



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGHALUSAN BUTIR *FERRITE* MELALUI *SEVERE PLASTIC DEFORMATION* DAN EVALUASI KETAHANAN KOROSI BAJA KARBON GR X42**

**TESIS**

**PURNAMA RIYANTI**

**0806422984**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
KEKHUSUSAN KOROSI DAN PROTEKSI  
DEPOK  
JULI 2010**

**PERPUSTAKAAN PUSAT  
UNIVERSITAS INDONESIA**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGHALUSAN BUTIR *FERRITE* MELALUI *SEVERE PLASTIC DEFORMATION* DAN EVALUASI KETAHANAN KOROSI BAJA KARBON GR X42**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik**

**PURNAMA RIYANTI**

**0806422984**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
KEKHUSUSAN KOROSI DAN PROTEKSI  
DEPOK  
JULI 2010**



## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Purnama Riyanti**

**NPM : 0806422984**

**Tanda Tangan :** 

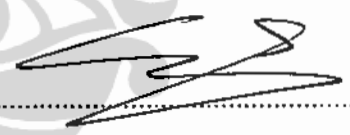
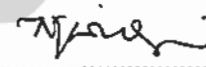
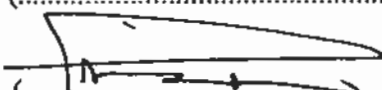

**Tanggal : 23 Juni 2010**

**HALAMAN PENGESAHAN**

Tesis ini diajukan oleh :  
Nama : Purnama Riyanti  
NPM : 0806422984  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Tesis : **Studi Penghalusan Butir Ferrite Melalui Severe Plastic Deformation dan Evaluasi Ketahanan Korosi Baja Karbon GR X42**

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

**DEWAN PENGUJI**

Pembimbing : Prof. Dr.Ir.Eddy S. Siradj, M. Eng (.....)  
Penguji : Ir. Rini Riastuti M.Sc (.....)  
Penguji : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA (.....)  
Penguji : Sari Katili M.Sc (.....)

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 7 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yesus, karena atas kasih karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan Tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Program Studi Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr.Ir.Eddy S. Siradj, M. Eng. dan Ibu Ir. Rini Riastuti M.Sc, sebagai pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
2. Ayahanda Jonar Alam Siahaan dan Ibunda D. Risnawati Aritonang, serta adik-adik yang memberikan dukungan dan mendoakan demi menyelesaikan tesis saya;
3. Seluruh staf pengajar dan karyawan Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang telah ikut serta memberikan masukan dan dukungan; dan
4. Semua pihak yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yesus melimpahkan segala kebaikan kepada semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Depok, 23 Juni 2010

Penulis

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

---

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

Nama : Purnama Riyanti  
NPM : 0806422984  
Program Studi : Korosi dan Proteksi  
Departemen : Metalurgi Dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Tesis

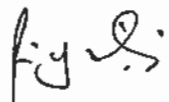
Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Studi Penghalusan Butir *Ferrite* Melalui *Severe Plastic Deformation* dan  
Evaluasi Ketahanan Korosi Baja Karbon GR X42**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 23 Juni 2010  
Yang menyatakan

  
(Purnama Riyanti)

## ABSTRAK

Nama : Purnama Riyanti

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul : Studi Penghalusan Butir *Ferrite* Melalui *Severe Plastic Deformation*  
dan Evaluasi Ketahanan Korosi Baja Karbon GR X42

Pengembangan metoda penguatan sifat mekanik dan ketahanan korosi baja karbon dipelajari untuk memperoleh sifat fisik baja yang lebih superior dengan proses yang tidak terlalu mahal dan hasil pengembangan dapat digunakan dalam beragam aplikasi. Penghalusan ukuran butir melalui kontrol proses termo mekanikal merupakan salah satu metoda yang digunakan untuk peningkatan sifat mekanik baja karbon. Pada penelitian ini Baja Karbon rendah GR X42 dideformasi dengan metoda *severe plastic deformation*, kemudian baja karbon yang telah dideformasi tersebut diuji kekerasan, laju korosi dan ketahanan korosi-nya terhadap pengaruh proses pengetasan hidrogen.

Sejumlah logam dan paduan akan menyerap hidrogen dan pada kondisi-kondisi tertentu dan mengalami difusi hidrogen yang cukup serius yang mengakibatkan perapuhan pada material. Perapuhan akibat hidrogen adalah salah satu bentuk penurunan kualitas logam yang berhubungan dengan *stress corrosion cracking*. Diduga mekanisme difusi hidrogen ke dalam material dapat terjadi melalui beragam cara. Salah satu penguatan material terhadap serangan difusi hidrogen adalah dengan penghalusan struktur mikro butir ferit melalui proses deformasi. Pencapaian struktur butir ferit yang lebih halus pada material baja karbon telah menjadi objek yang cukup menarik karena terbukti secara signifikan meningkatkan kekuatan luluh (*yield strength*) dan pada saat yang sama transisi temperatur *ductile-brittle* yang lebih rendah dapat diprediksi dengan ukuran butir yang sangat halus (*ultra-fine grain*).

Ukuran butir yang diperoleh dalam penelitian ini diukur dengan metoda garis *intercept*. Hasilnya cukup beragam namun umumnya memiliki diameter butir yang lebih kecil dibanding dengan diameter butir baja karbon yang tidak dideformasi, kecuali untuk benda uji yang dideformasi pada 550 dan 600°C setelah sebelumnya dipanaskan hingga 1100°C, memiliki diameter butir yang lebih besar atau sama dengan diameter baja karbon yang tidak dideformasi.

Ukuran butir baja karbon yang dideformasi tidak memberikan hubungan yang berarti terhadap perubahan laju korosi maupun kekerasan. Sementara ketahanan korosi baja karbon terhadap pengaruh proses pemberian hidrogen untuk benda uji yang dideformasi pada suhu 550, 600, dan 650°C cenderung meningkat. Peningkatan kekuatan-nya diamati melalui pengujian tarik setelah sebelumnya diaplikasi ke dalam larutan 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 100 mg/L Thiourea CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> selama 10 menit.

**Kata Kunci:** penghalusan butir, proses termo mekanikal, ukuran butir, ketahanan korosi



## ABSTRACT

Name : Purnama Riyanti

Study Program : Metallurgy & Materials Engineering

Title : Study of Ferrite Grain Refinement of Carbon Steel GR X42 through Severe Plastic Deformation and its Corrosion Resistance Evaluation.

Method development of mechanical properties and corrosion resistance improvement of carbon steel has been learnt to achieve superior physical properties of carbon steel with minimum cost and the result can be applied into many application. Grain refinement through thermomechanical process control is one of many methods used to improve carbon steel mechanical properties. On this paper, low carbon steel GR X42 is deformed with severe plastic deformation method, then the deformed material is applied to hardness test, corrosion rate determination and corrosion resistance test against hydrogen charging.

Many steel and alloy absorb hydrogen and on a specific condition the material is severe from serious hydrogen diffusion which cause embrittlement. Hydrogen embrittlement is a form of deterioration of material quality and has a direct connection with stress corrosion cracking. Hydrogen introduction into material may occur in many ways and one of physical properties material against this introduction is through microstructure refinement of ferrite grain size by deformation process. The achievement of refine ferrite grain size has been a interesting topic since it improve yield strength significantly and at the same time the lower temperature transition of ductile-brittle is predicted with ultra fine grain.

The grain size was measured by intercept line method and the result is vary, but in general they have decreasing trend compare to undeformed carbon steel, except the specimen which deformed on 550 and 600°C has the same or bigger than the original carbon steel.

The deformed carbon steel grain size gives no significant effect on its corrosion rates and microhardness properties. While the increasing of corrosion resistance of deformed carbon steel against hydrogen charging is observed on the specimen which deformed on 550, 600 and 650°C. The deformed specimen toughness observed through the tensile test after introduced to 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 100 mg/L Thiourea CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> solution for 10 minutes.

Keywords: grain refinement, thermomechanical process, grain size, corrosion resistance

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR / UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan	4
1.3. Perumusan Masalah	4
1.4. Pembatasan Masalah	6
<b>BAB 2 LANDASAN TEORI</b>	<b>8</b>
2.1. Baja Karbon	8
2.1.1. Ferite	13
2.1.2. Austenit	14
2.2. Transformasi Austenite Menjadi Ferit	15
2.3. Struktur Mikro Feritik	17
2.3.1. Ferit Poligonal	18
2.3.2. Ferit Widmanstätten	19
2.3.3. Ferit Asikular	20
2.3.4. Ferit Granular	21
2.4. Thermo Mechanical Controlled Process (TMCP)	22
2.5. Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro	25
2.6. Pengertian Umum Korosi Elektrokimia	26
2.6.1. Termodinamika Korosi	27
2.6.2. Kinetika Korosi	28
2.6.3. Polarisasi	30
2.6.4. Passivasi	30
2.6.5. Hubungan Laju Korosi dan Polarisasi	32
2.6.6. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Korosi	34
2.6.7. Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Korosi	35
2.7. Pengaruh Hidrogen Pada Material	37
2.7.1. Cacat Dalam ( <i>Creation of Internal Defect</i> )	38
2.7.2. Penggetasan Hidrogen ( <i>Hydrogen Embrittlement, HE</i> )	40



2.7.3. Fenomena Penggetasan Hidrogen	42
2.7.4. Mekanisme Migrasi Hidrogen kedalam Logam	43
2.8. Uji Tarik	45
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b>	<b>50</b>
3.1. Diagram Alir Penelitian	50
3.2. Persiapan Alat Dan Bahan	51
3.2.1. Alat	51
3.2.2. Bahan	51
3.3. Prosedur penelitian	51
3.3.1. Persiapan Benda Uji	51
3.3.2. Proses Termomekanikal, <i>Rolling</i> dan Pendinginan	52
3.4. Pengamatan Metalografi	57
3.5. Pengukuran Besar Butir	57
3.6. Pengujian Korosi	58
3.6.1. Pengukuran Laju Korosi dengan Metode Polarisasi	58
3.6.2. Pengukuran Keuletan Baja Karbon GR X42 Terhadap Penggetasan Hidrogen	59
3.6.2.1. Pembuatan Spesimen Uji Tarik	59
3.6.2.2. <i>Hydrogen Charging</i>	59
3.6.2.3. Pengujian Tarik	60
3.6.2.4. Fraktografi	51
<b>BAB 4 HASIL PENELITIAN</b>	<b>63</b>
4.1. Data Karakterisasi Komposisi Kimia	63
4.2. Pengukuran Benda Uji Selama Proses <i>Rolling</i>	63
4.3. Hasil Perhitungan Butir	64
4.4. Hasil Pemeriksaan Kekerasan	65
4.5. Hasil pengukuran Laju Korosi	66
4.6. Hasil Pengamatan Metalografi	66
4.6.1. Pengamatan Secara Makro	66
4.6.2. Pengamatan Secara Mikro	67
4.6.3. Pengamatan Secara Mikro dengan SEM	75
4.7. Uji Ketangguhan Benda Uji Terhadap Penggetasan Hydrogen	83
4.7.1. Proses <i>Hydrogen Charging</i>	83
4.7.2. Data Hasil Uji Tarik	84
4.7.3. Hasil Pengamatan Fraktografi	86
4.7.3.1. Pengamatan Foto Mikro Dengan Olympusmicroscope	86
4.7.3.2. Pengamatan Mikro Dengan SEM	88
<b>BAB 5 PEMBAHASAN</b>	<b>100</b>
5.1. Data Karakterisasi Komposisi Kimia	100
5.2. Hasil Perhitungan Butir	100
5.3. Hasil Pemeriksaan Kekerasan	103
5.4. Hasil pengukuran Laju Korosi	106

5.5. Hasil Pengamatan Metalografi	111
5.6. Uji Ketangguhan Benda Uji Terhadap Penggetasan Hydrogen	114
5.6.1. Data Hasil Uji Tarik	114
5.6.2. Hasil Pengamatan Fraktografi	118
<b>BAB 6 KESIMPULAN</b>	<b>120</b>
<b>DAFTAR REFERENSI</b>	<b>122</b>
<b>LAMPIRAN</b>	<b>127</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Ilustrasi Deformasi Butir Austenit Terhadap Ukuran Akhir Butir Ferit	5
Gambar 2.1	Diagram kesetimbangan besi – karbon	8
Gambar 2.2	Struktur Mikro Baja Karbon Ultra Rendah. Seluruhnya Ferit	10
Gambar 2.3	Pengaruh Karbon Terhadap Sifat Mekanik Baja dengan Karbon Sangat Rendah	10
Gambar 2.4	Ilustrasi Transformasi Fasa pada Baja Karbon	11
Gambar 2.5	Struktur Mikro Baja Karbon Rendah	11
Gambar 2.6	Pengaruh Ukuran Butir terhadap Tegangan Luluh	12
Gambar 2.7	Ilustrasi Struktur Atom Austenite dan Ferite	15
Gambar 2.8	Gambaran Skematik Ukuran Butir Ferit Melalui Proses <i>Rolling</i>	17
Gambar 2.9	Diagram CCT untuk baja HSLA yang mengandung 0.06% C	18
Gambar 2.10	Ferit Poligonal dari baja HSLA-80	19
Gambar 2.11	Ferit Widmanstätten dari baja HSLA	20
Gambar 2.12	Ferit Asikular dari baja HSLA-80b yang mengandung Cu	20
Gambar 2.13	Ferit Granular dari baja A710 yang terbentuk melalui proses pendinginan kontinyu	21
Gambar 2.14	Perbandingan Besar Butir antara pengerolan konvensional (kiri) dan TMCP (kanan)	22
Gambar 2.15	Perbandingan antara jalur proses konvensional dan TMCP	23
Gambar 2.16	Ilustrasi Evolusi struktur mikro selama proses TMCP	24
Gambar 2.17	Perbedaan struktur mikro antara proses konvensional dan proses TMCP	25
Gambar 2.18	Diagram kesetimbangan E-pH untuk besi dan baja	28
Gambar 2.19	Diagram Polarisasi Logam (Diagram Evans)	29
Gambar 2.20	Bagan kurva polarisasi menunjukkan hubungan antara potensial logam dengan rapat arus	32

