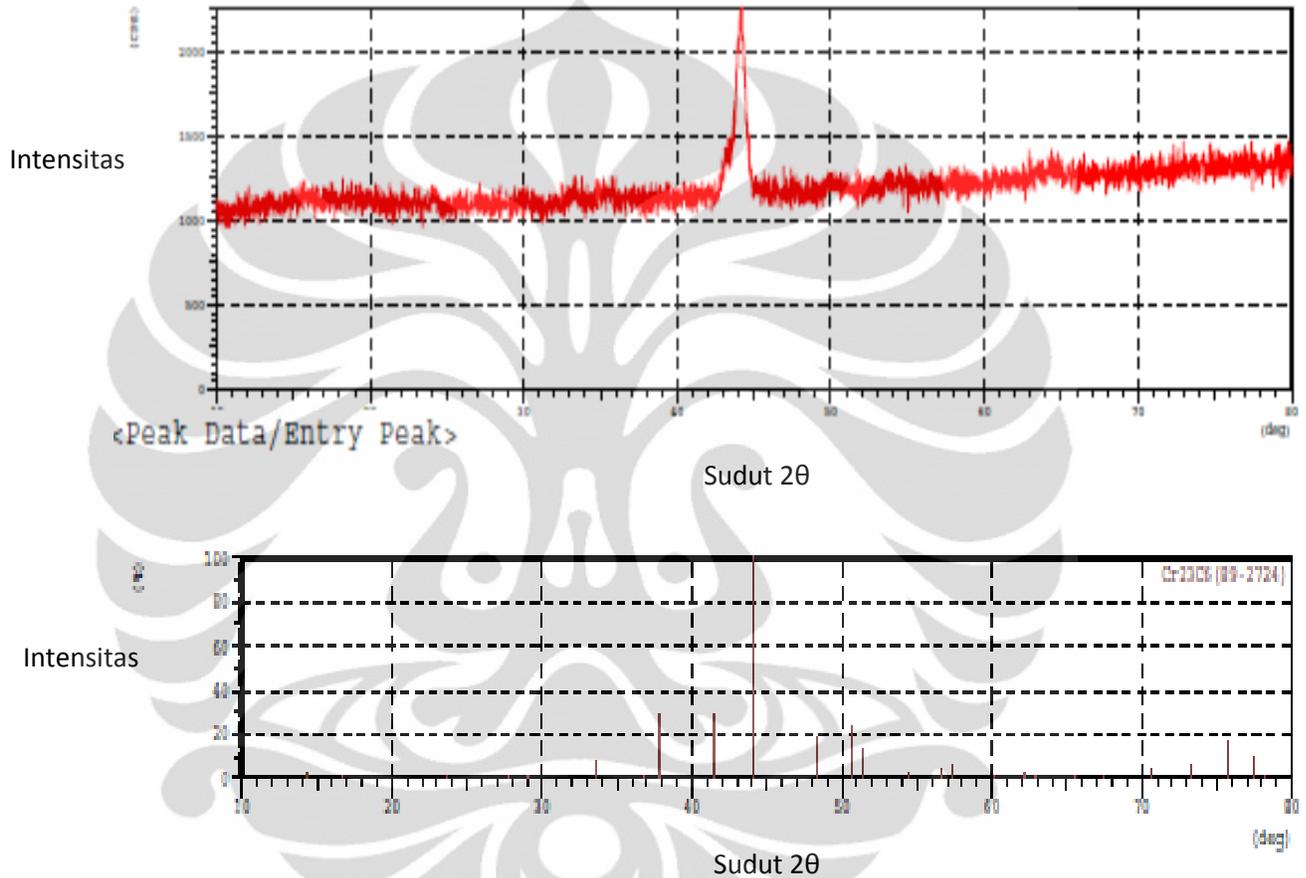
Dari hasil pengamatan SEM QBSD dan EDS, titik-titik hitam pada sampel Original bukanlah karbida. Komposisi titik hitam itu sama dengan komposisi butir dimana kandungan utama Fe, C, dan Cr nya berimbang. Endapan karbida pada sampel *original* (O) memang ada namun tidak diketahui pasti berapa banyak % karbida pada benda uji O tersebut. Hal ini dapat dilihat pada Grafik 4.3 hasil EDS pada sampel Original, dimana *peak* C dan Cr lebih tinggi daripada *peak* Fe. Berarti terdapat kandungan  $Cr_xC_y$  pada sampel original. SEM maupun EDS tidak dapat menganalisa secara kuantitatif % unsur karbida yang ada pada benda uji O. Adanya karbida pada benda uji dapat menurunkan ketahanan terhadap korosi<sup>[2]</sup>. Sehingga dengan menurunnya ketahanan terhadap korosi maka nilai *corrosion rate*-nya (mpy) akan semakin besar.

Sementara hasil EDS pada fasa ‘hitam’ dan ‘putih’ benda uji X memperlihatkan bahwa komposisinya sama dengan benda uji O yang sama-sama mengandung C, Cr, dan Fe. Sehingga dapat dikatakan bahwa fasa ‘hitam’ maupun fasa ‘putih’ itu merupakan fasa yang sama, yaitu ferit. Pengujian EDS pada benda uji X juga dilakukan pada batas butir ‘fasa hitam’, diketahui bahwa terdapat perbedaan kandungan unsur C dan Cr (dapat dilihat pada Grafik 4.5), sama seperti benda uji O, *peak* C dan Cr juga tinggi. Dicurigai bahwa adanya karbida yang terbentuk pada batas butir ‘fasa hitam’. Kekerasan masing-masing fasa tersebut setelah diuji juga berbeda. Berarti ada sesuatu pada ‘fasa hitam’ yang menyebabkan kekerasannya meningkat. Untuk memastikan ada atau tidaknya karbida pada benda uji X, diperlukan pengujian XRD, Dimana pengujian ini dapat mengidentifikasi senyawa karbida yang ada pada benda uji. Hasil dari pengujian XRD pada benda uji X dapat dilihat pada Sub-bab 4.7 dibawah ini.

#### **4.7 Hasil Pengujian X-Rays Diffractometer**

Pengujian XRD ini dilakukan pada benda uji X, yang mewakili benda uji hasil canai hangat. Hasil dari pengujian ini menghasilkan suatu grafik Intersitas vs Sudut  $2\theta$ . Dimana sudut  $2\theta$  ini merupakan penggambaran dari unsur atau senyawa yang

terdapat pada benda uji. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



**Grafik 4.5** Hasil Pengujian XRD Benda Uji X (atas) dan *Peak* Standar ICDD Senyawa  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (bawah)

Dari *peak* hasil pengujian benda uji X terlihat bahwa *peak* pada sudut ( $2\theta$ ) yaitu  $23.5^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $41.5^\circ$ ,  $44^\circ$ ,  $48^\circ$ ,  $50.5^\circ$ ,  $51.5^\circ$ ,  $76^\circ$  dan  $77.5^\circ$  cocok dengan *peak*  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  yang ada pada standar ICDD (*International Center Diffraction Data*). Jadi jelas bahwa terdapat kromium karbida pada batas butir fasa tersebut. Sehingga dapat dijelaskan bahwa, pada warna hitam yang ada fasa tersebut terjadi karena korosi intergranular. Dimana pada daerah dekat batas butir fasa tersebut kekurangan atom Cr (*Chrome Depleted Zone*) akibat migrasinya atom Cr ke batas butir sehingga

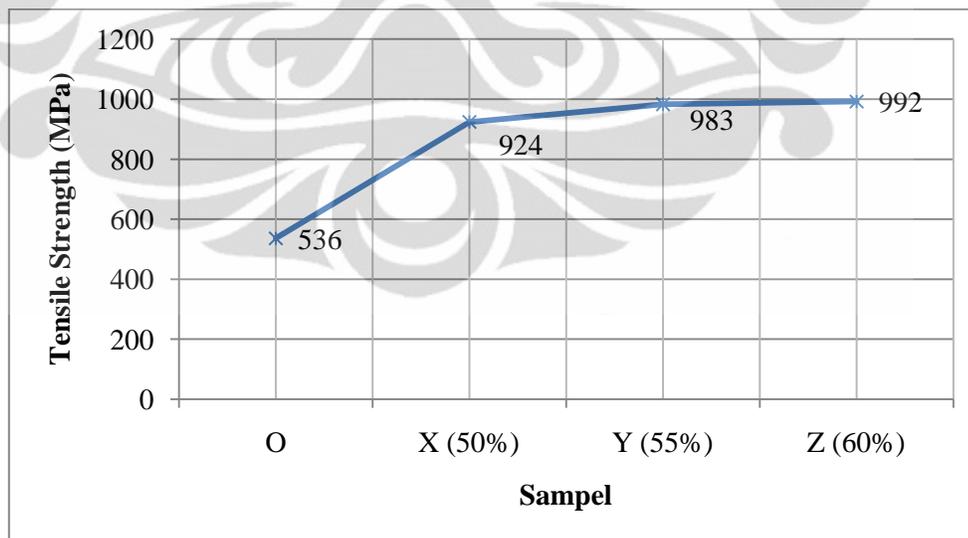
ketahanan terhadap korosi butir berkurang dan membuat fasa tersebut semakin mudah terserang korosi ketika diekspos dengan zat etsa Kalling #1 ataupun larutan *immersed* 6%  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Adanya karbida pada fasa “hitam” tersebut membuat kekerasannya menjadi lebih tinggi daripada fasa “putih” (lihat Tabel 4.4).

#### 4.8 Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Kekuatan

Kekerasan dan kekuatan sebanding dan dapat dinyatakan dengan suatu persamaan. Hubungan antara kekuatan dan kekerasan dapat dilihat pada persamaan 2.3, hasil konversi nilai kekerasan ke kekuatan dapat dilihat pada Tabel 4.5 dibawah ini.

Tabel 4.5 Konversi Nilai Kekerasan ke Kekuatan<sup>[33]</sup>

Sampel	Kekerasan (Hv 5kgf)	Tensile Strength (MPa)
O	167	536
X (50%)	288	924
Y (55%)	306	983
Z (60%)	309	992



Grafik 4.6 Perbandingan Nilai Kekuatan Tiap Benda Uji

Dari pembahasan mengenai nilai kekerasan, telah diketahui bahwa kenaikan sifat mekanis ini disebabkan karena pengaruh dari ukuran butir yang dihasilkan dari

proses canai hangat. Semakin besar deformasi yang diberikan pada canai hangat maka ukuran butir akan semakin kecil karena terjadi rekristalisasi dinamis pada benda uji. Dengan berkurangnya ukuran butir, maka kekuatan dan kekerasan dari material akan semakin meningkat.

#### 4.9 Hasil Uji Celup dan Kehilangan Berat

Pengujian *immersion* dilakukan sesuai dengan ASTM G 48. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan putar *magnetic bar*-nya skala 5 untuk semua benda uji O, X, Y, dan Z. masing-masing benda uji dipreparasi terlebih dahulu. Semua sampel berukuran 2 x 2 cm, lalu diampas dengan #240 dan #800 sehingga oksida pada permukaan sampel dapat dihilangkan. Benda uji sebelumnya ditimbang terlebih dahulu dengan timbangan digital yang memiliki ketelitian 4 angka dibelakang koma. Waktu pencelupan adalah 74 jam atau 3 hari berturut-turut. Kemudian setelah itu sampel ditimbang kembali dan dihitung laju korosi sumurannya menurut metode *Weight Loss*.



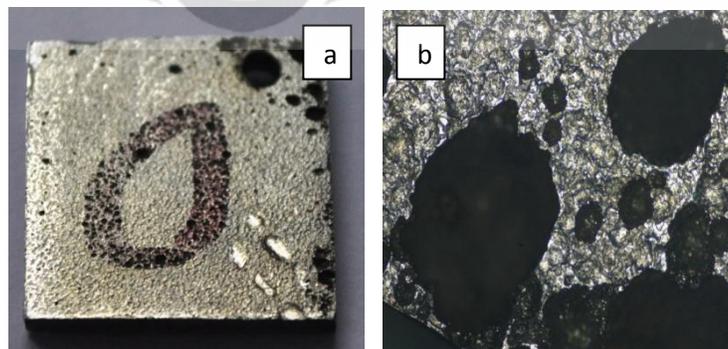
Gambar 4.10 Foto Uji Celup

**Tabel 4.6** Perhitungan Nilai Laju Korosi (mpy) Tiap Sampel

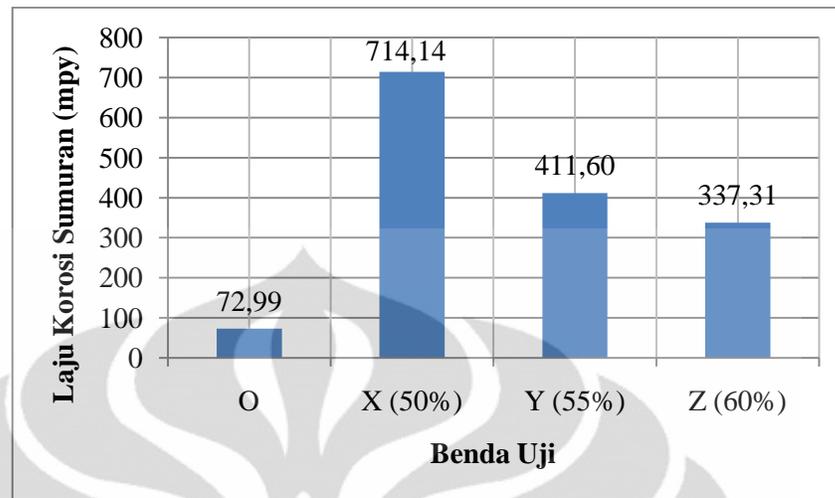
Sampel	Berat Hilang (mg)	Waktu Celup (Jam)	Densitas (gr/cm <sup>3</sup> ) <sup>[34]</sup>	Luas Area (inch <sup>2</sup> )	mpy	Kategori <sup>[14]</sup>
O	128.2734923	74	7.8	1.625952632	72.98674	<b>Poor</b>
X (50%)	1126.392484	74	7.8	1.459212908	714.1444	<b>Unacceptable</b>
Y (55%)	647.2	74	7.8	1.454706429	411.6026	<b>Unacceptable</b>
Z (60%)	519.7	74	7.8	1.425414316	337.3079	<b>Unacceptable</b>

Dari tabel diatas, terlihat bahwa nilai mpy semua benda uji yang mengalami proses canai hangat beberapa kali lipat dari nilai mpy benda uji yang tidak mengalami proses canai hangat. Ketiga benda uji X, Y, dan Z tergolong *Unacceptable*, artinya proses canai hangat yang dilakukan malah membuat laju korosi material tersebut meningkat. Penurunan yang sangat besar ini diakibatkan oleh terbentuknya  $Cr_{23}C_6$  pada batas butir. Terbentuknya  $Cr_{23}C_6$  ini mengakibatkan korosi sumuran lebih mudah terjadi sehingga laju korosi-pun akan semakin tinggi<sup>[21]</sup>.

Pada larutan klorida, khususnya garam asam oksida seperti  $FeCl_3$  dan  $CuCl_2$ , akan menyebabkan korosi sumuran yang parah<sup>[35]</sup>. Feritik seri 400 sangat rentan terhadap *chloride pitting*<sup>[35]</sup>. Lubang (*pit*) akibat korosi sumuran dapat dilihat pada Gambar 4.10 dibawah ini. Pada gambar itu terlihat jelas bahwa korosi sumuran terjadi pada benda uji O maupun benda uji lain memang tergolong parah. Hal ini diakibatkan oleh serangan-serangan ion-ion  $Cl^-$  yang ada dilarutan 6%  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ . Ukuran lubang yang dihasilkan tergolong besar karena dapat terlihat tanpa menggunakan bantuan mikroskop.



**Gambar 4.11** Foto Benda Uji *Original* yang Mengalami *Pitting* (a) dan (b) Lubang (*pit*) Perbesaran 50x.



**Grafik 4.7** Laju Korosi Sumuran Benda Uji O terhadap Benda Uji Hasil Canai Hangat (X, Y, Z) 650°C

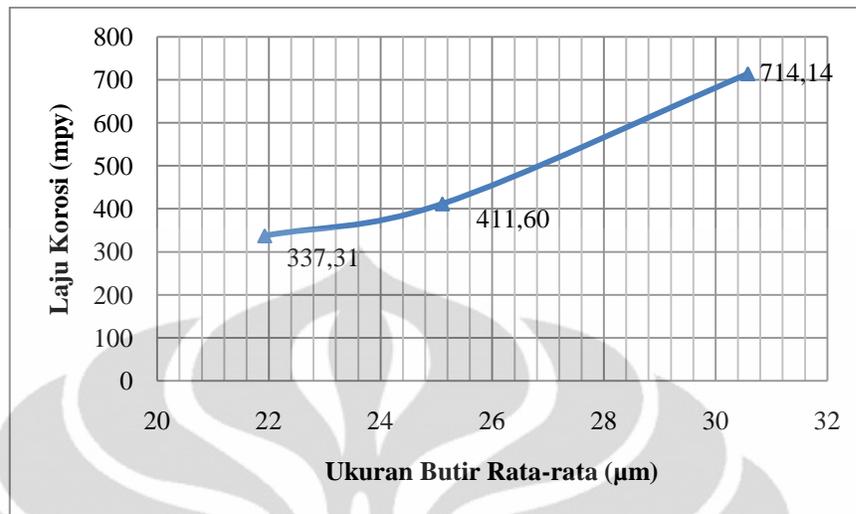
Namun, dari tabel dan grafik diatas, dapat diteliti bahwa walaupun canai hangat membuat laju korosi *Stainless Steel* AISI 430 tergolong *Unacceptable*, tetapi dengan mengecilnya ukuran rata-rata butir laju korosi semakin menurun.

#### 4.9.1 Pengaruh Ukuran Butir terhadap Laju Korosi

Setelah didapat pengurangan berat benda uji, dengan menggunakan metode *Weight Loss* didapat nilai mpy dari masing-masing benda uji. Setelah dibandingkan ternyata nilai mpy dari benda uji yang mengalami proses canai hangat (X, Y, Z) sangat tinggi bila dibandingkan dengan nilai mpy dari benda uji yang tidak diberi perlakuan.