Gambar 2.21	Classic Tafel Analisis	33
Gambar 2.22	Contoh kasus sel galvanis yang disebabkan deformasi mekanis	35
Gambar 2.23	Ilustrasi Sel Galvanis Mikro	36
Gambar 2.24	Jenis kerusakan akibat hidrogen	38
Gambar 2.25	Contoh kasus <i>Hydrogen Blistering</i>	39
Gambar 2.26	Skema <i>Hydrogen Blistering</i>	39
Gambar 2.27	Pemberian tegangan pada suatu material	41
Gambar 2.28	Mekanisme Umum pengetasan Hidrogen	43
Gambar 2.29	Perbandingan antara kurva tegangan-regangan rekayasa dengan kurva tegangan-regangan sejati	46
Gambar 2.30	Kurva tegangan-regangan rekayasa	47
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	50
Gambar 3.2	Ilustrasi ukuran dan bentuk benda uji	52
Gambar 3.3	Siklus pemanasan benda uji	52
Gambar 3.4	<i>Furnace</i> yang digunakan untuk proses pemanasan ulang	53
Gambar 3.5	Mesin <i>roll</i> yang digunakan untuk proses canai panas	53
Gambar 3.6	Siklus Panas Benda Uji B	54
Gambar 3.7	Siklus Panas Benda Uji C	54
Gambar 3.8	Siklus Panas Benda Uji D	55
Gambar 3.9	Siklus Panas Benda Uji E	55
Gambar 3.10	Siklus Panas Benda Uji F	56
Gambar 3.11	Siklus Panas Benda Uji G	56
Gambar 3.12	Siklus Panas Benda Uji H	56
Gambar 3.13	Metoda pengukuran besar butir dengan menggunakan metode garis intersept	58
Gambar 3.14	Benda uji untuk uji tarik setelah proses <i>hydrogen charging</i>	59
Gambar 3.15	Rangkaian proses <i>hydrogen charging</i>	60
Gambar 3.16	Mesin uji tarik di Lab Teknik Metalurgi dan Material FTUI	61
Gambar 3.17	Scanning Electron Microscope di Lab Teknik Metalurgi dan Material FTUI	62

Gambar 4.1	Benda uji yang digunakan (a) Sebelum di deformasi; (b) Sesudah di deformasi	66
Gambar 4.2	Gambar struktur mikro baja karbon GR X42 sebelum dideformasi yang di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 500x	67
Gambar 4.3	Gambar struktur mikro baja karbon GR X 42 yang dipanaskan hingga 1100°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 500x	68
Gambar 4.4	Gambar struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 30% pada suhu 950°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x; (b) Perbesaran 500x.	69
Gambar 4.5	Gambar struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 950°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 500x	70
Gambar 4.6	Gambar struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dideformasi 35% pada suhu 550°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 500x	71
Gambar 4.7	Gambar struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 550°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 500x.	72
Gambar 4.8	Gambar struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 600°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x ; (b) Perbesaran 500x.	73
Gambar 4.9	Gambar struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 650°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x ;	

	(b) Perbesaran 500x	74
Gambar 4.10	Foto SEM struktur mikro baja karbon GR X42 sebelum dideformasi yang di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x ; (b) Perbesaran 3000x	75
Gambar 4.11	Foto SEM struktur mikro baja karbon GR X 42 yang dipanaskan hingga 1100°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x ; (b) Perbesaran 3000x	76
Gambar 4.12	Foto SEM struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 30% pada suhu 950°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x	77
Gambar 4.13	Foto SEM struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 950°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x	78
Gambar 4.14	Foto SEM struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dideformasi 35% pada suhu 550°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x ; (b) Perbesaran 3000x	79
Gambar 4.15	Foto SEM struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 550°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x	80
Gambar 4.16	Foto SEM struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 600°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x	81
Gambar 4.17	Foto SEM struktur mikro baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 650°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x	82

Gambar 4.18	Rangkaian Proses <i>Hydrogen Charging</i>	83
Gambar 4.19	Susunan Alat dan Bahan Pada Proses <i>Hydrogen Charging</i>	83
Gambar 4.20	Foto Makro Permukaan Patahan Hasil Uji Tarik Dengan Perbesaran 20x (a) Benda Uji sebelum dideformasi; (b) Benda uji yang dipanaskan pada 1100°C; (c) Benda uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 30% pada suhu 950°C; (d) Benda Uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 950°C	86
Gambar 4.21	Foto Makro Permukaan Patahan Hasil Uji Tarik Dengan Perbesaran 20x (a) Benda Uji yang dideformasi 35% pada suhu 550°C; (b) Benda Uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 550°C; (c) Benda Uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 600°C; (d) Benda Uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 650°C	87
Gambar 4.22	Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari baja karbon GR X42 sebelum dideformasi (a) Perbesaran 500x; (b) Perbesaran 1000x	88
Gambar 4.23	Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari baja karbon GR X42 yang dipanaskan hingga 1100°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x	89
Gambar 4.24	Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 30% pada suhu 950°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x ; (c) Perbesaran 1000x	90
Gambar 4.25	Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 950°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x ; (c) Perbesaran 1000x	93
Gambar 4.26	Foto SEM struktur mikro patahan baja karbon GR X42 yang	

	mengalami penggetasan hidrogen sesudah dideformasi 35% pada suhu 550°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x.	94
Gambar 4.27	Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 550°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x	95
Gambar 4.28	Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 600°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x	96
Gambar 4.29	Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari baja karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 35% pada suhu 650°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x ; (c) Perbesaran 1000x	98
Gambar 5.1	Perubahan diameter butir ferit yang di rolling pada suhu 550°C (Benda Uji F), 600°C (Benda Uji G) dan 650°C (Benda Uji H) terhadap benda uji yang tidak di deformasi (Benda Uji A)	100
Gambar 5.2	Perbandingan diameter butir benda uji yang di rolling dengan deformasi 35% pada suhu 550°C (dengan dan tanpa pemanasan pada 1100°C).	102
Gambar 5.3	Pengaruh persentasi deformasi terhadap diameter butir benda uji	102
Gambar 5.4	Perubahan kekerasan benda uji yang di rolling pada suhu 550°C (Benda Uji F), 600°C (Benda Uji G) dan 650°C (Benda Uji H) terhadap benda uji yang tidak di deformasi (Benda Uji A)	103
Gambar 5.5	Perbandingan kekerasan benda uji yang di rolling dengan Deformasi 35% pada suhu 550°C (dengan dan tanpa pemanasan pada 1100°C)	104
Gambar 5.6	Pengaruh deformasi terhadap kekerasan benda uji yang dipanaskan pada suhu $\geq 950^{\circ}\text{C}$	105



Gambar 5.7	Perbandingan pola grafik (a) diameter butir dan (b) kekerasan benda uji A, F, G dan H	106
Gambar 5.8	Perubahan laju korosi benda uji yang di <i>rolling</i> pada suhu 550°C (Benda Uji F), 600°C (Benda Uji G) dan 650°C (Benda Uji H) terhadap benda uji yang tidak di deformasi (Benda Uji A)	108
Gambar 5.9	Perbandingan laju korosi benda uji yang di <i>rolling</i> dengan Deformasi 35% pada suhu 550°C (dengan dan tanpa pemanasan pada 1100°C)	108
Gambar 5.10	Pengaruh deformasi terhadap laju korosi benda uji yang dipanaskan pada suhu $\geq 950^{\circ}\text{C}$	110
Gambar 5.11	Pengaruh persen deformasi terhadap laju korosi benda uji yang dipanaskan pada suhu 950°C	110
Gambar 5.12	Struktur mikro Baja Karbon GR X42	111
Gambar 5.13	Baja Karbon Gr X42 yang dipanaskan hingga 550°C dan di- <i>roll</i> dengan deformasi 0,35	112
Gambar 5.14	Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di <i>roll</i> pada 550°C dengan deformasi 0,35	112
Gambar 5.15	Struktur mikro benda uji awal (A), benda uji yang dideformasi 0% pada suhu 1100°C (B), benda uji yang di <i>rolling</i> dengan deformasi 35% pada suhu 950°C (D) dan benda uji yang di <i>rolling</i> dengan deformasi 35% pada suhu 650°C (H)	113
Gambar 5.16	Kurva perbandingan kekuatan benda uji awal (A) dengan yang dideformasi pada beragam temperatur (B, C, D, E, F, G dan H)	116
Gambar 5.17	Kurva perbandingan kekuatan benda uji awal (A) dengan yang dideformasi pada beragam temperatur (B, C, D, E, F, G dan H)	116
Gambar 5.18	Kurva kekuatan dan persen regangan benda uji awal (A) dan benda uji yang dideformasi pada beragam temperatur (B, C, D, E, F, G dan H)	117
Gambar 5.19	Kurva perbandingan persen regangan benda uji awal (A) dengan yang dideformasi pada beragam temperatur (B, C, D, E, F, G	

dan H)

117

Gambar 5.20 Struktur mikro hasil analisa SEM dari permukaan patahan benda uji yang diperoleh melalui uji tarik setelah sebelumnya digetaskan dengan *hydrogen charging*

118



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Klasifikasi Baja Karbon	9
Tabel 2.2.	Faktor-Faktor yang mempengaruhi korosi	35
Tabel 4.1.	Komposisi Kimia Benda Uji (dalam % berat)	63
Tabel 4.2.	Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji	64
Tabel 4.3.	Hasil Pengukuran Besar Butir	64
Tabel 4.4.	Hasil Kekerasan Vickers (HV) Benda Uji	65
Tabel 4.5.	Hasil Pengukuran Laju Korosi Benda Uji	66
Tabel 4.6.	Hasil Pengukuran Uji Tarik	84
Tabel 4.7.	Data Hasil Uji Tarik	85

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Baja karbon, material rekayasa yang paling banyak digunakan, diperkirakan penggunaannya mencapai 85% total produksi tahunan di seluruh dunia [1]. Penggunaan baja menjadi cukup populer dikarenakan dua alasan utama [2]:

1. Baja dibuat dari mineral yang melimpah di bumi dalam bentuk  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan energi yang digunakan untuk mengkonversi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  menjadi Fe relatif kecil sehingga biaya produksinya cukup murah.
2. Baja dapat dibuat dalam banyak ragam bentuk struktur mikro yang akhirnya menghasilkan ragam sifat mekanik yang variatif. Struktur mikro yang terbentuk dalam baja karbon sangat bergantung pada kandungan karbon dan perlakuan panas atau *thermal history* yang diaplikasikan pada material tersebut.

Sekalipun ketahanan korosi material ini cukup terbatas, ribuan ton baja karbon digunakan pada beragam industri. Jaringan pipa migas di lingkungan air laut sangat rentan terhadap serangan korosi, sementara pipa baja karbon yang digunakan untuk menyalurkan minyak bumi mentah dapat mengalami korosi merata dan atau korosi setempat atau lokal korosi dengan adanya larutan *brine* dengan laju korosi yang bergantung pada konsentrasi ion  $\text{Cl}^-$ , kation logam, dan ion-ion agresif lain yang ada dalam fluida atau di lingkungannya. [1, 3]

Di Indonesia, pertambangan gas dan minyak merupakan industri yang vital yang memberikan sumbangan komoditi dan masukan yang berarti pada pendapatan nasional. Namun kerugian yang diakibatkan oleh korosi di Indonesia diperkirakan mencapai 1 – 1,5% dari GDP (*Gross Domestic Production*) [4]. Karena baja karbon mewakili kelas material tunggal yang paling banyak digunakan, baik dari segi ukuran pemakaian maupun biaya, sangatlah mudah memahami bahwa secara praktikal korosi

pada baja karbon adalah masalah yang sangat krusial. Hal ini yang mendorong dunia industri sepakat untuk mengembangkan baja dengan kualitas yang lebih baik.

Pengembangan metoda penguatan sifat mekanik baja digali untuk memperoleh sifat fisik baja yang lebih superior dengan proses yang tidak terlalu mahal dan hasil pengembangan dapat digunakan dalam beragam aplikasi. Secara umum mekanisme penguatan logam antara lain dengan :

1. Mereduksi ukuran butir atau penghalusan butir (*grain refinement*). Batas butir berfungsi sebagai pembatas pergerakan dislokasi. Jika ukuran butir mengecil maka jumlah penghalang akan naik sehingga kekuatan juga akan naik.
2. Pemaduan dengan larutan padat.
3. Pengerasan regangan (misalnya : *Cold working*)
4. *Presipitasi Hardening*
5. *Perlakuan Panas (Heat Treatment)*, dll.

Peningkatan kehalusan struktur butir ferit pada karbon telah cukup lama menjadi perhatian karena secara signifikan meningkatkan kekuatan luluh atau *yields*. Aplikasi teknik canai terkontrol (*controlled rolling*) dengan percepatan pendinginan kerap digunakan untuk penghalusan struktur mikro baja dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan pada baja paduan rendah (HSLA). Dalam hal ini peristiwa deformasi struktur austenit memiliki peranan penting, namun pencapaian penghalusan ferit maksimum yang dapat dicapai melalui proses termomekanikal konvensional austenit ini hanya berkisar 4 $\mu$ m. Teknik lain yang dilakukan untuk memperoleh penghalusan butir ferit yang lebih baik dengan mengaplikasikan baja pada perlakuan panas dengan *warm rolling* dan *annealing intercritical*. Penghalusan ukuran struktur ferit yang diperoleh dengan metoda ini berkisar 2  $\mu$ m. [5, 6]

Proses deformasi plastis pada material logam kerap digolongkan sebagai perlakuan yang diaplikasi melalui proses pengerjaan dingin (*cold working*) dan juga pengerjaan panas (*hot working*). Proses *cold working* merupakan proses deformasi plastik dan temperatur kerjanya berlangsung di bawah temperatur kristalisasi. Pada proses ini terjadi mekanisme *strain hardening*, yaitu mekanisme penguatan yang

disebabkan karena perbanyakannya densitas dislokasi. Dislokasi merupakan cacat garis dan akan bergerak selama gaya bekerja pada logam tersebut. Sementara pada proses pengerjaan panas, rekristalisasi yang terjadi bersamaan dengan proses deformasi. [7, 8]

Pengerjaan hangat (*warm working*) merupakan salah satu metoda perlakuan terhadap material logam yang menghasilkan struktur mikro yang halus dengan temperatur kerja diantara pengerjaan panas dan pengerjaan dingin ( $550^{\circ}\text{C} - 850^{\circ}\text{C}$ ). Deformasi yang terjadi dengan aplikasi temperatur pada range ini diharapkan tidak terlalu besar, seperti pada pengerjaan panas. Selain itu kualitas permukaan dan kontrol dimensionalnya terbukti lebih baik daripada pengerjaan panas. [9, 10]

Secara umum laju korosi baja karbon rendah pada berbagai media tanah dan kedalaman berkisar antara 0,6 hingga 14 mpy dan laju korosi bahkan dapat diperburuk dengan ancaman pitting saat baja dipapar pada lingkungan air laut [11, 12]. Salah satu cara pengembangan material baja karbon yang ditujukan untuk meningkatkan ketahanan korosi kerap dengan menambahkan elemen-elemen paduan seperti nikel, kromium dan molibdenum. Total kandungan paduan berkisar dari 2,07% hingga tepat dibawah level baja *stainless*, yang mengandung Cr minimum 10% [13].

Namun teknik peningkatan ketahanan korosi lain yang relatif lebih murah adalah dengan teknik pengerjaan hangat. Metoda ini berhasil diterapkan pada baja Si-Al UFG yang mengalami penghalusan butir melalui proses *warm rolling* dan menghasilkan sifat kekuatan, ketangguhan dan ketahanan korosi yang lebih baik [14]. Pada penelitian lain ditemukan peningkatan ketahanan korosi serangan hidrogen pada baja karbon rendah melalui pengerjaan dingin dengan deformasi 50% - 80% [15], sementara pengerjaan hangat pada baja dengan kandungan 1,2% C terjadi sedikit perubahan *tensile strength* saat dipapar dengan hidrogen [16]. Dengan penghalusan struktur mikro pada baja diharapkan fenomena inklusi atom hidrogen pada kisi-kisi butir semakin sulit dan dengan demikian meningkatkan ketahanan baja terhadap ancaman retak akibat inklusi hidrogen (*hydrogen induced cracking*).

Pada penelitian ini akan dipelajari peningkatan ketahanan korosi baja karbon melalui penghalusan struktur mikro dalam material tersebut dan juga pengaruh proses deformasi terhadap kekuatannya setelah dipapar pada proses penggetasan hidrogen (*hydrogen charging*).

## 1.2. Tujuan

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk:

- Menganalisa perilaku butir dan hubungannya dengan ketahanan korosi dan kekuatan benda uji sebelum dan sesudah pencanaian.
- Mempelajari penghalusan butir dan korelasinya dengan pengerasan benda uji yang akan diamati melalui pengujian kekerasan.
- Mempelajari penghalusan butir dan korelasinya dengan penggetasan benda uji yang dipapar ke dalam lingkungan kaya hidrogen selama periode waktu tertentu.

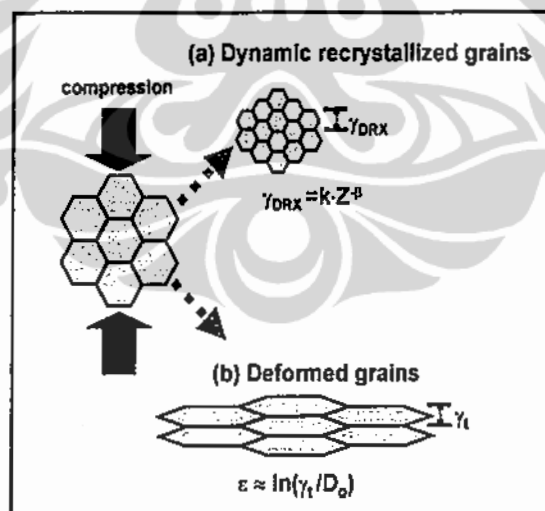
## 1.3. Perumusan Masalah

Sejumlah logam dan paduan akan menyerap hidrogen dan pada kondisi-kondisi tertentu dan mengalami difusi hidrogen yang cukup serius yang mengakibatkan perapuhan pada material. Perapuhan akibat hidrogen adalah salah satu bentuk penurunan kualitas logam yang berhubungan dengan *stress corrosion cracking*. Diduga mekanisme difusi hidrogen ke dalam material dapat terjadi melalui beragam cara. Salah satu penguatan material terhadap serangan difusi hidrogen adalah dengan penghalusan struktur mikro butir ferit melalui proses deformasi. Pencapaian struktur butir ferit yang lebih halus pada material baja karbon telah menjadi objek yang cukup menarik karena terbukti secara signifikan meningkatkan kekuatan luluh (*yield strength*) dan pada saat yang sama transisi temperatur *ductile-brittle* yang lebih rendah dapat diprediksi dengan ukuran butir yang sangat halus (*ultra-fine grain*). Metoda ini cukup berguna untuk tujuan *hardening* (pengerasan)

pada baja yang digunakan di aplikasi pengelasan dan teknik ini jauh lebih murah dibanding penambahan material paduan di dalam baja.

Penghalusan butir ferit telah secara aktif dipelajari untuk menghasilkan peningkatan kekuatan dan ketangguhan pada baja karbon rendah. Dua pendekatan utama telah kerap dipertimbangkan sebagai teknik penghalusan butir ferit, yang pertama adalah dengan menggunakan teknik *severe plastic deformation* (SPD) austenit pada temperatur tinggi yang diikuti dengan percepatan pendinginan untuk meningkatkan jumlah pembentuk lokasi inti atau *nucleation* untuk butir ferit dengan struktur yang lebih halus. Teknik kedua adalah dengan menggunakan *warm* atau *cold forming* ferit untuk memperoleh struktur butir yang halus melalui rekristalisasi.

Metoda *severe plastic deformation* dapat membuat *bulk* spesimen dengan struktur butir yang sangat halus (*ultrafine-grained*) hingga ukuran nano dan sub mikrokristalin yang dapat meningkatkan sifat mekanis spesimen tersebut.



Gambar 1.1 Ilustrasi Deformasi Butir Austenit Terhadap Ukuran Akhir Butir Ferit [5]

Gambar 1.1 menunjukkan efek deformasi plastis austenit pada ukuran final butir ferit pada baja karbon rendah. Ferit mengalami transformasi dari austenit yang



terdeformasi selama pendinginan masing-masing temperatur deformasi. Ukuran awal butir austenit adalah sekitar 17  $\mu\text{m}$ . Dari Gambar 1.1, dibagian awal kita bisa melihat berkurangnya ukuran butir ferit dengan meningkatnya *compressive strain* yang diaplikasikan pada austenit dan kemudian sebagian besar tetap konstan pada level aplikasi *strain* tertentu. Dengan kata lain, kelihatannya terdapat limit ukuran butir ferit yang lebih rendah yang terhaluskan melalui SPD austenit. Walaupun sejumlah penelitian melaporkan tentang batas ukuran penghalusan butir ferit melalui SPD austenit baja karbon rendah, ukuran penghalusan yang tepat masih belum dapat dipastikan.

#### 1.4. Pembatasan Masalah

Untuk mencari hubungan penghalusan butir dan pengaruhnya terhadap perilaku korosi, sifat kekerasan dan pengaruh penggetasan hidrogen terhadap keuletannya, penelitian ini dilakukan dengan batasan-batasan berikut:

1. Bahan dasar yang dipakai adalah baja karbon GR X42 dengan ukuran 3 x 6 x 0.8 cm.
2. Metode penghalusan butir yang dilakukan adalah Severe Plastic Deformation, dimana canai hangat diaplikasi pada materi uji yang kemudian dilanjutkan dengan proses *rolling*.
3. Proses deformasi dilakukan pada temperatur deformasi 550, 600, 650, dan 950°C dan pendinginan udara.
4. Pada temperatur 950°C, proses *rolling* dilakukan dengan deformasi 30% dan 35%, sementara pada suhu 550, 600 dan 650°C proses *rolling* dilakukan dengan deformasi 35%.
5. Analisa struktur mikro sebelum dan sesudah deformasi dilakukan dengan teknik metalografi sesuai dengan ASTM E407-99 menggunakan Olympus Microscope. Besar butir yang diamati dihitung dengan metode Jeffries sesuai dengan ASTM E112.

6. Metoda pengujian kekerasan mikro yang dilakukan sesuai dengan ASTM A1038-08 dan menggunakan *Portable Harness Testing Machine*.
7. Pengukuran laju korosi materi uji sebelum dan sesudah deformasi dilakukan dengan metoda polarisasi sesuai dengan ASTM G1
8. Proses pemasukan hidrogen dilakukan melalui sirkuit galvanostatik (polarisasi katodik) dengan larutan 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ditambah 100 mg/L Thiourea (CS[NH<sub>2</sub>]<sub>2</sub>) dengan rapat arus 1 mA/cm<sup>2</sup> dan waktu *charging* selama 10 menit.
9. Keuletan materi uji yang telah terpapar oleh hidrogen diamati melalui Uji Tarik ASTM E8 (*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*).
10. Analisa penghalusan butir materi uji yang mengalami deformasi dan pengamatan permukaan patahan spesimen uji tarik dilakukan dengan menggunakan *Scanning electron microscopy* (SEM) dengan perbesaran 500, 1000 dan 3000.

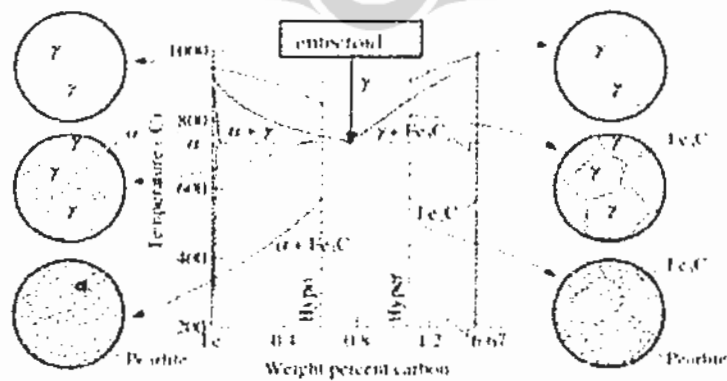
## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Baja Karbon

Baja karbon (*carbon steel*) adalah salah satu jenis logam paduan besi karbon terpenting dengan persentase berat karbon hingga 2,11%. Umumnya baja karbon (*plain carbon steel*) diklasifikasikan menjadi: baja karbon rendah (*low carbon steel*), baja karbon menengah (*medium carbon steel*), dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*) berdasarkan persentasenya. Jika penambahan elemen-elemen lain selain karbon untuk tujuan-tujuan tertentu cukup signifikan, maka baja diklasifikasikan sebagai baja paduan (*alloy steel*) atau baja paduan rendah (*low alloy steel*) [17].

Baja karbon rendah adalah salah satu jenis baja karbon, di mana persentase unsur karbonnya di bawah 0,25%, untuk lebih jelas ditunjukkan pada Tabel 2.1, sedangkan unsur pembentuk lainnya seperti Mn tidak lebih dari 0,8%, Si tidak lebih dari 0,5%, demikian pula unsur Cu tidak lebih dari 0,6%. Di samping jenis baja karbon berdasarkan kandungan karbonnya, juga dikelompokkan berdasarkan komposisi prosentasi unsur pemandu karbonnya seperti yang perlihatkan pada diagram fasa Fe-C Gambar 2.1, baja hypoeutektoid kurang dari 0,8% C, baja eutektoid 0,8% C, sedangkan baja hypereutektoid lebih besar dari 0,8% C.



Gambar 2.1. Diagram kesetimbangan besi – karbon [2]

Baja dengan kadar karbon sangat rendah memiliki kekuatan yang relatif rendah tetapi memiliki keuletan yang relatif tinggi. Baja jenis ini umumnya digunakan untuk proses pembentukan logam lembaran. Dengan meningkatnya kadar karbon maka baja karbon menjadi semakin kuat tetapi berkurang keuletannya. Baja AISI-SAE 1020-1040, dengan kadar karbon 0,4%-0,4%, diklasifikasikan sebagai baja karbon menengah. Baja jenis ini digunakan secara luas sebagai bahan poros (shaft) dan roda gigi (gear). Baja dengan kadar karbon di atas 0,60% umumnya dikategorikan sebagai baja karbon tinggi. Aplikasi dari baja karbon tinggi misalnya untuk pembuatan cetakan-cetakan logam (dies, punch, block), kawat-kawat baja (kawat pegas, kawat musik, kawat kekuatan tinggi), dan alat-alat potong (cutter, shear blade).

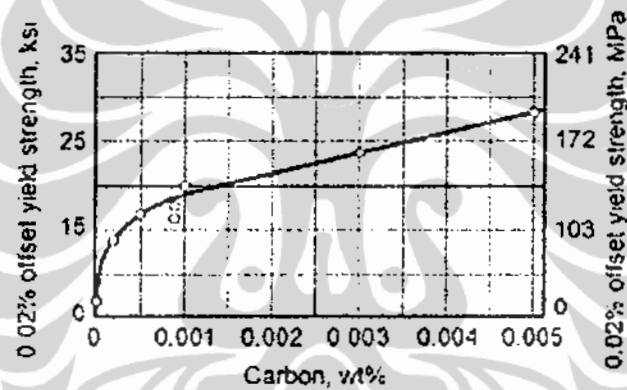
Tabel 2.1. Klasifikasi Baja Karbon [18]

No	Jenis Baja Karbon	Persentase Unsur Carbon (%C)
1	Baja Karbon Rendah	$\leq 0.25\%$
2	Baja Karbon Medium	0.25 – 0.55
3	Baja Karbon Tinggi	$\geq 0.55\%$

Baja karbon rendah atau sangat rendah banyak digunakan untuk proses pembentukan logam lembaran, misalnya untuk badan dan rangka kendaraan serta komponen-komponen otomotif lainnya. Baja jenis ini dibuat dan diaplikasikan dengan mengeksploitasi sifat-sifat Ferit.

Ferit adalah salah satu fasa penting di dalam baja yang bersifat lunak dan ulet. Baja karbon rendah umumnya memiliki kadar karbon di bawah komposisi *eutektoid* dan memiliki struktur mikro hampir seluruhnya Ferit. Pada lembaran baja kadar karbon sangat rendah atau ultra rendah, jumlah atom karbon-nya bahkan masih berada dalam batas kelarutannya pada larutan padat sehingga struktur mikronya adalah Ferit seluruhnya (Gambar 2.2). Hingga batas kelarutannya di dalam larutan padat Ferit, penambahan karbon berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanik lembaran (lihat Gambar 2.3).

Gambar 2.2 Struktur Mikro Baja Karbon Ultra Rendah. Seluruhnya Ferrit [17]



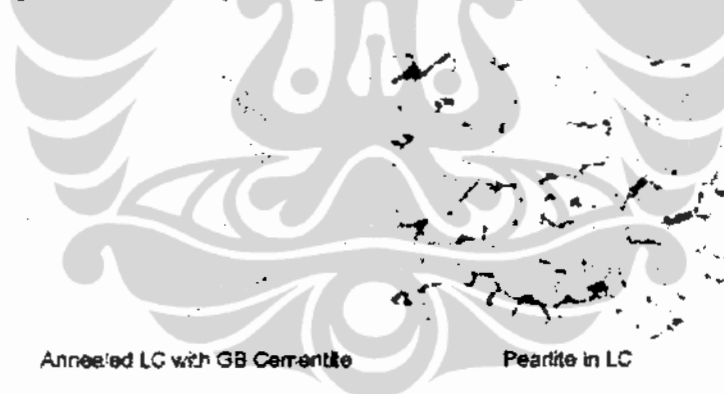
Gambar 2.3 Pengaruh Karbon Terhadap Sifat Mekanik Baja dengan Karbon Sangat Rendah [17]

Baja karbon rendah dengan kandungan karbonnya yang rendah dan struktur mikronya yang terdiri dari fasa ferrit dan pearlit menjadikan baja karbon rendah bersifat lunak dan kekuatannya lemah namun keuletan dan ketangguhannya sangat baik. Baja karbon rendah kurang responsif terhadap perlakuan panas untuk mendapatkan struktur mikro martensit maka dari itu untuk meningkatkan kekuatan dari baja karbon rendah dapat dilakukan dengan proses canai dingin maupun karburisasi. Skematik perubahan fasa pada baja karbon rendah dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Ilustrasi Transformasi Fasa pada Baja Karbon [2]

Pada kadar karbon lebih tinggi akan mulai terbentuk endapan cementite atau Fasa pearlite pada batas butirnya sebagaimana terlihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Struktur Mikro Baja Karbon Rendah [17]

Selain kadar karbon, sifat-sifat mekanik baja karbon rendah dengan Fasa tunggal Ferit (ferritic low carbon steel) ditentukan pula oleh dimensi atau ukuran butir-butir Ferit. Secara umum diketahui bahwa baja dengan ukuran butir lebih kecil akan memiliki kekuatan yang lebih tinggi pada suhu kamar. Material dengan butir yang halus (yang memiliki butir kecil) lebih keras dan kuat dibandingkan material dengan butir kasar, karena butir halus memiliki area batas butir total yang lebih luas

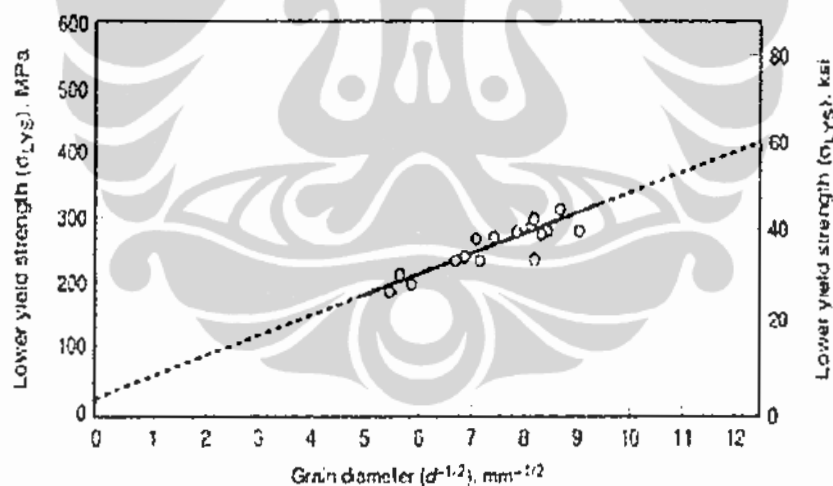
untuk menghalangi pergerakan dislokasi. Untuk sebagian besar material, kekuatan tariknya bervariasi dengan ukuran butir.