**Tabel 4.7** Ukuran Butir Tiap Benda Uji dan Nilai Laju Korosi

Sampel	Ukuran Butir	mpy
O	35.4	72.98
X	30.576	714.14
Y	25.10568	411.60
Z	21.924	337.30

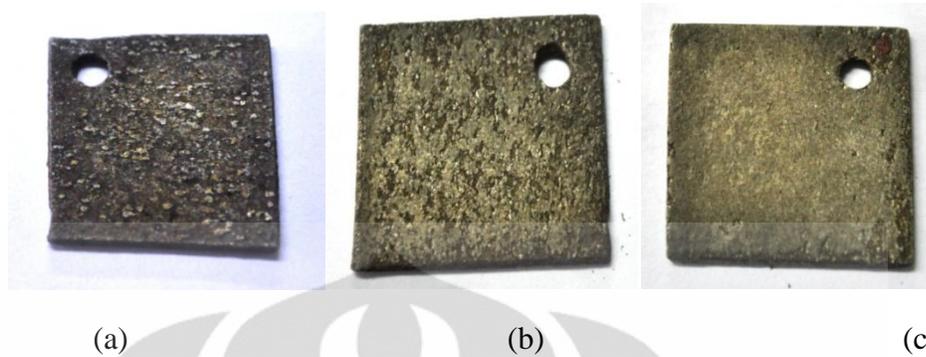


**Grafik 4.8** Ukuran Butir Benda Uji Hasil Canai Hangat terhadap Laju Korosi



**Gambar 4.12** Benda Uji Sebelum Dilakukan *Immersed Test*

Permukaan benda hasil canai hangat yang telah dicelup selama 74 jam pada larutan 6%  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  tampak berubah akibat adanya korosi sumuran yang terjadi. Perubahan yang sangat drastis ini selain diakibatkan oleh kuatnya serangan  $\text{Cl}^-$  terhadap benda uji, adanya karbida dan *Chrome Depleted Zone* (CDZ) mengakibatkan laju korosi pada benda uji semakin tinggi. Pada bagian samping benda uji terlihat jelas banyaknya lubang-lubang pitting berukuran kecil (Gambar 4.13).

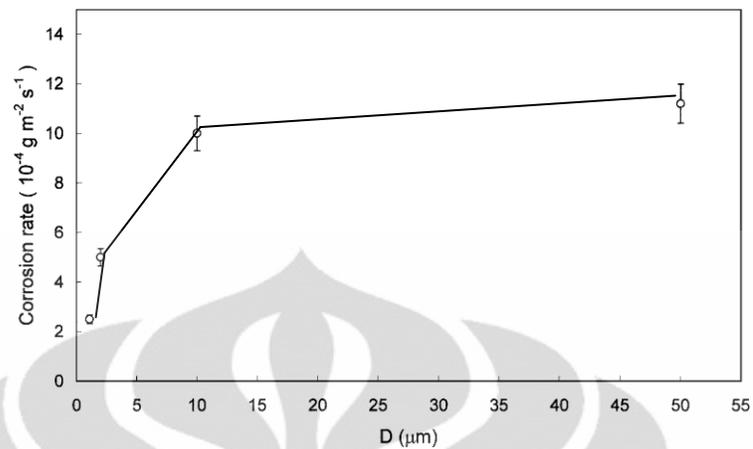


**Gambar 4.13** Permukaan Benda Uji (a) X, (b) Y, dan (c) Z Hasil *Immersion Solution* pada Larutan 6 %  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .



**Gambar 4.13** Tampak Samping Lubang *Pitting* Sampel Z (60% Deformasi), Perbesaran 50x.

Benda uji X yang mengalami deformasi canai hangat 50%, laju korosi sumurannya paling tinggi yaitu 714.14 mpy. Benda uji Y yang diberikan deformasi 55% pada canai hangat mempunyai nilai laju korosi sumuran sebesar 411,60 mpy. Benda uji Z yang terdeformasi 60%, mempunyai nilai laju korosi sumuran yang paling kecil diantara benda uji hasil canai hangat yaitu 337.3 mpy. Terdapat literatur yang mengatakan bahwa semakin kecil ukuran butir maka laju korosi sumurannya semakin kecil. Artinya pengecilan butir akan membuat ketahanan material terhadap korosi sumuran semakin tinggi.



**Grafik 4.7** Grafik Literatur Diameter Rata-rata Butir terhadap *Corrosion Rate* pada Larutan 10%  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [36]

#### 4.9.2 Evaluasi Korosi Sumuran

**Tabel 4.8** Diameter Lubang Sumuran pada Benda Uji O

diameter (μm)		
260	350	270
200	90	190
120	90	100
200	120	100
390	200	550
60	750	200
90	290	250
200	150	150
220	200	150
220	120	230
90	260	200
150	600	220
250	350	220
90	290	150
Rata-rata	215.27	
luas (mm <sup>2</sup> )	0.36	

Dari grafik perhitungan diameter rata-rata lubang sumuran benda uji O, seperti tampak pada Tabel 4.8 diatas, diameter terbesar lubang sumuran adalah 750

$\mu\text{m}$ , sedangkan diameter terkecil lubang sumuran yang terjadi adalah  $60 \mu\text{m}$ . Benda uji O mempunyai luas rata-rata lubang sumuran sebesar  $0,36 \text{ mm}^2$ . berarti termasuk kategori B-1. Sedangkan untuk densitas lubang sumurannya, benda uji O mendekati A-2 dengan densitas rata-rata  $1 \times 10^4 / \text{m}^2$ . Sementara benda uji hasil canai hangat mempunyai densitas rata-rata lubang sumuran A-5, karena hampir semua permukaan terkikis oleh serangan ion Cl.



## BAB V

### KESIMPULAN

Dari penelitian tentang pengaruh variasi deformasi canai hangat terhadap ketahanan korosi sumuran material Stainless Steel AISI 430 didapat kesimpulan bahwa :

1. Proses canai hangat mampu meningkatkan kekerasan dan kekuatan dari Stainless Steel AISI 430 dengan mekanisme pengecilan butir. Semakin besar deformasi yang diberikan maka ukuran butir akan semakin kecil. Benda uji Z yang mengalami deformasi aktual 50,28 % terbukti mempunyai diameter rata-rata butir yang paling kecil yaitu 21.924  $\mu\text{m}$ , kemudian benda uji Y (deformasi 42.93%) dan benda uji X (deformasi 41.8%) mempunyai diameter rata-rata butir 25.11  $\mu\text{m}$  dan 30.57  $\mu\text{m}$ .
2. Proses canai hangat juga dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan. Peningkatan ini didapat dengan mekanisme pengecilan butir. Semakin kecil butir, maka baik kekerasan maupun kekuatan akan meningkat. Benda uji Z mempunyai kekuatan dan kekerasan yang paling besar yaitu 309 HVN dan 992 MPa. Sedangkan benda Y yang butirnya lebih kecil mempunyai kekerasan dan kekuatan sebesar 306 HVN dan 983 MPa. Benda uji X yang memiliki ukuran butir paling kecil mempunyai kekerasan dan kekuatan paling kecil yaitu 288 HVN dan 924 MPa.
3. Proses canai hangat pada material *Stainless Steel* AISI 430 meningkatkan laju korosi sumuran secara signifikan. Secara umum, tingkat laju korosi benda uji hasil canai hangat tersebut tergolong “*Unacceptable*” atau lebih dari 200 mpy. Hal ini dikarenakan terbentuknya karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  pada batas butir sehingga menurunkan ketahanan korosi material.
4. Pada benda uji hasil canai hangat, semakin kecil diameter rata-rata butir, maka nilai laju korosi sumurannya juga semakin mengecil. Benda uji Z mempunyai

nilai 337.3 mpy, benda uji Y mempunyai nilai 411.6 mpy sedangkan benda uji X mempunyai laju korosi tertinggi yaitu 714 mpy.