Ukuran butir dapat diatur oleh laju solidifikasi dari fasa cair, dan juga oleh deformasi plastis yang diikuti dengan perlakuan panas yang sesuai. Juga harus diperhatikan bahwa penghalusan butir (*grain size reduction*) meningkatkan tidak hanya kekuatan namun juga ketangguhan pada hampir kebanyakan paduan

Hubungan tersebut secara kuantitatif dikenal sebagai Persamaan **Hall-Petch** (Pers. 2.1). Gambar 2.6 menunjukkan hubungan antara akar kuadrat diameter butir Ferit pada baja karbon rendah dengan Fasa Ferit.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (2.1)$$

Dimana  $\sigma_y$  dan  $\sigma_0$  adalah tegangan luluh dalam Mpa;  $k_y$  adalah konstanta dan  $d$  adalah diameter butir dalam mm.



Gambar 2.6 Pengaruh Ukuran Butir terhadap Tegangan Luluh [17]

Persamaan Hall-Petch ini sangat penting dalam menjelaskan hubungan antara struktur mikro dan sifat-sifat baja. Hubungan ini dimanfaatkan di dalam pemrosesan baja, yaitu dengan mengatur atau mengendalikan ukuran butir untuk meningkatkan

kekuatan baja. Penguatan baja dengan cara ini dilakukan melalui proses *thermomekanika (thermomechanical process)*, proses perlakuan panas (*heat treatment*), dan pemberian paduan mikro (*micro alloying*).

Untuk aplikasi proses pembentukan logam lembaran, sifat-sifat Ferit yang ulet sangat penting. Diketahui bahwa keuletan adalah salah satu sifat intrinsik yang penting. Namun, di samping % elongasi maksimum yang menggambarkan keuletan baja karbon, terdapat parameter penting lain yang lebih menggambarkan karakteristik mampu bentuk logam lembaran adalah nilai  $n$  (koefisien pengerasan regangan) dan nilai  $r$  (rasio regangan plastis). Nilai  $n$  secara umum menggambarkan kemampuan lembaran baja untuk mendistribusikan regangan secara merata. Pada pengujian tarik dapat dilihat dari besarnya regangan uniform yang mampu dicapai oleh logam. Nilai  $r$  secara umum menggambarkan ketahanan logam lembaran terhadap penipisan. Dalam hal ini, terhadap hubungan yang cukup kuat antara nilai  $r$  dan LDR atau batas rasio penarikan logam lembaran. Nilai  $r$  terutama berhubungan dengan tekstur kristalografi pada baja, yaitu adanya orientasi kristal yang lebih disukai (*preferred orientation*). Di samping itu, dilaporkan pula terdapat hubungan antara Lankford Value atau nilai  $r$  dengan ukuran besar butir.

#### 2.1.1. Ferit [17]

Ferit adalah Fasa larutan padat yang memiliki struktur BCC (*body centered cubic*). Ferit dalam keadaan setimbang dapat ditemukan pada temperature ruang, yaitu  $\alpha$ -Ferit atau pada temperatur tinggi, yaitu  $\delta$ -Ferit. Secara umum Fasa ini bersifat lunak (*soft*), ulet (*ductile*), dan magnetic (*magnetic*) hingga temperatur tertentu, yaitu  $T_{curie}$ . Kelarutan karbon di dalam Fasa ini relatif lebih kecil dibandingkan dengan kelarutan karbon di dalam Fasa larutan padat lain di dalam baja, yaitu Fasa Austenit. Pada temperatur ruang, kelarutan karbon di dalam  $\alpha$ -Ferit hanyalah sekitar 0,05%.

Berbagai jenis baja dan besi tuang dibuat dengan mengeksploitasi sifat-sifat Ferit. Baja lembaran berkadar karbon rendah dengan Fasa tunggal Ferit misalnya, banyak diproduksi untuk proses pembentukan logam lembaran. Dewasa ini bahkan

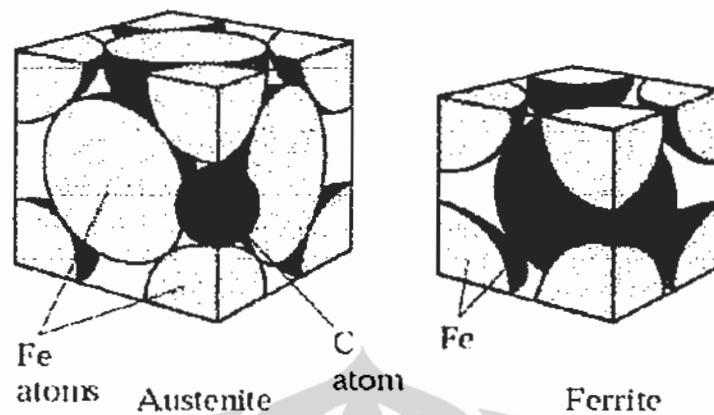


telah dikembangkan baja berkadar karbon ultra rendah untuk karakteristik mampu bentuk yang lebih baik. Kenaikan kadar karbon secara umum akan meningkatkan sifat-sifat mekanik Ferit sebagaimana telah dibahas sebelumnya. Untuk paduan baja dengan Fasa tunggal Ferit, factor lain yang berpengaruh signifikan terhadap sifat-sifat mekanik adalah ukuran butir.

### 2.1.2. Austenit [17]

Fasa Austenit memiliki struktur atom FCC (Face Centered Cubic). Dalam keadaan setimbang Fasa Austenit ditemukan pada temperatur tinggi. Fasa ini bersifat non magnetik dan ulet (ductile) pada temperatur tinggi. Kelarutan atom karbon di dalam larutan padat Austenit lebih besar jika dibandingkan dengan kelarutan atom karbon pada Fasa Ferit. Secara geometri, dapat dihitung perbandingan besarnya ruang intertisi di dalam Fasa Austenit (atau kristal FCC) dan Fasa Ferit (atau kristal BCC). Perbedaan ini dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena transformasi Fasa pada saat pendinginan Austenit yang berlangsung secara cepat.

Selain pada temperatur tinggi, Austenit pada sistem Ferrous dapat pula direkayasa agar stabil pada temperatur ruang. Elemen-elemen seperti Mangan dan Nickel misalnya dapat menurunkan laju transformasi dari gamma-Austenit menjadi alpha-Ferit. Dalam jumlah tertentu elemen-elemen tersebut akan menyebabkan Austenit stabil pada temperatur ruang. Contoh baja paduan dengan Fasa Austenit pada temperatur ruang misalnya adalah Baja Hadfield (12%Mangan) dan Baja Stainless 18-8 (8%Ni).



Gambar 2.7 Ilustrasi Struktur Atom Austenit dan Ferit [17]

## 2.2. Transformasi Austenit Menjadi Ferit [19]

Pada proses transformasi, ferit akan terbentuk selama pendinginan. Pembentukan ferit diawali dengan nukleasi ferit. Adapun tempat-tempat potensial untuk nukleasi ferit diantaranya:

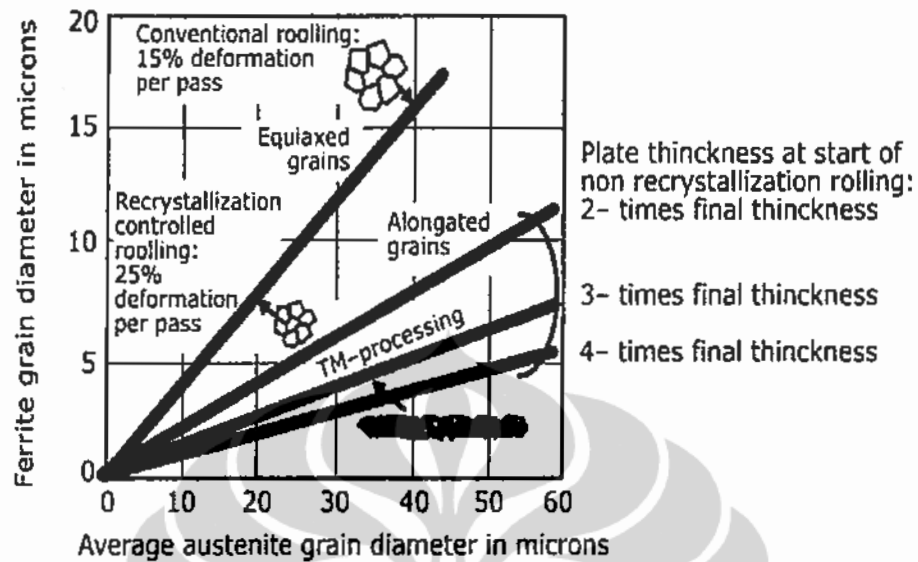
- a. Batas butir austenit, yang merupakan tempat nukleasi ferit terutama pada sisi-sisi butir.
- b. Nukleasi ferit terjadi secara teratur sepanjang batas butir austenit, dimungkinkan karena merupakan tempat yang mempunyai energi yang lebih tinggi karena merupakan cacat kristal. Nukleasi yang lebih sering akan terjadi pada austenit yang terdeformasi.
- c. Pita-pita deformasi, yang merupakan tempat nukleasi ferit intergranular. Pita-pita deformasi merupakan tempat untuk nukleasi ferit. Namun tidak semua pita-pita deformasi potensial dan efektif sebagai tempat nukleasi.
- d. Partikel fasa kedua. Partikel fasa kedua yaitu karbida atau nitrida yang tidak larut merupakan tempat nukleasi.
- e. Sub batas butir, nukleasi yang terjadi pada sub batas butir ini hanya terjadi jika deformasi sub struktur tanpa *recovery*. *Recovery* yang minimal menyebabkan ferit

akan potensial untuk ternukleasi. Jadi dengan deformasi yang kecil, sub struktur akan terecovery dan terbentuk struktur butir ferit karena adanya nukleasi intergranular. Waktu penahanan pada temperatur tertentu yang lebih singkat menghasilkan nukleasi intergranular yang lebih banyak sehingga terbentuk ferit yang lebih seragam, hal ini dipengaruhi oleh partikel presipitat fasa kedua yang mampu menghambat *recovery* dan menghasilkan potensial nukleasi sub batas butir yang tinggi.

- f. Batas butir kembaran, yang terjadi karena energi yang rendah, maka batas butir kembaran yang koheren bertindak sebagai tempat nukleasi ferit.

Mungkin posisi yang paling relevan untuk tempat nukleasi transformasi Austenit-ferit pada baja adalah pada batas butir. Pada kasus transformasi melalui deformasi austenit, bagian-bagian dislokasi yang ada di dalam butir memiliki peran sebagai tempat pengitinan atau nukleasi. Setelah pembentukan inti, ukuran kristal ferit akan terus bertumbuh hingga bertemu atau tertahan oleh kristal yang lainnya. Pada laju pendinginan yang konstan, akan terbentuk struktur kristal ferit yang lebih halus, pada saat transformasi dimulai dari struktur kristal Austenit yang halus, dan terutama dari butir austenit yang terelongasi, dimana rasio antara permukaan butir terhadap volume butir meningkat. Sejumlah persamaan regresi diajukan untuk menggambarkan ukuran butir ferit. Untuk aplikasi kondisi rolling dan pendinginan udara, sebuah persamaan yang cukup sederhana menjelaskan hubungan antara ukuran butir ferit ( $d\alpha$ ) yang sedikit lebih kecil dibandingkan setengah dimensi butir austenit yang dikondisikan tegak lurus terhadap bidang *rolling*, yang menjelaskan transformasi dari rekristalisasi dan deformasi austenit [20].

$$d\alpha = 0.4 \times h_g \quad (2.2)$$



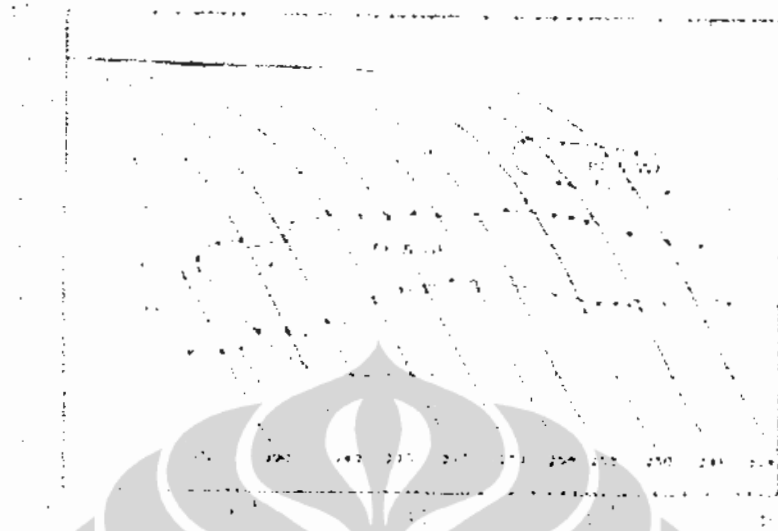
Schematical Representation of Ferrite Grain Size as Result of the Rolling Process

Gambar 2.8 Gambaran Skematik Ukuran Butir Ferit Melalui Proses *Rolling* [20]

Gambar diatas secara sistematis menjelaskan ukuran butir ferit yang dapat dicapai melalui beragam proses *rolling*.

### 2.3. Struktur Mikro Feritik [21]

Identifikasi, karakterisasi dan klasifikasi beragam struktur mikro feritik baja karbon rendah berdasarkan pada diagram *continuous-cooling temperature* (CCT). Sebagai contoh adalah diagram CCT untuk baja HSLA. Beragam bentuk struktur mikronya diperoleh melalui variasi temperature proses, dimana PF untuk poligonal ferit, WF untuk Widmanstätten ferit, AF untuk asikular ferit dan GF untuk granular ferit.