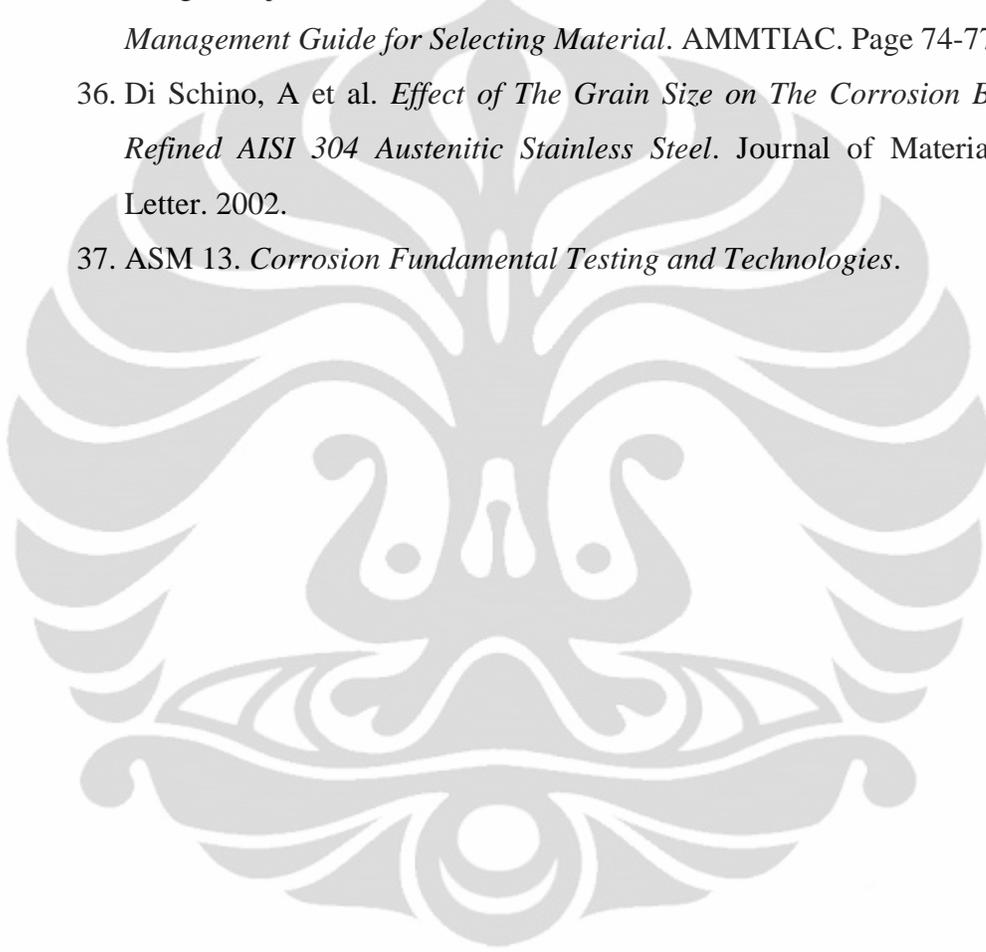


## DAFTAR PUSTAKA

1. Slide kuliah Proses Pembentukan Besi dan Baja (PPBB)
2. Slide kuliah Baja Paduan dan Paduan Super
3. Yoshitaka Adachi , Masayuki Wakita , Hossein Beladi , Peter Damian Hodgson “*The formation of ultrafine ferrite through static transformation in low carbon steels*”, *acta materialia elsevier* 55 (2007) 4925-4934
4. *ASM Specialty Handbook (Stainless Steel)*
5. <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=121>
6. Kalpakjian, Serope dan S. R. Schmid. *Manufacturing Processes for Engineering Materials* 5th ed. Pearson Education : UK. 2008
7. buku alloy
8. Harris, John Noel. *Mechanical Working of Metal : Theory and Practice*. Pergamon Press : UK. 1983.
9. William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 6th ed., John Wiley & Son, Inc., 2003.
10. Shey, John A, *Introduction to Manufacturing Process, 2<sup>nd</sup> Edition*, McGraw-Hill Book Company, New York. 1987.
11. Laporan Praktikum Teknik Pengubahan Bentuk.
12. Yang, Zhongmin and Ruizhen WANG. *Formation of Ultrafine Grain Structure of Plain Low Carbon Steel through Deformation Induced Ferrite Transformation ISIJ Internasional*. Vol. 43. 2003. 761-766.
13. Modul Praktikum Karakterisasi Material 2
14. S. Dobotkin, J. Zrnik, I. Mamuzic, *Ultrafine-Grained Low Carbon Steels By Severe Plastic Deformation*, *METALURGIJA* 47. 2008. 181-186
15. Beladi, Hossein et al. *The Effect of Multiple Deformation on the Formation of Ultrafine Grained Steel*. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*. VOLUME 38A. MARCH 2007.

16. Ginzburg, Vladimir G. *Flat-Rolled Steel Processes : Advanced Technology*. CRC Press : New York. 2009
17. A. Najafi. *Effect of Delay Time on Microstructural Evolution during Warm Rolling of Ti-Nb-IF Steel*. J.Mater.Sci. Technol., Vol. 20 No. 1., 2004.
18. Fontana Mars G, *Corrosion Engineering*, Mc Graw Hill Book Company, Singapore, 1986
19. Humphreys, F.J. and M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Pergamon Press. 2004.
20. Thelning, Karl-Erick.1984. *Steel and Its Heat Treatment second edition*. Butterworths.
21. ASM Metal Handbook Vol 11.
22. Denny A Jones, *Principle and Prevention of Corrosion*, McMillan Publishing Company, New York, 1992.
23. Sung-il Kim et al, *Continous Dynamic Recrystallization of AISI 430 Ferritic Stainless Steel*. Metals and Material Internationa, Vol. 8 No 1 (2002), pp. 7~13.
24. ASTM E112 “*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*”
25. Slide Kuliah Karakterisasi Material 1
26. ASTM E112 “*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*”
27. Diktat Praktikum Metalurgi Fisik
28. ASTM E 92-82 ; *Vickers Hardness Test*
29. ASTM G48-03 – *Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion resistance of Stainless Steel and Related Alloys by Use Ferric Chloride Solution*
30. NACE international, *An Introduction of Corrosion Basic*, NACE Publishing, 1994.
31. [http://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive X-ray spectroscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive_X-ray_spectroscopy), diunduh tanggal 26 Desember jam 10.13
32. Slide kuliah Teknologi Nano

33. Laboratorium Analisa Kerusakan dan Umur Sisa B2TKS, BPPT. “Komparasi Antara Kekuatan Tarik, Diameter Jejak Bola Brinell, Nilai Kekerasan Brinell, Vickers dan Rockwel”.
34. Leffler, Bela. *Stainless-Stainless Steel and Their Properties*.
35. Craig, Benjamin D. et al. *Corrosion Prevention and Control : A program Management Guide for Selecting Material*. AMMTIAC. Page 74-77.
36. Di Schino, A et al. *Effect of The Grain Size on The Corrosion Behavior of Refined AISI 304 Austenitic Stainless Steel*. Journal of Materials Science Letter. 2002.
37. ASM 13. *Corrosion Fundamental Testing and Technologies*.





## Lampiran 1. Hasil Uji Komposisi



**FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA**  
**LABORATORIUM UJI**  
**DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL**  
 KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA  
 Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 7872350, 78888111  
 E-mail : lum@metal.ui.ac.id



Komite Akreditasi Nasional  
**LABORATORIUM PENGUJI**  
 LP - 520 - IDN

---

**LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA**  
**COMPOSITION TEST REPORT**  
 Page 1 of 1

<b>No Laporan</b> <i>Report Nr</i>	623	<b>Bahan</b> <i>Material</i>	Stainless Steel
<b>Pemakai Jasa</b> <i>Customer</i>	Terry Atmajaya	<b>Identitas Bahan</b> <i>Material Identity</i>	Code : 1
<b>Alamat</b> <i>Address</i>	DTMM	<b>Tanggal Terima</b> <i>Receiving Date</i>	30 November 2011
<b>No Kontrak</b> <i>Contract Nr.</i>	1278/PT.02/FT04/P/2011	<b>Standar</b> <i>Standard</i>	ASTM A751 ASTM E415
<b>Tanggal Uji</b> <i>Date of Test</i>	1 Desember 2011	<b>Mesin Uji</b> <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer*

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
I	0.084	0.542	0.036	<0.003**	0.153	0.096	18.7
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	0.031	0.006	0.037	<0.002**	0.023	0.074	Bal.

cattatan :  
 \* ketidakpastian bentangan dengan tingkat kepercayaan 95% dengan factor cakupan K=2  
 \*\* (<) menunjukkan nilai berada di bawah *quantification limit* dari alat uji

Depok, 1 Desember 2011  
 Manajer Teknis  
 Laboratorium Uji  
 Departemen Teknik Metalurgi Dan Material




(Ahmad Ivan Karayan, ST.,M.Eng)

FF-25/ LU-DTMM Rev 2

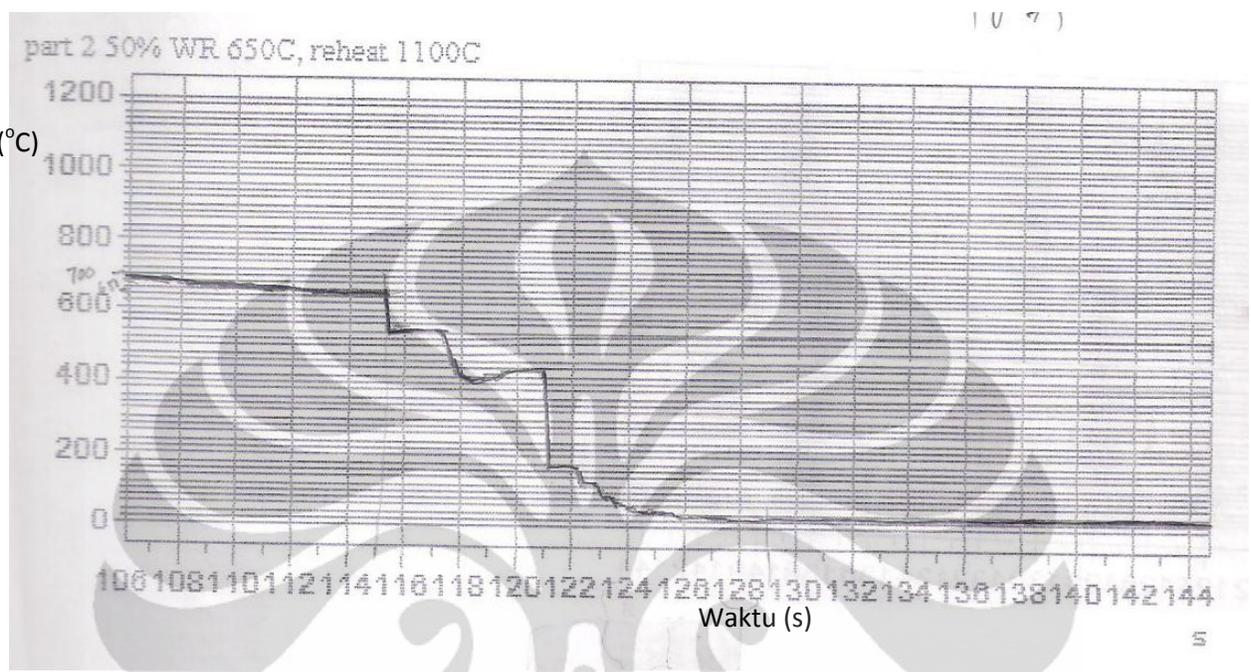
---

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sample yang diuji di Laboratorium Uji-DTMM; publikasi serta penggunaan dokumen ini atau sebagian dari padanya harus dengan izin dari Laboratorium Uji-DTMM

### Lampiran 2. Grafik Rekaman Temperatur dan Waktu Proses Canai Hangat

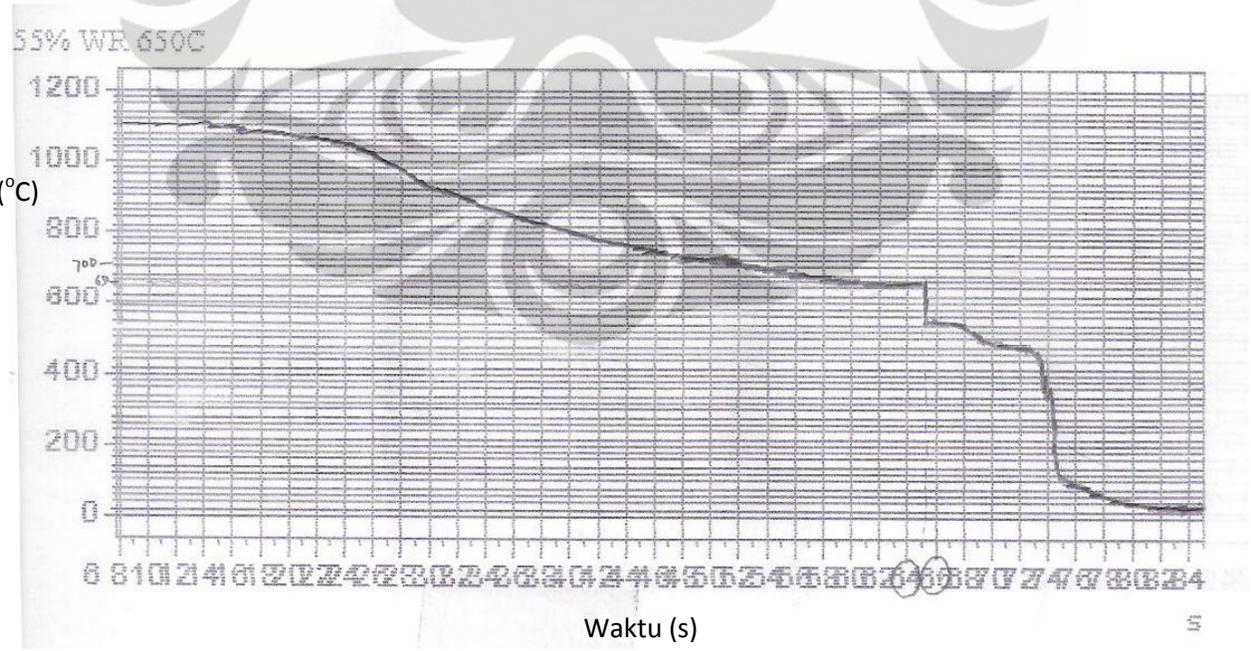
#### Benda Uji X (50%)

Temperatur (°C)

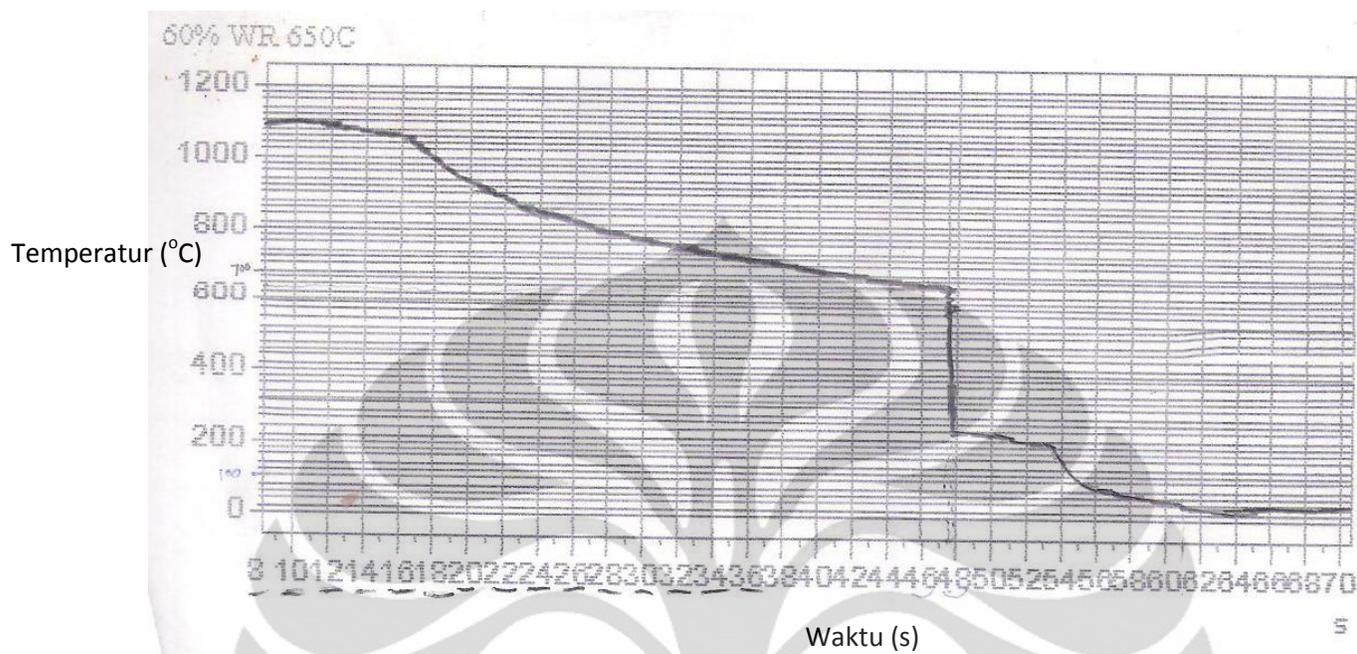


#### Benda Uji Y (55%)

Temperatur (°C)



## Benda Uji Z (60%)



Lampiran 3. Tabel Konversi Kekerasan<sup>[33]</sup>

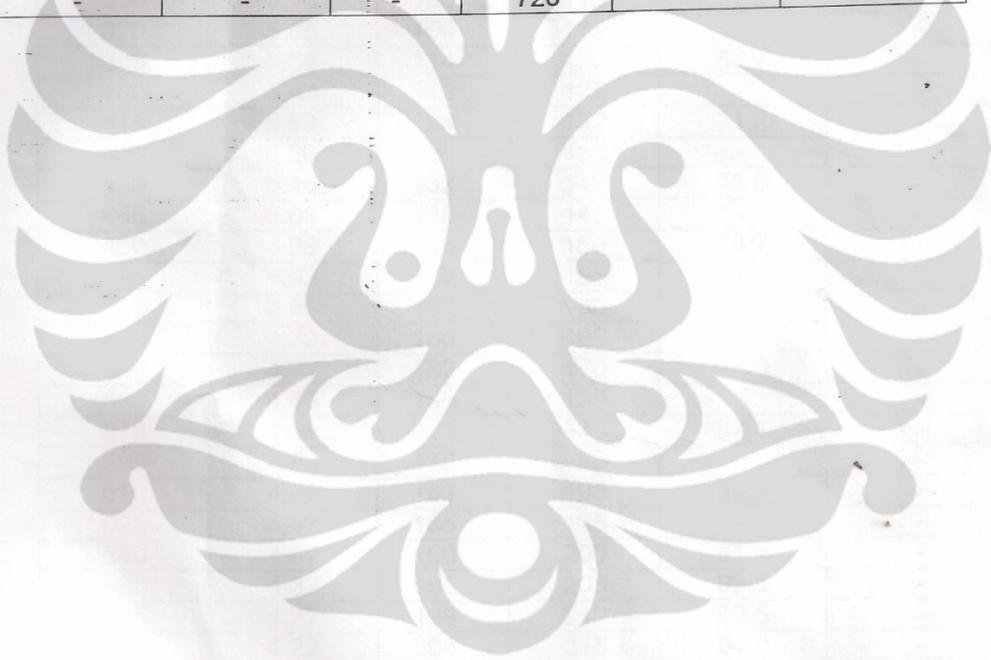
 B2TKS-BPPT Lab. Analisa Kerusakan dan Umur Sisa B2TKS		Komparasi antara Kekuatan Tarik, Diameter jejak bola untuk Brinell, nilai kekerasan Brinell, Vickers & Rockwell			
Kuat Tarik Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Ø Jejak Bola Ball Impression Brinell (mm)	Nilai Kekerasan/ Hardness Value			
		Brinell (HB)	Vickers (HV)	Rockwell B(HRB)	Rockwell C(HRC)
265	6.63	76.0	80	-	-
270	6.45	80.7	85	41.0	-
285	6.30	85.5	90	48.0	-
305	6.16	90.2	95	52.0	-
320	6.01	95.0	100	56.2	-
335	5.90	98.8	105	-	-
350	5.75	105	110	62.3	-
370	5.65	109	115	-	-
385	5.54	114	120	66.7	-
400	5.43	119	125	-	-
415	5.33	124	130	71.2	-
430	5.26	128	135	-	-
450	5.16	133	140	75.0	-
465	5.08	138	145	-	-
480	4.99	143	150	78.7	-
495	4.93	147	155	-	-
510	4.85	152	160	81.7	-
530	4.79	156	165	-	-
545	4.71	162	170	85.0	-
560	4.66	166	175	-	-
575	4.59	171	180	87.1	-
595	4.53	176	185	-	-
610	4.47	181	190	89.5	-
625	4.43	185	195	-	-
640	4.37	190	200	91.5	-
660	4.32	195	205	92.5	-
675	4.27	199	210	93.5	-
690	4.22	204	215	94.9	-
705	4.18	209	220	95.0	-
720	4.13	214	225	96.0	-
740	4.08	219	230	96.7	-
755	4.05	223	235	-	-
770	4.01	228	240	98.1	20.3
785	3.97	233	245	-	21.3
800	3.92	238	250	99.6	22.2