Gambar 2.9 Diagram CCT untuk baja HSLA yang mengandung 0.06% C [21]

### 2.3.1 Ferit Poligonal.

Struktur mikro ferit baja karbon ini terbentuk pada temperatur tertinggi transformasi austenit-ferit dengan kecepatan pendinginan yang paling lambat. Kristal atau butir feritnya mengalami nukleasi sebagai batas butir *allotriomorphs* dan bertumbuh menjauhi batas butir austenit untuk membentuk butir *equiaxed* atau *poligonal ferit*. Gambar 2.10 dibawah adalah bentuk mikrostruktur poligonal ferit dari baja HSLA yang mengalami transformasi pada suhu 675°C dan ditahan selama 500 detik. Struktur butirnya terlihat lebih halus, memantulkan cahaya (oleh karenanya berwarna putih), batas butirnya dipisah oleh batas kontinyu dan linier. Bagian yang berwarna hitam merupakan martensite yang berasal dari struktur Austenit yang tidak sempat mengalami transformasi pada waktu tahan 500 detik.



Gambar 2.10 Ferit Poligonal dari baja HSLA-80 [21]

Pertumbuhan butir ferit poligonal dikontrol melalui transfer kilat atom substitusional disepanjang interfasa disorder austenit-ferit (yang secara parsial koheren) dan difusi lambat atom karbon dari butir ferit.

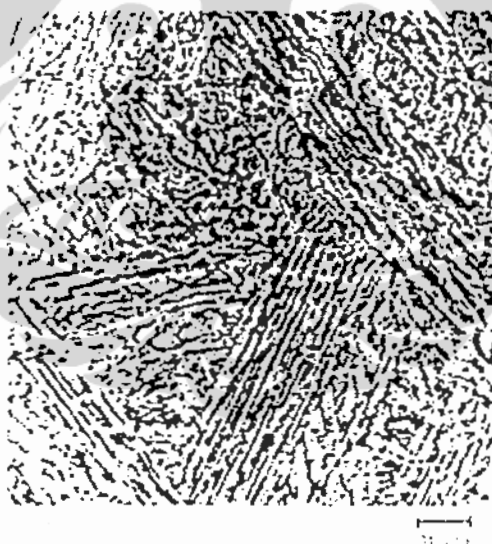
### 2.3.2. Ferit Widmanstätten

Ferit Widmanstätten (FW) berbentuk koarse dan morfologi terelongasi (panjang). Gambar 2.11 menunjukkan kristal FW yang terbentuk dari baja HSLA melalui transformasi isothermal Austenit pada  $600^{\circ}\text{C}$  dengan waktu tahan 100 detik. Bentuk kristal FW yang terelongasi terlihat berwarna putih dan tidak terdapat substruktur didalam masing-masing kristalnya. Bagian yang berwarna gelap pada gambar tersebut adalah struktur martensite yang terbentuk selama proses pendinginan. Densiti dislokasi pada kristal ferit Widmanstätten relatif rendah.



Gambar 2.11 Ferit Widmanstätten dari baja HSLA [21]

### 2.3.3. Ferit Asikular



Gambar 2.12 Ferit Asikular dari baja HSLA-80b yang mengandung Cu [21]

Pada pendinginan berkecepatan tinggi, Austenit dari baja karbon rendah dan baja karbon sangat rendah akan bertransformasi menjadi kristal ferit dengan struktur yang lebih halus dibanding dengan struktur ferit yang dipaparkan sebelumnya. Kristal

tersebut mempunyai bentuk elongasi atau asikular. Range temperatur terbentuknya ferit asikular tepatnya berkisar pada area temperatur intermediet. Gambar 2.12 menunjukkan mikrostruktur ferit asikular baja HSLA-80 yang terbentuk pada 500°C. Bentuk yang paling jelas adalah struktur yang terelongasi, paralel dan teratur. Salah satu karakter yang menonjol dari asikular ferit adalah densiti dislokasi yang cukup besar diantara kristal-kristal feritnya.

#### 2.3.4. Ferit Granular

Ferit Bainitic Granular, atau ferit granular terbentuk pada temperature transformasi intermediate pada baja karbon rendah dan sedikit mirip dengan struktur bainitik atau ferit asikular. Karakteristik morfologi ferit granular masuk ke dalam katagori transformasi austenit-ferit yang berbeda dari ferit asikular. Gambar 2.13 menunjukkan struktur ferit granular dari baja A710 yang terbentuk selama proses pendinginan continyu. Struktur mikro ferit granular mengandung sebaran partikel-partikel granular, kristalnya cukup halus dengan ukuran hanya beberapa mikron. Densiti dislokasinya cukup besar dan hanya terpisah dengan pergeseran sudut yang tidak terlalu besar.



Gambar 2.13 Ferit Granular dari baja A710 yang terbentuk melalui proses pendinginan kontinyu [21]



#### 2.4. Thermo Mechanical Controlled Process (TMCP)

Pada masa yang lalu, pengerolan pada canai panas/hot rolling digunakan hanya untuk mendapatkan dimensi nominal saja seperti ketebalan, lebar dan panjang. Karena persyaratan kualitas yang tinggi, perlakuan panas seperti normalizing atau Quench and Tempering perlu dilakukan sebagai proses lanjutannya. Kini dengan persyaratan kualitas yang lebih tinggi lagi, proses baru untuk plate rolling telah ditemukan. Proses itu adalah TMCP [22].

*Thermomechanical Controlled Process (TMCP)* dapat dikarakteristikan sebagai proses yang melibatkan panas / heat dan deformasi. TMCP adalah sebuah teknik perlakuan logam yang didesain untuk meningkatkan kekuatan sekaligus ketangguhan. Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP didapat dari adanya mekanisme pengecilan butir dengan proses deformasi panas yang terkontrol (*controlled rolling*).

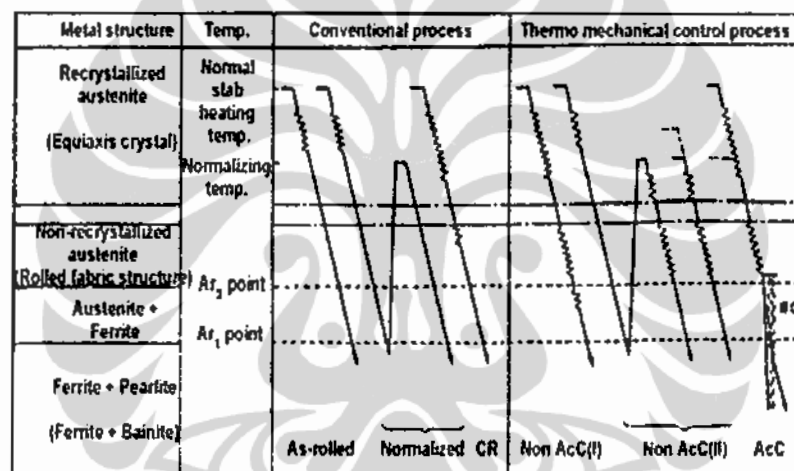
TMCP merupakan istilah kolektif pada beberapa proses yang berbeda untuk menghasilkan baja dengan butir halus yang memiliki nilai kekuatan tinggi, ketangguhan yang baik dan kemampuan yang sempurna [23]. Pada baja TMCP, sifat mekanis (*mechanical properties*) terutama ditentukan melalui kombinasi dari perlakuan mekanik (*mechanical working*), *recovery processes*, rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*) [24].



Gambar 2.14 Perbandingan Besar Butir antara pengerolan konvensional (kiri) dan TMCP (kanan) [25]

Mekanisme penghalusan butir dalam pengerolan terkendali (*controlled rolling*) adalah rekristalisasi pada austenit selama deformasi panas. Proses ini dipengaruhi oleh komposisi paduan, temperatur pengerolan, dan derajat deformasi yang berlangsung selama pengerolan. Bila austenit tidak memiliki partikel fasa kedua maka dihasilkan pertumbuhan butir yang nyata sehingga mekanisme penghalusan butir menjadi terbatas.

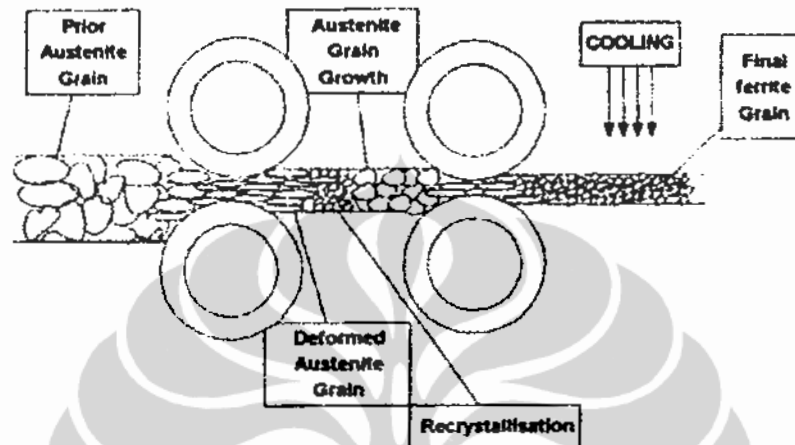
Untuk lebih lengkapnya mengetahui perbandingan antara jalur proses konvensional dan TMCP, dapat dilihat pada gambar Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Perbandingan antara jalur proses konvensional dan TMCP [26].

Jalur proses TMCP, pada bagian awal (rough steel section), seperti slab, dipanaskan hingga temperatur yang digunakan pada pengerjaan panas yaitu sekitar  $1200^{\circ}\text{C}$ . Kemudian diikuti reduksi / *hot work deformation* yang dilakukan pada temperatur yang lebih rendah. Deformasi plastis pada temperatur lebih rendah menghasilkan ukuran butir yang halus (*fine grain sizes*) dan menghambat terjadinya presipitasi. Selanjutnya masuk proses pendinginan. Pendinginan tersebut yang mengarahkan baja pada kisaran temperatur transisi, dan hasil transformasi austenit ke ferit menghasilkan butir ferit halus (*fine Ferit grains*) dan penyebaran presipitat yang baik. Untuk beberapa baja TMCP, tahap akhir pendinginan, selama transformasi telah

terjadi sepenuhnya, dipercepat dengan pendinginan air untuk menghasilkan ukuran butir yang lebih halus. Pendinginan yang dipercepat (*accelerated cooling*) terkadang dapat menghasilkan formasi bainit sama seperti, atau sebagai ganti, formasi ferit.



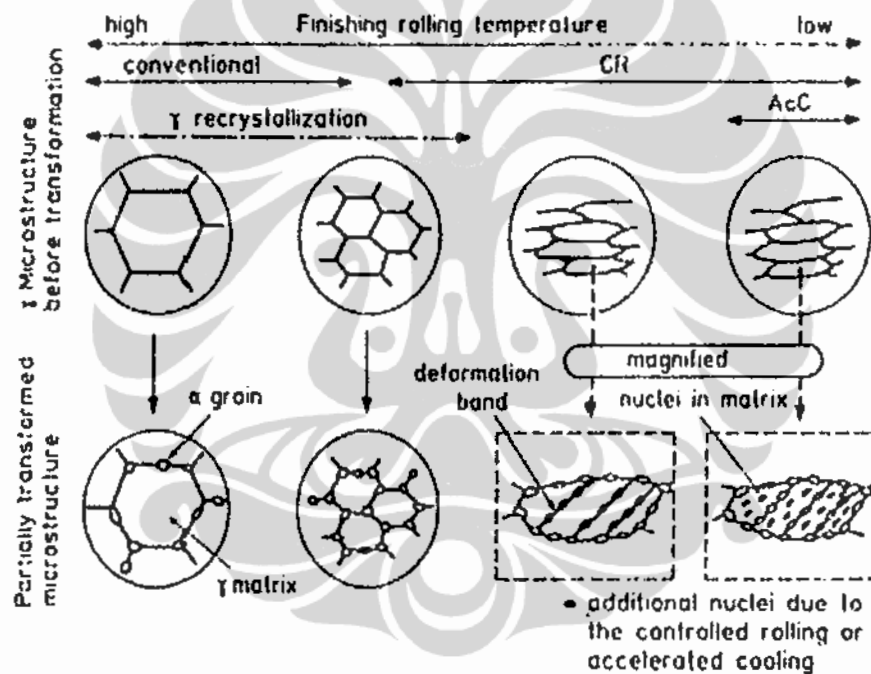
Gambar 2.16 Ilustrasi Evolusi struktur mikro selama proses TMCP [27]

Terdapat berbagai macam TMCP, yang beberapa halnya diilustrasikan berbeda dengan proses konvensional pada gambar. Jalur TMCP dapat dijadikan tiga kategori, yaitu [25]:

1. Pengerolan terkendali dibawah temperatur normalising, masih fasa austenitik sepenuhnya (*fully austenitic*) (diatas temperatur  $A_{r3}$ ) diikuti dengan pendinginan cepat dengan kecepatan pendinginan sekitar  $10^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ . Tujuan dari proses ini adalah untuk memperhalus ukuran butir dengan pengerolan terkendali (*controlled rolling*) dan untuk meningkatkan kekuatan dengan menekan formasi ferit dan pearlit untuk menghasilkan bainit yang kuat dan tangguh.
2. Pengerolan terkendali dilakukan pada temperatur diatas  $A_{r3}$  dan dibawah temperatur normalising, pada daerah austenit ferit tercampur. Sebagai tambahan pada penghalusan butir austenit, butir terekristalisasi menjadi pipih dan penukleasian Ferit halus didapatkan melalui deformasi. Pada temperatur

diatas  $A_{r1}$ , pengerolan terkendali dihentikan, dan diikuti pendinginan cepat menuju temperatur ruang atau temperatur intermediet.

3. Pengerolan terkendali dilakukan sebagai bagian proses awal (preliminary), diikuti pendinginan dan pemanasan kembali hingga diatas temperatur  $A_{r3}$  dan kemudian pendinginan cepat hingga dibawah temperatur  $A_{r1}$ . Tujuan dari teknik ini adalah untuk membentuk ukuran butir paling halus pada equiaxed Austenit (*finest equiaxed Austenit grain size*) sebelum pengerolan terkendali dimulai.



Gambar 2.17 Perbedaan struktur mikro antara proses konvensional dan proses TMCP [25]

## 2.5. Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro [2, 28]

Deformasi plastis sering diklasifikasikan sebagai perlakuan yang selalu dilakukan pada pengerjaan panas atau pengerjaan dingin terhadap logam. Yang membedakan diantara keduanya adalah pada pengerjaan dingin proses deformasi

plastis tidak diikuti proses rekristalisasi. Sedangkan pada pengerjaan panas terjadi proses rekristalisasi yang berlangsung secara bersamaan dengan proses deformasi. Deformasi plastis merupakan hasil dari pergerakan salah satu kristal yang disebut dislokasi (ASM 1973). Pada logam yang dideformasi plastis terdapat sejumlah dislokasi yang terjadi pada kristal-kristalnya. Kepadatan dislokasi dapat seragam atau memiliki nilai yang jauh berbeda dari satu titik ke titik yang lain. Keragaman dislokasi memberikan peningkatan terhadap variasi *large-scale deformations*, termasuk *slip* dan *twinning*. Bidang kristalografi dimana garis dislokasi melintang dikenal dengan bidang *slip*. Garis-garis slip nampak seperti jejak pada bidang *slip*, yang mana dapat dilihat pada permukaan baja (ASM 1973). Garis *slip* menandakan terjadi transfer material pada sisi-sisi yang berlawanan terhadap bidang *slip*. *Planer slip* menunjukkan garis *slip* berbentuk lurus (*straight*), sedangkan *wavy slip* menunjukkan garis slip berbentuk secara tak beraturan. Garis *wavy slip* mengindikasikan rangkaian pemutusan mikroskopik pada dua atau lebih bidang *intersecting slip* seperti yang disebabkan oleh penyimpangan *cross slip* pada *screw dislocation*.

Deformasi dan slip pada material polikristalin (suatu susunan yang tersusun lebih dari satu single kristal seperti baja) terlihat sedikit kompleks (Callister 1997). Untuk orientasi kristalografi yang acak pada sejumlah butir, arah dari *slip* akan berbeda dari butir yang satu dengan butir yang lain. Karena masing-masing, pergerakan dislokasi yang terjadi pada *slip system* memiliki orientasi masing-masing. Menurut Callister (1997), deformasi plastis sebaiknya terjadi pada produksi bidang slip dan pemanjangan butir sepanjang arah dimana spesimen mengalami pemanjangan

## 2.6. Pengertian Umum Korosi Elektrokimia [29, 30, 31]

Korosi secara umum didefinisikan sebagai bereaksinya suatu material dengan lingkungannya [29]. Sebagai akibatnya maka material tersebut bisa mengalami perubahan sifat, baik sifat fisik maupun sifat mekaniknya. Korosi pada logam terjadi

karena adanya reaksi elektrokimia dengan lingkungannya dan mengakibatkan degradasi dari sifat-sifat logam tersebut.

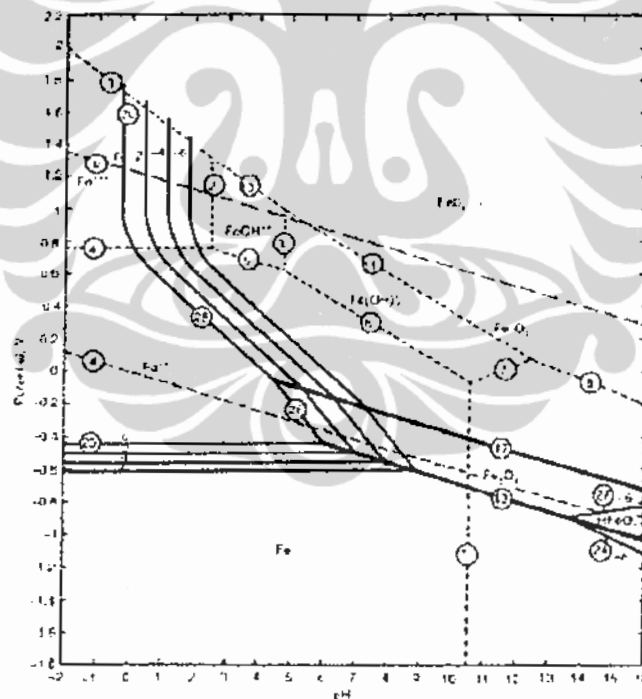
Korosi logam secara sederhana dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu: Korosi basah (*aqueous corrosion*) dan korosi kering/korosi temperatur tinggi (*oxidation corrosion*). Pada korosi basah, akan ditimbulkan arus listrik sehingga jenis korosi ini disebut sebagai korosi elektrokimia. Hal ini mudah terjadi pada logam karena logam merupakan penghantar listrik yang baik, akibatnya logam akan bereaksi secara elektrokimia membentuk senyawa yang sejenis dengan bentuknya semula di alam.

### 2.6.1. Termodinamika Korosi

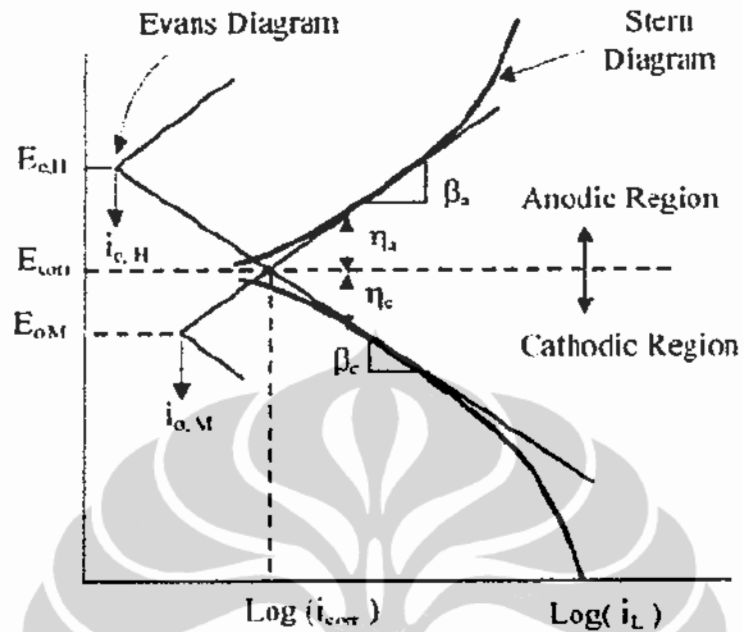
Termodinamika adalah suatu ilmu yang mempelajari perubahan energi dalam suatu sistem. Dalam suatu sistem korosi, termodinamika dapat dipakai untuk mengetahui apakah logam dapat bereaksi secara spontan dengan lingkungannya. Dan apabila logam tersebut bereaksi, maka dapat diketahui bagaimana reaksi yang terjadi, kemana arah reaksi tersebut serta berapa besar gaya dorongnya. Korosi yang terjadi pada logam ataupun paduannya hampir seluruhnya merupakan reaksi elektrokimia yang berlangsung pada permukaan logam. Salah satu dari reaksi yang terjadi menghasilkan perubahan dari suatu logam ataupun salah satu unsur yang ada dari keadaan *metallic* menjadi ke keadaan *non metallic*. Diagram yang dapat menunjukkan suatu reaksi korosi dapat terjadi secara termodinamika adalah diagram kesetimbangan E-pH atau biasa dikenal dengan *pourbaix diagram*. Diagram ini disusun berdasarkan kesetimbangan termodinamika antara logam dengan air dan dapat menunjukkan kestabilan dari beberapa fasa secara termodinamika. Diagram ini sangat berguna untuk memprediksi suatu reaksi korosi secara termodinamika tetapi tidak dapat menyajikan informasi untuk laju korosi.

### 2.6.2. Kinetika Korosi

Untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas mengenai sistem korosi, seperti besarnya laju korosi, diperlukan pengetahuan mengenai kinetika dari reaksi korosi. Kinetika korosi adalah suatu yang berhubungan langsung dengan laju korosi, yaitu kecepatan proses korosi dari suatu material. Dalam mempelajari hal ini perlu dipahami mengenai pengertian yang berhubungan dengan kinetika korosi seperti anoda, katoda, polarisasi dan *overpotential*. Anoda merupakan tempat terjadinya oksidasi katoda merupakan tempat terjadinya reduksi. Bila elektroda dihubungkan maka akan terjadi proses oksidasi dan reduksi pada permukaan elektroda sehingga potensial elektroda tidak berada pada potensial kesetimbangannya. Penyimpangan potensial ini disebut dengan polarisasi.



Gambar 2.18 Diagram kesetimbangan E-pH untuk besi dan baja [31]



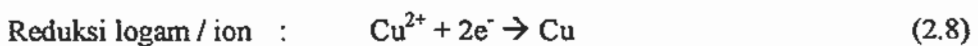
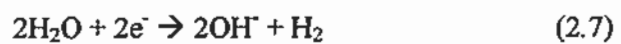
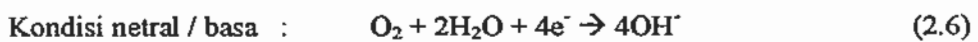
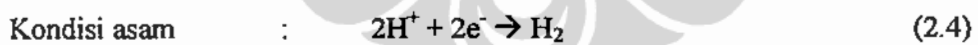
Gambar 2.19 Diagram Polarisasi Logam (Diagram Evans) [31]

Secara teori reaksi pelarutan logam pada suatu larutan bisa disebut sebagai reaksi bolak balik (reversible), dengan notasi reaksi sebagai berikut :



Secara umum reaksi-reaksi korosi dapat dituliskan sebagai berikut:

(1). Pada daerah katoda dapat terjadi reaksi-reaksi reduksi :





### 2.6.3. Polarisasi

Ketika suatu logam tidak berada dalam kesetimbangan dengan larutan yang mengandung ion-ionnya, potensial elektrodanya berbeda dengan potensial korosi bebas dan selisih antara keduanya disebut polarisasi. Besar polarisasi dinyatakan dengan satuan *overvoltage* ( $\eta$ ) yang menyatakan besarnya polarisasi terhadap potensial equilibrium elektroda. Polarisasi aktivasi adalah reaksi elektrokimia yang dikendalikan oleh salah satu tahap siklus reaksi elektrokimia yang terjadi pada antarmuka logam dan elektrolit. Pada tahap ini dibutuhkan energi aktivasi untuk menghadapi energi barrier yang menghambat kelangsungan proses. Polarisasi konsentrasi adalah reaksi elektrokimia yang dikendalikan oleh proses difusi ion dalam elektrolit. Polarisasi ini dapat diilustrasikan dengan proses difusi ion hidrogen ke permukaan logam membentuk gas hidrogen berdasarkan reaksi evolusi hidrogen. Dalam hal ini, konsentrasi ion hidrogen rendah dalam elektrolit, dan laju reduksi ion hidrogen dipermukaan logam dikendalikan oleh difusi hidrogen ke permukaan logam tersebut. Pada polarisasi konsentrasi, sejumlah perubahan dalam sistem yang meningkatkan laju difusi ion dalam elektrolit akan mengurangi pengaruh polarisasi konsentrasi dan peningkatan laju reaksi. Adukan pada elektrolit akan mengurangi gradien konsentrasi ion positif dan meningkatkan laju reaksi.

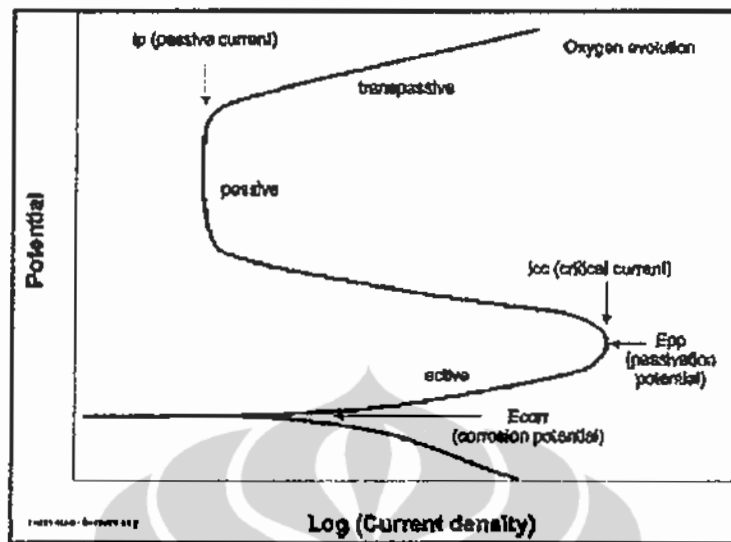
### 2.6.4. Passivasi

Passivasi logam adalah rintangan korosi akibat pembentukan produk korosi sebagai lapisan protektif yang menghambat kelangsungan reaksi. Dengan definisi lain bahwa pasivasi logam merupakan peristiwa kehilangan reaktivitas reaksi logam akibat keberadaan kondisi lingkungan tertentu. Sejumlah logam dan paduan teknik menjadi pasif dan bahkan sangat tahan korosi dalam lingkungan oksidator sedang sampai kuat. Contoh logam yang memiliki sifat pasivasi adalah Baja Tahan Karat (Stainless Steel), Nikel dan sejumlah paduan Nikel, Titanium dan paduannya, Aluminium dan paduannya.

Ada dua teori berkaitan dengan lapisan pasif, yakni teori lapisan oksida dan teori adsorpsi. Menurut teori lapisan oksida, lapisan pasif adalah lapisan barrier difusi

pada produk korosi yang memisahkan logam dengan lingkungan sehingga reaksi terhambat atau berhenti. Menurut teori adsorpsi, lapisan pasif logam pasif yang dilapisi oleh lapisan *chemisorbed* oksigen. Keberadaan lapisan ini dimaksudkan untuk mengadsorpsi molekul  $H_2O$  sehingga menghambat pelarutan di anoda. Dua teori tersebut menjabarkan maksud yang hampir sama bahwa lapisan protektif yang terbentuk pada permukaan logam menciptakan kondisi pasif dan terjadi peningkatan ketahanan korosi logam.

Pasivasi logam yang dinyatakan dalam laju korosi diilustrasikan dengan kurva polarisasi pada Gambar 2.20. Kurva polarisasi menunjukkan hubungan antara potensial logam dengan rapat arus. Perilaku pasivasi logam M dinyatakan sebagai rapat arus. Pada titik A, logam dalam kondisi potensial equilibrium dan rapat arus  $i_0$ . Ketika potensial logam menjadi lebih positif, logam berperilaku sebagai logam aktif, rapat arus  $i_c$  dan laju reaksi meningkat secara eksponensial. Ketika potensial logam lebih positif sampai mencapai  $E_{pp}$  dan rapat arus  $i_{passif}$  laju korosi menurun drastis. Pada potensial  $E_{pp}$ , terbentuk lapisan protektif pada permukaan logam dan menurunkan reaktifitas logam. Jika potensial logam makin positif, rapat arus masih tetap  $i_{passif}$  sampai batas daerah pasif. Peningkatan potensial lebih lanjut melampaui daerah pasif menyebabkan logam menjadi aktif kembali dan rapat arus meningkat dalam daerah transpasif.



Gambar 2.20 Bagan kurva polarisasi menunjukkan hubungan antara potensial logam dengan rapat arus [31]

### 2.6.5. Hubungan Laju Korosi dan Polarisasi

Perbedaan potensial antara katoda dan anoda sangat penting untuk menggambarkan terjadinya korosi. Tetapi hal ini belum dapat menggambarkan laju korosi sebenarnya. Laju korosi yang terjadi juga dinyatakan tergantung pada kerapatan arus yang timbul (*current density*). Semakin tinggi kerapatan arus yang timbul maka korosi semakin hebat begitupun juga sebaliknya. Karena fenomena tersebut korosi dapat disimpulkan dengan pemakaian kurva tegangan fungsi arus yang selanjutnya disebut kurva polarisasi. Laju korosi dalam kurva polarisasi dinyatakan dengan adanya  $E_{corr}$  dan  $I_{corr}$ .  $E_{corr}$  dan  $I_{corr}$  tidak bisa langsung didapatkan dalam kurva polarisasi, tetapi dimodelkan dengan adanya *Tafel Equation* dan *Buttler – Volmer Equation*.

$$\text{Tafel Equation : } I = I_0 \exp ( 2.303 ( E - E^{\circ} / b ) ) \quad (2.10)$$

Dimana  $I$  adalah arus yang terjadi akibat adanya reaksi;  $I_0$  adalah *Exchange Current*;  $E$  merupakan potensial elektroda;  $E^{\circ}$  adalah *Equilibrium potensial*; dan  $b$  adalah *Beta Tafel Constant*.