 B2TKS-BPPT Lab. Analisa Kerusakan dan Umur Sisa B2TKS	Komparasi antara Kekuatan Tarik, Diameter jejak bola untuk Brinell, nilai kekerasan Brinell, Vickers & Rockwell
--	---

Kuat Tarik Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Ø Jejak Bola Ball Impression Brinell (mm)	Nilai Kekerasan / Hardness Value			
		Brinell(HB)	Vickers (HV)	Rockwell B(HRB)	Rockwell C(HRC)
		242	255	-	23.4
835	3.86	247	260	(101)	24.0
850	3.82	252	265	-	24.8
865	3.78	257	270	(102)	25.6
880	3.75	261	275	-	26.4
900	3.72	266	280	(104)	27.1
915	3.69	271	285	-	27.8
930	3.66	276	290	(105)	28.5
950	3.63	280	295	-	29.2
965	3.60	285	300	-	29.8
995	3.54	295	310	-	31.0
1030	3.49	304	320	-	32.2
1060	3.43	314	330	-	33.3
1095	3.39	323	340	-	34.4
1126	3.34	333	350	-	35.5
1155	3.29	342	360	-	36.6
1190	3.25	352	370	-	37.7
1220	3.21	361	380	-	38.8
1255	3.17	371	390	-	39.8
1290	3.13	380	400	-	40.8
1320	3.09	390	410	-	41.8
1350	3.06	399	420	-	42.7
1385	3.02	409	430	-	43.6
1420	2.99	418	440	-	44.5
1455	2.95	428	450	-	45.3
1485	2.92	437	460	-	46.1
1520	2.89	447	470	-	46.9
1555	2.86	(456)	480	-	47.7
1595	2.83	(466)	490	-	48.4
1630	2.81	(475)	500	-	49.1
1665	2.78	(485)	510	-	49.8
1700	2.75	(494)	520	-	50.5
1740	2.73	(504)	530	-	51.1
1775	2.70	(513)	540	-	51.7
1810	2.68	(523)	550	-	52.3

Kuat Tarik Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Ø Jejak Bola Ball Impression Brinell (mm)	Nilai Kekerasan / Hardness Value			
		Brinell(HB)	Vickers (HV)	Rockwell B(HRB)	Rockwell C(HRC)
1845	2.66	(532)	560	-	53.0
1880	2.63	(542)	570	-	53.6

(N/mm <sup>2</sup> )	Brinell (mm)	Brinell (HB)	Vickers (HV)	Rockwell B(HRB)	Rockwell C(HRC)
1845	2.66	(532)	560	-	53.0
1880	2.63	(542)	570	-	53.6
1920	2.60	(551)	580	-	54.1
1955	2.59	(561)	590	-	54.7
1995	2.57	(570)	600	-	55.2
2030	2.54	(580)	610	-	55.7
2070	2.52	(589)	620	-	56.3
2105	2.51	(599)	630	-	56.8
2145	2.49	(608)	640	-	57.3
2180	2.47	(618)	650	-	57.8
-	-	-	660	-	58.3
-	-	-	670	-	58.8
-	-	-	680	-	59.2
-	-	-	690	-	59.7
-	-	-	700	-	60.1
-	-	-	720	-	61.0



Lampiran 4. Tabel Kekerasan Vickers 5 kgf<sup>[33]</sup>

TABEL KEKERASAN VICKERS (HV) dalam kg/mm<sup>2</sup>  
pada beban 5 kg.  
d = diameter jejak dalam  $\mu\text{m}$

d	HV 5	d	HV 5	d	HV 5	d	HV 5	d	HV 5
0.091	1120	0.131	541	0.171	317.0	0.211	208.0	0.251	147.0
0.092	1095	0.132	532	0.172	313.0	0.212	206.0	0.252	146.0
0.093	1072	0.133	523	0.173	309.5	0.213	204.0	0.253	145.0
0.094	1050	0.134	515	0.174	306.0	0.214	202.0	0.254	144.0
0.095	1027	0.135	507	0.175	302.5	0.215	201.5	0.255	143.0
0.096	1005	0.136	500	0.176	299.0	0.216	199.0	0.256	141.8
0.097	985	0.137	492	0.177	296.0	0.217	197.0	0.257	140.6
0.098	965	0.138	485	0.178	293.0	0.218	195.0	0.258	139.4
0.099	946	0.139	478	0.179	289.5	0.219	193.5	0.259	138.2
0.100	928	0.140	472	0.180	286.0	0.220	192.0	0.260	137.0
0.101	910	0.141	466	0.181	283.0	0.221	190.0	0.261	136.0
0.102	892	0.142	460	0.182	280.0	0.222	188.0	0.262	135.0
0.103	873	0.143	454	0.183	277.0	0.223	186.5	0.263	134.0
0.104	855	0.144	447	0.184	274.0	0.224	185.0	0.264	133.0
0.105	840	0.145	441	0.185	271.0	0.225	183.0	0.265	132.0
0.106	825	0.146	435	0.186	268.0	0.226	181.0	0.266	131.0
0.107	810	0.147	429	0.187	265.0	0.227	179.5	0.267	130.0
0.108	795	0.148	423	0.188	262.0	0.228	178.0	0.268	129.0
0.109	781	0.149	418	0.189	259.5	0.229	176.5	0.269	128.0
0.110	767	0.150	412	0.190	257.0	0.230	175.0	0.270	127.0
0.111	753	0.151	407	0.191	254.5	0.231	173.5	0.271	126.2
0.112	739	0.152	401	0.192	252.0	0.232	172.0	0.272	125.4
0.113	725	0.153	396	0.193	249.0	0.233	170.5	0.273	124.6
0.114	712	0.154	391	0.194	246.0	0.234	169.0	0.274	123.8
0.115	699	0.155	386	0.195	243.5	0.235	167.5	0.275	123.0
0.116	687	0.156	381	0.196	241.0	0.236	166.0	0.276	122.0
0.117	676	0.157	376	0.197	238.5	0.237	165.0	0.277	121.0
0.118	665	0.158	371	0.198	236.0	0.238	164.0	0.278	120.0
0.119	653	0.159	367	0.199	234.0	0.239	162.5	0.279	119.0
0.120	642	0.160	362	0.200	232.0	0.240	161.0	0.280	118.0
0.121	632	0.161	358	0.201	229.5	0.241	159.5	0.281	117.2
0.122	622	0.162	353	0.202	227.0	0.242	158.0	0.282	116.4
0.123	612	0.163	349	0.203	225.0	0.243	157.0	0.283	115.6
0.124	602	0.164	345	0.204	223.0	0.244	156.0	0.284	114.8
0.125	593	0.165	341	0.205	220.5	0.245	154.5	0.285	114.0
0.126	585	0.166	336	0.206	218.0	0.246	153.0	0.286	113.2
0.127	576	0.167	332	0.207	216.0	0.247	152.0	0.287	112.4
0.128	567	0.168	328	0.208	214.0	0.248	151.0	0.288	111.6
0.129	558	0.169	325	0.209	212.0	0.249	149.5	0.289	110.8
0.130	550	0.170	321	0.210	210.0	0.250	148.0	0.290	110.0