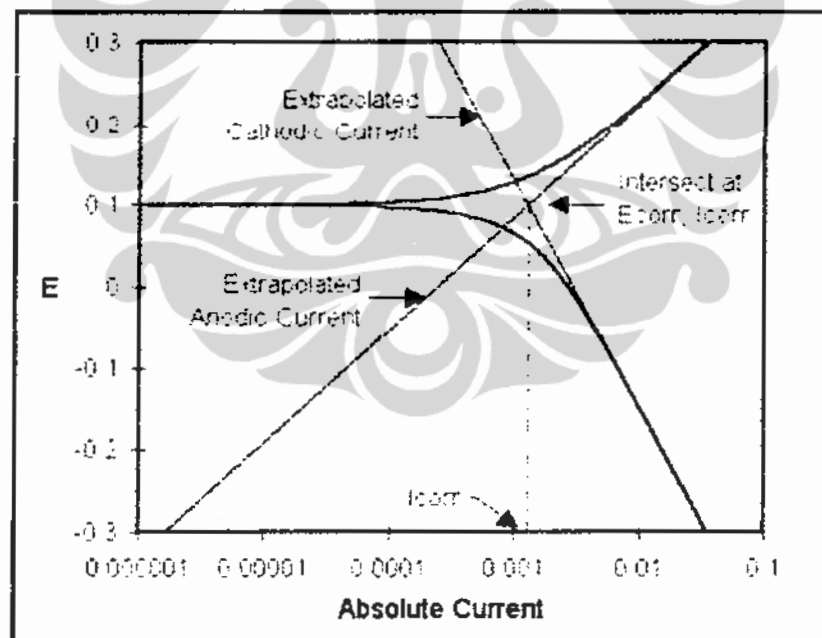
*Tafel Equation* hanya berlaku untuk satu reaksi. Dalam proses korosi terjadi dua reaksi yaitu reaksi katodik dan anodik. Perumusan *Tafel Equation* dalam reaksi katodik dan anodik dikenal dengan :

*Butler – Volmer equation* :

$$I = I_{\text{corr}} (\exp(2.303(E - E_{\text{corr}})/b_a) \exp(-2.303(E - E_{\text{corr}})/b_c)) \quad (2.11)$$

Dimana  $I$  adalah arus terukur (amps);  $I_{\text{corr}}$  adalah Corrosion current (am);  $E$  adalah Electrode potensial (volts);  $E_{\text{corr}}$  adalah Corrosion potensial (volts);  $b_a$  adalah Anodic Beta Tafel Constant; dan  $b_c$  adalah Cathodic Beta tafel constant

Pemodelan tersebut didekati dengan adanya *Tafel Analysis* yaitu ekstrapolasi garis lurus pada daerah katodik dan anodik sehingga bertemu pada satu titik. Titik ini menyatakan  $E_{\text{corr}}$  dan  $I_{\text{corr}}$  (Gambar 2.21)



Gambar 2.21. Classic Tafel Analisis

Perhitungan laju korosi dari  $I_{\text{corr}}$  dalam kurva polarisasi dihitung dengan cara:

$$CR = K_1 \frac{I_{corr} EW}{\rho} \quad (2.12)$$

Dimana CR adalah Laju Korosi (mm/yr) untuk  $i_{corr}$  ( $\mu A/Cm^2$ );  $K_1 = 3.27 \times 10^{-3}$  mm g/ $\mu A$  Cm;  $I_{corr}$  adalah rapat arus saat Ecorr (*exchange current density*); P = density ( $g/cm^3$ ); dan EW = Equivalent Weight.

#### 2.6.6. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Korosi

Fenomena korosi dipengaruhi oleh banyak faktor, yang dapat diklasifikasikan menjadi 4 kategori. Korosi disebabkan oleh adanya beberapa faktor secara simultan sebagai suatu hasil reaksi antara logam dan paduannya dengan lingkungan yang korosi. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi laju korosi ditunjukkan oleh tabel 2.3 dibawah. Salah satu faktor yang mempengaruhi laju korosi adalah struktur mikro. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa korosi dipengaruhi oleh termodinamika dan kinetika korosi. Sesuai dengan persamaan 2.4 dibawah ini.

$$\Delta G = -nF\Delta E \quad (2.13)$$

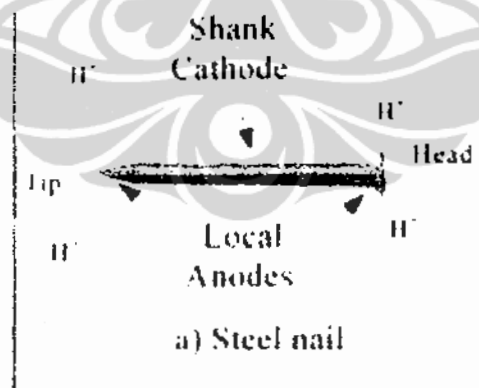
Potensial yang lebih besar adalah berada pada batas butir ( $E_e$  (batas butir) >  $E_e$  (butir)), oleh karena itu material yang memiliki ukuran butir lebih halus cenderung memiliki laju korosi yang lebih besar dibandingkan material dengan butir yang kasar.

Tabel 2.2. Faktor-Faktor yang mempengaruhi korosi [32]

Faktor Lingkungan	Faktor Metalurgis	Faktor Kondisi Pengerjaan	Faktor Ketergantungan Waktu
Konsentrasi Reaktif Kadar Oksigen pH lingkungan Temperatur Tekanan	Komposisi paduan Proses persinapan Pengotor Perlakuan Panas Paduan Perlakuan Mekanik	Kedaaan Permukaan Bentuk benda Pengerjaan Mekanik Penambahan Inhibitor Cara Perakitan	<i>Aging</i> Kekuatan Tarik Temperatur Modifikasi lapisan pelindung

### 2.6.7. Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Korosi

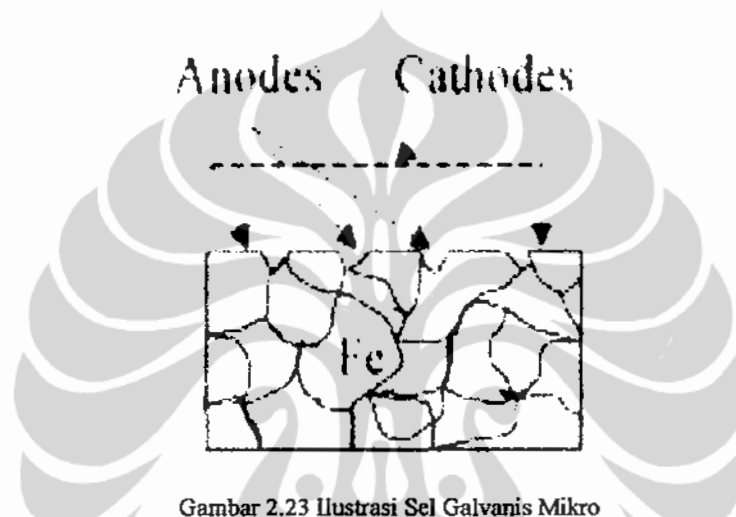
Logam yang terdeformasi secara mekanis dapat mengalami korosi galvanis yang diakibatkan adanya perbedaan distorsi dan kerapatan dislokasi di dalam atom. Secara umum dislokasi dapat diartikan sebagai cacat kristal. Gambar 2.20 dibawah ini menunjukkan contoh dari korosi galvanis yang dialami oleh paku.



Gambar 2.22 Contoh kasus sel galvanis yang disebabkan deformasi mekanis

Bagian ujung paku bertindak sebagai anoda dimana reaksi oksidasi terjadi. Daerah ini menjadi anodik dikarenakan memiliki nilai tegangan yang lebih tinggi.

Kasus ini merupakan contoh dari material yang mengalami pengerasan regangan yang menyebabkan material ini rentan terhadap korosi galvanik. Proses perlakuan panas atau *heat treatment* juga dapat menyebabkan ketidakseragaman mikrostruktur dalam suatu material. Dalam struktur suatu material korosi galvanis juga dapat terjadi antara butir dan batas butir. Gambar 2.21 menunjukkan fenomena korosi galvanis di dalam struktur mikro.



Gambar 2.23 Ilustrasi Sel Galvanis Mikro

Korosi galvanis dapat terjadi pada paduan polikristalin, contohnya baja perlitik. Perbedaan struktur mikro dapat menyebabkan sel galvanis mikro. Pada fasa perlit misalnya, sel galvanis dapat terjadi antara ferit dan cementit karena masing-masing fasa memiliki energi bebas dan potensial yang berbeda. Perbedaan inilah yang menyebabkan terbentuknya anoda dan katoda yang dapat mengakibatkan korosi.

## 2.7. Pengaruh Hidrogen Pada Material [33]

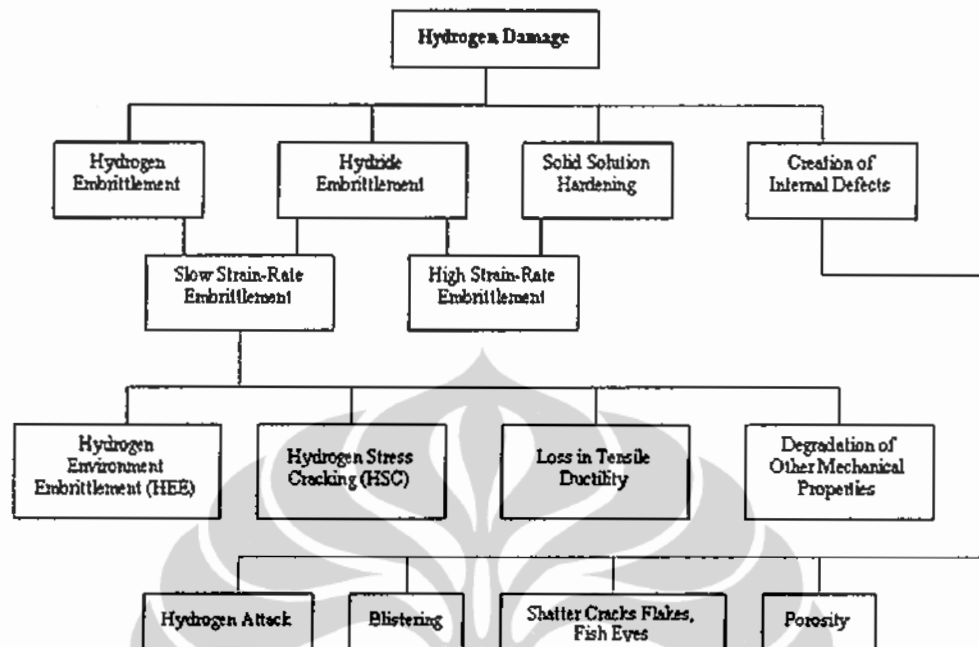
Hidrogen mengakibatkan beragam efek negatif pada logam. Induksi hidrogen pada logam yang terekspos ke lingkungan kaya hidrogen mengakibatkan degradasi pada logam dan menurunkan *performance* mekanikalnya. Kerusakan yang ditimbulkan dapat meliputi penurunan ketangguhan, keuletan, kekuatan tarik dan terutama sifat mekanik logam. Kerusakan dan levelnya tergantung pada beberapa faktor yang meliputi:

- a. Sumber hidrogen, eksternal (misalnya gas) ataupun internal (hidrogen terlarut).
- b. Waktu paparan.
- c. Tekanan dan temperature.
- d. Adanya pelarut atau larutan yang dapat bereaksi dengan logam (misalnya larutan asam).
- e. Bentuk logam atau paduan itu sendiri dan metoda produksinya.
- f. Banyaknya diskontinuitas di dalam logam.
- g. Bentuk oksida permukaan yang terekspos (lapisan pelindung).
- h. Treatmen akhir permukaan logam
- i. Metoda perlakuan panas
- j. Level tegangan sisa dan tegangan yang diaplikasi

Secara umum model kerusakannya meliputi:

- Penggetasan Hidrogen (*Hydrogen Embrittlement*)
- Penyerangan Hidrogen (*Hydrogen Attack*)
- *Sulfide Stress Cracking (SCC)*
- *Hydrogen Induced Cracking (HIC) – Stepwise Cracking*
- Pelepuhan Hidrogen (*Hydrogen Blistering*)
- *Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking (SOHIC)*





Gambar 2.24 Jenis kerusakan akibat hidrogen [33]

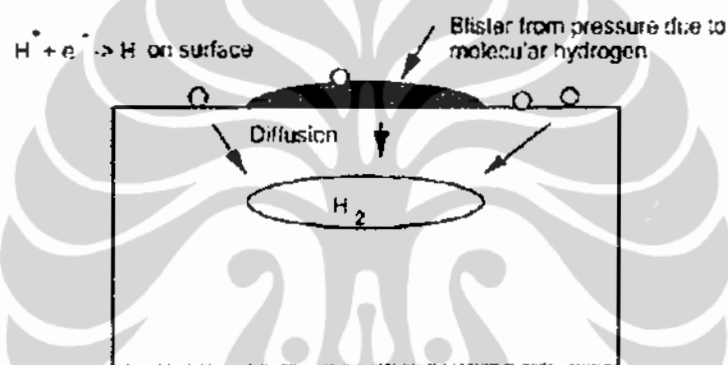
### 2.7.1. Cacat Dalam (*Creation of Internal Defect*)

Kerusakan yang terjadi pada bagian dalam logam ini biasanya disebabkan oleh gas hidrogen yang berkombinasi dengan tegangan sisa ataupun pembebanan yang mengakibatkan *time delay fracture* akibat proses-proses pengerjaan pada industri.