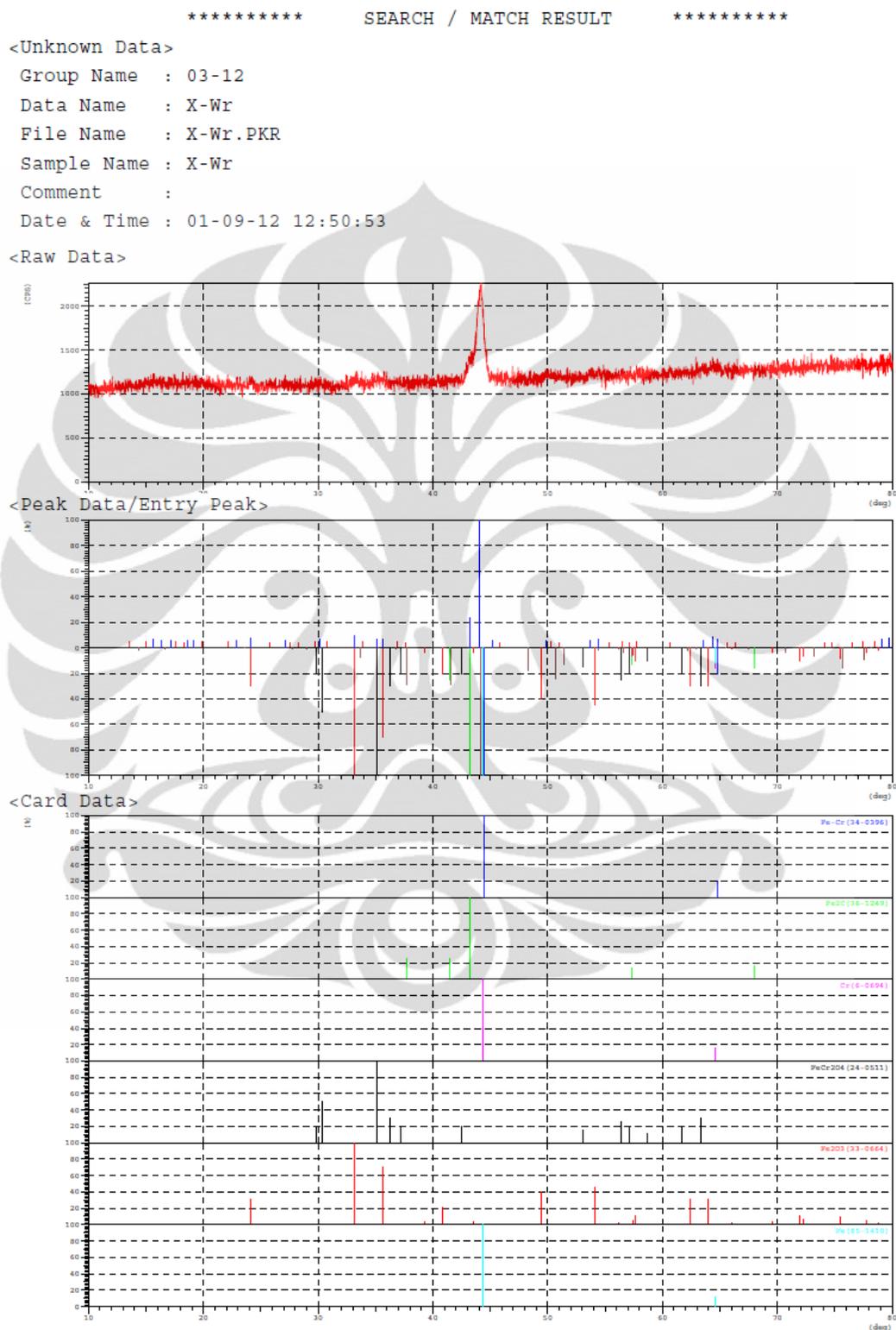
**TABEL KEKERASAN VICKERS (HV) dalam kg/mm<sup>2</sup>**  
 pada beban 5 kg.  
 d = diameter jejak dalam  $\mu\text{m}$

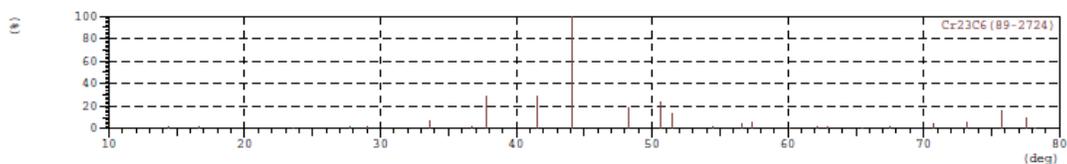
d	HV 5	d	HV 5	d	HV 5	d	HV 5	d	HV 5
0.291	109.4	0.331	84.6	0.371	67.3	0.411	54.9	0.451	45.6
0.292	108.8	0.332	84.1	0.372	67.0	0.412	54.6	0.452	45.4
0.293	108.2	0.333	83.6	0.373	66.6	0.413	54.4	0.453	45.2
0.294	107.6	0.334	83.1	0.374	66.3	0.414	54.1	0.454	45.0
0.295	107.0	0.335	82.6	0.375	65.9	0.415	53.9	0.455	44.8
0.296	106.2	0.336	82.1	0.376	65.6	0.416	53.6	0.456	44.6
0.297	105.4	0.337	81.6	0.377	65.2	0.417	53.4	0.457	44.4
0.298	104.6	0.338	81.2	0.378	64.9	0.418	53.1	0.458	44.2
0.299	103.8	0.339	80.7	0.379	64.5	0.419	52.9	0.459	44.0
0.300	103.0	0.340	80.2	0.380	64.2	0.420	52.6	0.460	43.8
0.301	102.3	0.341	79.7	0.381	63.9	0.421	52.4	0.461	43.6
0.302	101.6	0.342	79.3	0.382	63.6	0.422	52.1	0.462	43.4
0.303	100.9	0.343	78.8	0.383	63.2	0.423	51.9	0.463	43.3
0.304	100.2	0.344	78.4	0.384	62.9	0.424	51.6	0.464	43.1
0.305	99.6	0.345	77.9	0.385	62.6	0.425	51.4	0.465	42.9
0.306	99.0	0.346	77.5	0.386	62.3	0.426	51.1	0.466	42.7
0.307	98.4	0.347	77.0	0.387	61.9	0.427	50.9	0.467	42.5
0.308	97.8	0.348	76.6	0.388	61.6	0.428	50.6	0.468	42.4
0.309	97.2	0.349	76.1	0.389	61.2	0.429	50.4	0.469	42.2
0.310	96.5	0.350	75.7	0.390	60.9	0.430	50.1	0.470	42.0
0.311	95.9	0.351	75.3	0.391	60.6	0.431	49.9	0.471	41.8
0.312	95.3	0.352	74.9	0.392	60.3	0.432	49.7	0.472	41.6
0.313	94.7	0.353	74.4	0.393	60.0	0.433	49.4	0.473	41.4
0.314	94.1	0.354	74.0	0.394	59.7	0.434	49.2	0.474	41.2
0.315	93.5	0.355	73.6	0.395	59.4	0.435	49.0	0.475	41.1
0.316	92.9	0.356	73.2	0.396	59.1	0.436	48.8	0.476	40.9
0.317	92.3	0.357	72.8	0.397	58.8	0.437	48.6	0.477	40.7
0.318	91.7	0.358	72.3	0.398	58.5	0.438	48.3	0.478	40.5
0.319	91.1	0.359	71.9	0.399	58.2	0.439	48.1	0.479	40.3
0.320	90.5	0.360	71.5	0.400	57.9	0.440	47.9	0.480	40.2
0.321	90.0	0.361	71.1	0.401	57.6	0.441	47.7	0.481	40.0
0.322	89.4	0.362	70.7	0.402	57.3	0.442	47.5	0.482	39.9
0.323	88.9	0.363	70.4	0.403	57.1	0.443	47.3	0.483	39.7
0.324	88.3	0.364	70.0	0.404	56.8	0.444	47.1	0.484	39.6
0.325	87.8	0.365	69.6	0.405	56.5	0.445	46.9	0.485	39.4
0.326	87.3	0.366	69.2	0.406	56.2	0.446	46.6	0.486	39.2
0.327	86.7	0.367	68.8	0.407	55.9	0.447	46.4	0.487	39.1
0.328	86.2	0.368	68.5	0.408	55.7	0.448	46.2	0.488	38.9
0.329	85.6	0.369	68.1	0.409	55.4	0.449	46.0	0.489	38.8
0.330	85.1	0.370	67.7	0.410	55.1	0.450	45.8	0.490	38.6

**TABEL KEKERASAN VICKERS (HV) dalam kg/mm<sup>2</sup>**  
pada beban 5 kg.  
d = diameter jejak dalam  $\mu\text{m}$

d	HV 5	d	HV 5	d	HV 5	d	HV 5	d	HV 5
0.491	38.5	0.531	33.15	0.571	28.41	0.611	24.82		
0.492	38.3	0.532	33.00	0.572	28.32	0.612	24.74		
0.493	38.2	0.533	32.85	0.573	28.23	0.613	24.66		
0.494	38.0	0.534	32.70	0.574	28.14	0.614	24.58		
0.495	37.9	0.535	32.55	0.575	28.05	0.615	24.50		
0.496	37.7	0.536	32.40	0.576	27.96	0.616	24.42		
0.497	37.6	0.537	32.25	0.577	27.87	0.617	24.34		
0.498	37.4	0.538	32.10	0.578	27.78	0.618	24.26		
0.499	37.3	0.539	31.95	0.579	27.69	0.619	24.18		
0.500	37.1	0.540	31.80	0.580	27.6	0.620	24.1		
0.501	37.0	0.541	31.68	0.581	27.51	0.621	24.03		
0.502	36.8	0.542	31.56	0.582	27.42	0.622	23.96		
0.503	36.7	0.543	31.44	0.583	27.33	0.623	23.89		
0.504	36.5	0.544	31.32	0.584	27.24	0.624	23.82		
0.505	36.4	0.545	31.20	0.585	27.15	0.625	23.75		
0.506	36.2	0.546	31.08	0.586	27.06	0.626	23.68		
0.507	36.1	0.547	30.96	0.587	26.97	0.627	23.61		
0.508	35.9	0.548	30.84	0.588	26.88	0.628	23.54		
0.509	35.8	0.549	30.72	0.589	26.79	0.629	23.47		
0.510	35.6	0.550	30.60	0.590	26.7	0.630	23.4		
0.511	35.5	0.551	30.50	0.591	26.61	0.631	23.32		
0.512	35.3	0.552	30.40	0.592	26.52	0.632	23.24		
0.513	35.2	0.553	30.30	0.593	26.43	0.633	23.16		
0.514	35.1	0.554	30.20	0.594	26.34	0.634	23.08		
0.515	35.0	0.555	30.10	0.595	26.25	0.635	23.00		
0.516	34.8	0.556	30.00	0.596	26.16	0.636	22.92		
0.517	34.7	0.557	29.9	0.597	26.07	0.637	22.84		
0.518	34.6	0.558	29.8	0.598	25.98	0.638	22.76		
0.519	34.4	0.559	29.7	0.599	25.89	0.639	22.68		
0.520	34.3	0.560	29.6	0.600	25.8	0.640	22.6		
0.521	34.2	0.561	29.49	0.601	25.71	0.641	22.53		
0.522	34.1	0.562	29.38	0.602	25.62	0.642	22.46		
0.523	34.0	0.563	29.27	0.603	25.53	0.643	22.39		
0.524	33.9	0.564	29.16	0.604	25.44	0.644	22.32		
0.525	33.8	0.565	29.05	0.605	25.35	0.645	22.25		
0.526	33.7	0.566	28.94	0.606	25.26	0.646	22.18		
0.527	33.6	0.567	28.83	0.607	25.17	0.647	22.11		
0.528	33.5	0.568	28.72	0.608	25.08	0.648	22.04		
0.529	33.4	0.569	28.61	0.609	24.99	0.649	21.97		
0.530	33.3	0.570	28.5	0.610	24.9	0.650	21.9		

## Lampiran 5. Hasil Uji XRD





\*\*\*\*\* SEARCH / MATCH RESULT \*\*\*\*\*

Group Name : 03-12  
 Data Name : X-Wr  
 File Name : X-Wr.PKR  
 Sample Name : X-Wr  
 Comment :

<Entry Card>

No.	Card	Chemical Formula	S	L	d	I	R
		Chemical Name (Mineral Name)		Dx	WT%	S.G.	
1	34-0396	Fe-Cr Iron Chromium	0.883	1.000 ( 2/ 6)	0.549	0.802	0.881
2	36-1249	Fe <sub>2</sub> C Iron Carbide	0.230	0.200 ( 1/ 5)	0.985	1.000	0.394
3	6-0694	Cr Chromium ( Chromium, syn )	0.914	1.000 ( 2/ 6)	0.445	0.850	0.378
4	24-0511	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Iron Chromium Oxide	0.094	0.250 ( 3/12)	0.733	0.663	0.243
5	33-0664	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Iron Oxide ( Hematite, syn )	0.144	0.400 ( 8/45)	0.580	0.438	0.203
6	85-1410	Fe ( Iron )	0.964	1.000 ( 2/ 3)	0.533	0.936	0.998
7	89-2724	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	1.000	0.154 ( 4/31)	0.550	0.917	0.078

## Lampiran 6: Contoh Perhitungan Besar Butir

### Lampiran 6.1 Contoh Perhitungan Besar Butir *Equiaxed*



lingkaran	Jumlah perpotongan batas butir
1	43
2	23
3	14
TOTAL (P)	80

$$P_L = \frac{P \times M}{L_T} \quad (3.1)$$

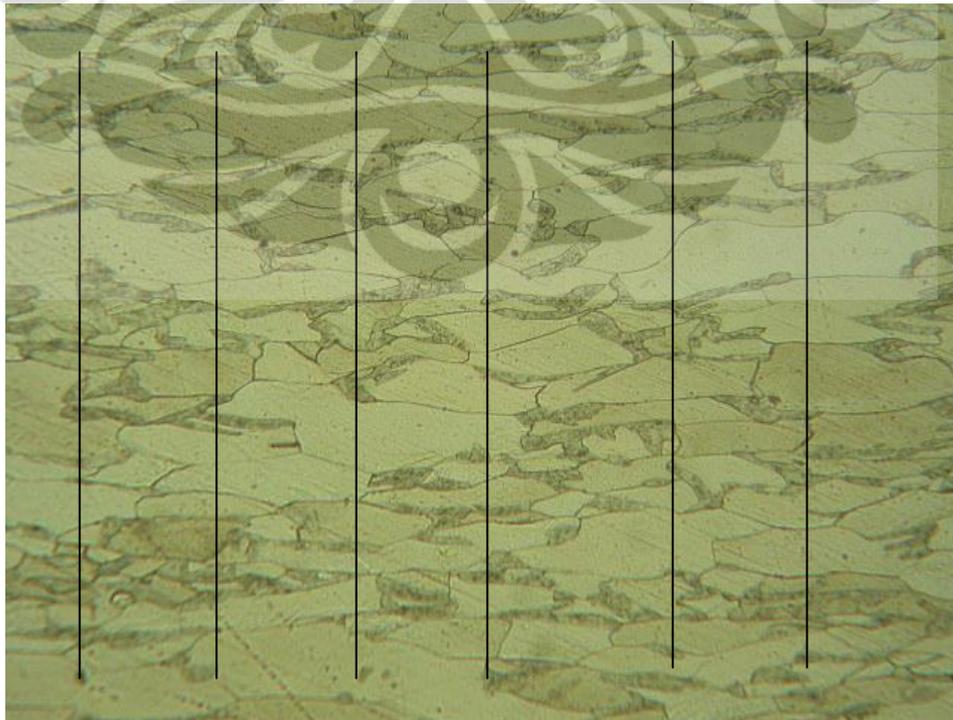
$$L_3 = 1/P_L \quad (3.2)$$

$$G = [-6.643 \log(L_3) - 3.2877] \quad (3.3)$$

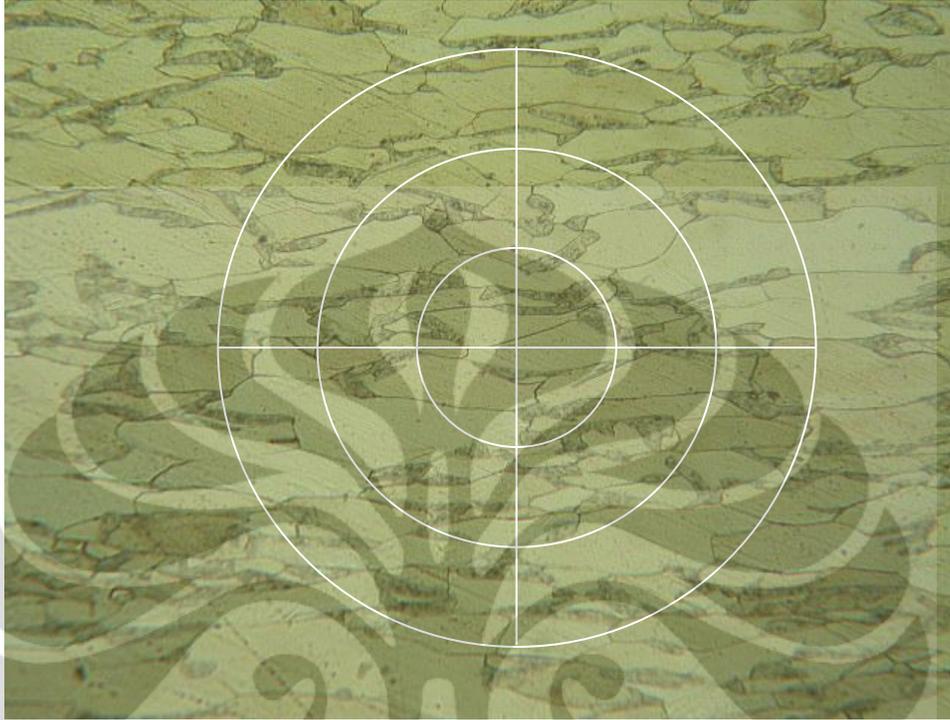
P	LT (mm)	M	PL	L3	G	d average ( $\mu\text{m}$ )
80	500	200	32	0.03125	6.712366	35.4

**Lampiran 6.2.** Contoh Perhitungan Butir *Non-equiaxed*

Longitudinal



## Transversal



## Planar

UKURAN BUTIR X 200x			
jumlah	longitudinal	transversal	planar
	46	179	118

$$P_L = \frac{P \times M}{L_T} \quad (3.1)$$

$$L_3 = 1/P_L \quad (3.2)$$

$$G = [-6.643 \log(L_3) - 3.2877] \quad (3.3)$$

$$G_{\text{Total}} = (G_{\text{Longitudinal}} \times G_{\text{Transversal}} \times G_{\text{Planar}})^{0.33}$$

	Longitudinal	Tranversal	planar
PL	18.4	71.6	47.2
L3	0.054347826	0.01396648	0.021186
G	5.115623134	9.03615663	7.833803
G TOTAL	7.127736739		
d average (μm)	30.576		