- a. *Blistering*, merupakan formasi atau gabungan molekul hidrogen pada bagian cacat dalam logam seperti batas butir, laminasi dan inklusi yang menyebabkan kerusakan akibat tekanan tinggi yang terbentuk dari kombinasi hidrogen didalam logam. Mekanisme *hydrogen blistering* dapat digambarkan secara skematik pada gambar berikut ini:



Gambar 2.25 Contoh kasus *Hydrogen Blistering* [8]



Gambar 2.26 Skema *Hydrogen Blistering* [33]

Pada skema diatas dapat dilihat suatu penampang yang terekspos larutan elektrolit pada bagian dalamnya dan pada bagian luar terekspos atmosfer. Masuknya hidrogen dari bagian dalam sebagai hasil dari proses proteksi katodik ataupun korosi menyebabkan ketersediaan hidrogen di permukaan logam. Difusi atom hidrogen ke dalam permukaan logam dan berekombinasi kembali membentuk molekul hidrogen menuju suatu void yang dapat menghasilkan tekanan yang sangat besar. Tekanan yang dihasilkan bisa mencapai ribuan atmosfer dan bisa menyebabkan kegagalan material

b. *Hydrogen Attack*

Material logam yang bertemu langsung dengan hidrogen pada kondisi temperatu dan tekanan yang tinggi akan mudah terserang oleh hidrogen. Difusi

atom hidrogen pada logam dan kemudian bereaksi dengan karbon yang berasal dari metana pada batas butir akan menghasilkan void pada bagian dalam logam. Tekanan metana pada logam ini akan menyebabkan kerusakan.

c. Porositas

Logam cair yang mengandung atom hidrogen dalam jumlah tertentu yang pada saat pembekuan hanya melepaskan sebagian saja akan membentuk void-void dalam material dan mengakibatkan porositas pada logam

### 2.7.2. Penggetasan Hidrogen (*Hydrogen Embrittlement, HE*)

Penggetasan hidrogen merupakan bentuk penurunan kualitas yang dapat dikaitkan dengan korosi, control korosi atau proses elektroplating. Reaksinya mencakup masuknya hidrogen ke dalam komponen, tahapan yang dapat menyebabkan penurunan keuletan dan kapasitas menahan beban yang kemudian mengakibatkan retakan dan kegagalan getas yang fatal pada aplikasi tegangan dibawah tegangan luluh material. Penggetasan hidrogen terjadi dengan beberapa cara namun yang paling umum adalah melalui aplikasi tegangan tarik dan kelarutan hidrogen di dalam material.

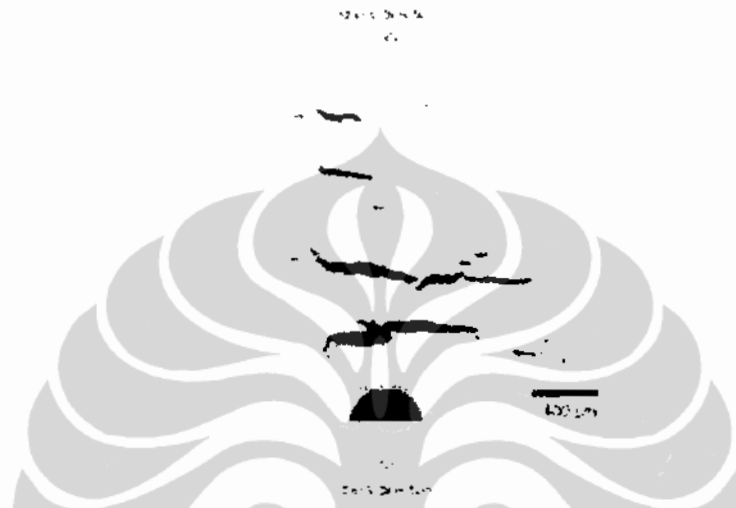
a. *Loss in Tensile Ductility and Other Mechanical Properties.*

Masuknya hidrogen ke dalam permukaan logam akan mengakibatkan penurunan sifat mekanik dan ketangguhannya. Hidrogen yang masuk ke dalam logam dapat berekombinasi kembali membentuk molekul hidrogen yang bertekanan tinggi. Akibatnya logam akan bersifat getas dan kehilangan keuletan serta menurunnya kekuatan tarik.

b. *Hydrogen Stress Cracking*

Atom hidrogen (H) yang berdifusi ke dalam logam dan berkombinasi menjadi molekul hidrogen (H<sub>2</sub>) akan menghasilkan tekanan yang tinggi. Tekanan ini akan menginisiasi fenomena pelepuhan (*blistering*). Dengan kombinasi adanya atom

hidrogen dan pemberian pembebanan atau adanya tegangan sisa akan mengakibatkan cacat *blistering* yang saling terhubung. Cacat ini akan berkembang seiring dengan pemberian tegangan sampai terjadi kerusakan pada logam.



Gambar 2.27 Pemberian tegangan pada suatu material [8]

c. *Hydrogen Environmental Embrittlement*

Terjadi keretakan pada logam di dalam larutan secara elektrokimia akibat kombinasi hidrogen secara absorpsi katodik. Penggeatanan akibat lingkungan hidrogen dapat berasal dari:

- Pada katoda akan terjadi reaksi evolusi hidrogen:



- Penggunaan proteksi katodik yang *overpotensial* pada pengendalian korosi

### 2.7.3. Fenomena Penggetasan Hidrogen

Ada beberapa mekanisme penggetasan hidrogen yang berbeda, sebagian spesifik pada material tertentu sementara yang lainnya secara umum terjadi akibat service atau aplikasi di lapangan. Secara keseluruhan faktor waktu (*time dependency*) harus diperhitungkan bersamaan dengan faktor-faktor transgranular dari suatu kegagalan dan faktor intergranular penyebab yang lainnya.

#### a. *Dislocation Locking*

Pada mekanisme ini atom hidrogen di dalam logam masuk ke dalam suatu dislokasi yang kemudian menghasilkan aliran plastis. Atom hidrogen dapat mengurangi tegangan dalam suatu dislokasi dengan masuk ke daerah *compressive*. Sehingga dislokasi di dalam logam membutuhkan tegangan yang lebih besar untuk berpindah dan perpindahannya itupun tidak akan terlalu jauh karena atom hidrogen yang lain akan kembali memasuki daerah dislokasi. Maka hidrogen dapat dianggap terperangkap dalam dislokasi (atau dislokasi terperangkap oleh adanya hidrogen). Imobilisasi dislokasi ini mengakibatkan getas tetapi menahan kegagalan transgranular.

#### b. *Precipitate Crack Nucleation*

Paduan baja dan aluminium mengandung precipitate. Precipitate ini menguatkan material atau digunakan untuk membersihkan senyawa tertentu dalam material, seperti misalnya MnS dalam baja menarik kelebihan sulfur dan menghambat mobilitas sulfur ke batas butir dan mencegah kegagalan. Pada interfasa antara precipitate dan matrik, hidrogen dapat berakumulasi yang kemudian dikombinasi dengan tegangan aplikasi dapat menginisiasi kegagalan. Penurunan kualitas dan penggetasan dalam material ini dimulai dari munculnya retak

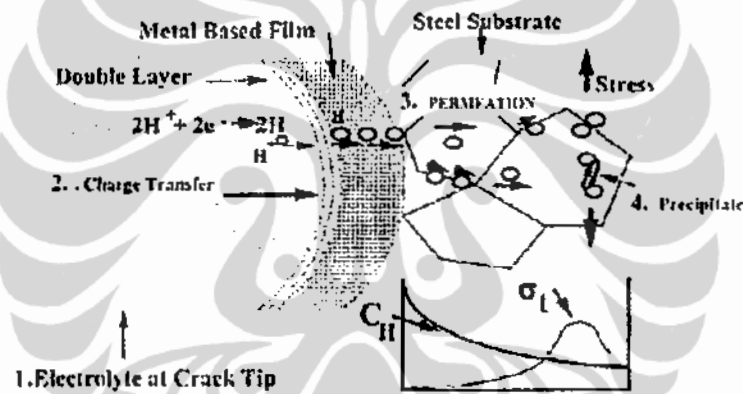
#### c. Pembentukan Hidrida.

Mekanisme ini terjadi saat kelarutan hidrogen rendah dalam logam. Saat batas kelarutan mencapai limit tertentu maka fasa metal hidrida mulai terbentuk. Sifat alami hidrida ini adalah getas dan oleh karenanya menginisiasi *brittle failure* dalam

logam. Titanium dan paduannya kerap mengalami reaksi ini pada kisaran konsentrasi hidrogen yang rendah.

#### d. Dekohesi Batas Butir

Mekanisme ini terjadi pada kegagalan di batas butir. Biasanya terjadi pada baja berkekuatan tinggi. Pada fenomena ini perangkap hidrogen (*hydrogen trapping site*) pada batas butir mengandung lebih banyak hidrogen dibanding matrik material. Sehingga ikatan yang terjadi pada batas butir adalah antara hidrogen dengan atom logam. Komponen yang lainnya, seperti fosfor dan sulfur, diduga tersegregasi ke batas butir. Bentuk ikatan yang lemah antara elemen-elemen ini dengan hidrogen mengakibatkan *low stress grain boundary failure*.



Gambar 2.28 Mekanisme Umum penggetasan Hidrogen [33]

#### 2.7.4. Mekanisme Migrasi Hidrogen kedalam Logam

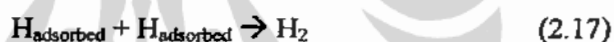
Semua material yang mendapat pembebanan akan berusaha mempertahankan kondisinya. Kemampuan material untuk mempertahankan bentuknya atau dideformasi plastis sampai patah disebut keuletan. Biasanya nilai keuletan suatu material dapat diukur melalui persentase regangannya pada saat patah. Material yang banyak berinteraksi dengan hidrogen akan mengalami penurunan keuletan, ketangguhan serta sifat mekaniknya.

Secara umum masuknya hidrogen pada permukaan logam dapat dibedakan menjadi tiga bagian berdasarkan sumbernya, yaitu Electrochemical Charging, Mekanisme Volmer- Heyrovsky, dan Mekanisme Transfer Ion Hidrogen.

a. *Electrochemical Charging* (Mekanisme Volmer – Tafel)

Saat larutan mengalami polarisasi katodik, hidrogen hidrat yang bermuatan positif ( $H_3O^+$ ) akan mengalami difusi atau bermigrasi ke arah katoda, sehingga akan terjadi reaksi reduksi yang menghasilkan atom hidrogen ( $H^+$ ). Atom hidrogen akan berekombinasi membentuk molekul hidrogen ( $H_2$ ) yang meninggalkan permukaan logam.

Pada mekanisme ini, seperti dijelaskan diatas, reaksi yang terjadi pertama kali adalah reaksi reduksi dari ion membentuk atom hidrogen yang akan masuk ke dalam logam dan kemudian berekombinasi dengan atom hidrogen lainnya membentuk molekul gas hidrogen. Reaksinya dapat dituliskan sebagai berikut:



Persamaan 2.14 disebut reaksi Volmer dan Persamaan 2.15 merupakan reaksi Tafel.

Konsentrasi atom hidrogen yang berada di permukaan logam sebanding dengan nilai derajat penyebarannya ( $\theta$ ). Dimana derajat penyebaran atom hidrogen akan sebanding dengan perubahan densitas arus pada reaksi Volmer-Tafel yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

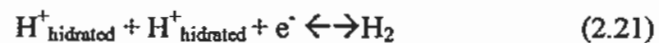
$$\theta = \theta_0 \sqrt{1 - i/i_0} \quad (2.18)$$

Dimana

$$i_1 = k_1[H] \exp\left(\frac{\alpha_1 F}{RT} \eta\right) - k_{-1}[H^+] \exp\left(-\frac{(1-\alpha_1)F}{RT} \eta\right) \quad (2.19)$$

### b. Mekanisme Volmer-Heyrovsky

Mekanisme Volmer-Heyrovsky menjelaskan mengenai reduksi elektrokimia yang disertai dengan reaksi rekombinasi. Reaksinya dijelaskan melalui persamaan berikut:



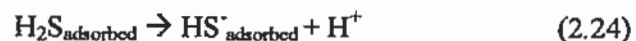
Persamaan (2.19) diatas disebut reaksi Heyrovsky. Reaksi Heyrovsky merupakan reaksi yang terdiri dari reduksi kation hydrogen hidrated dengan atom hydrogen yang terdapat pada permukaan logam untuk membentuk molekul gas hydrogen.

### c. Mekanisme Transfer Ion Hidrogen

Mekanisme ini menjelaskan hydrogen yang masuk ke dalam kisi (*lattice*) logam berasal dari ion hydrogen. Konsentrasi hydrogen yang masuk ke dalam sub surface sebanding dengan konsentrasi ion  $H^+$  yang masuk melalui interface. Mekanismenya adalah sebagai berikut



Atom hydrogen dapat juga berasal dari disosiasi air atau dari senyawa lain seperti  $H_3As$ ,  $H_3P$ ,  $HSCN$ ,  $HF$  dan lain-lain. Khusus untuk ion  $HS^-$ , ion ini akan bertindak sebagai katalis bagi reaksi difusi hydrogen untuk masuk ke dalam *lattice* logam dan dapat mencegah terjadinya rekombinasi hydrogen di permukaan logam.



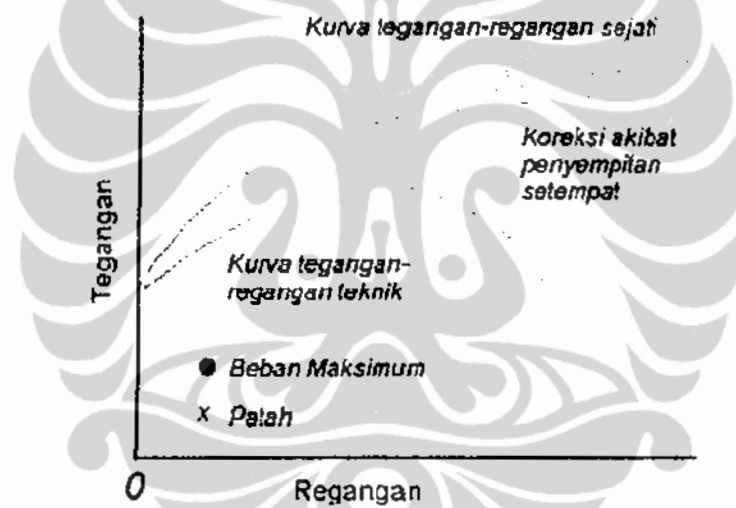
## 2.8. Uji Tarik [43]

Uji tarik rekayasa sering dipergunakan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu bahan dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi bahan. Pada



uji tarik, benda uji tarik diberi beban gaya tarik sesumbu yang bertambah besar secara kontinyu. Diagram yang diperoleh dari uji tarik pada umumnya digambarkan sebagai diagram tegangan-regangan. Kurva tegangan-regangan memiliki dua macam kurva yaitu kurva tegangan-regangan rekayasa (tegangan teknik atau nominal) dan kurva tegangan-regangan sejati.

Kurva tegangan-regangan rekayasa berdasarkan pada dimensi benda uji semula, sedangkan kurva tegangan-regangan sejati berdasarkan pada luas penampang benda uji yang sebenarnya, maka akan diperoleh kurva tegangan-regangan yang naik terus sampai patah.



Gambar 2.29 Perbandingan antara kurva tegangan-regangan rekayasa dengan kurva tegangan-regangan sejati [43].

Kurva tegangan-regangan rekayasa (Gambar 2.27) diperoleh dari hasil pengukuran benda uji tarik. Tegangan yang diperlukan pada kurva diperoleh dengan cara membagi beban dengan luas awal penampang benda uji, persamaannya yaitu

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (2.25)$$

Dimana:  $S$  = Tegangan, psi (lb/in<sup>2</sup>) atau pascal (N/m<sup>2</sup>)

$P$  = Beban, kg atau kN

$A_0$  = Luas penampang awal, mm<sup>2</sup>

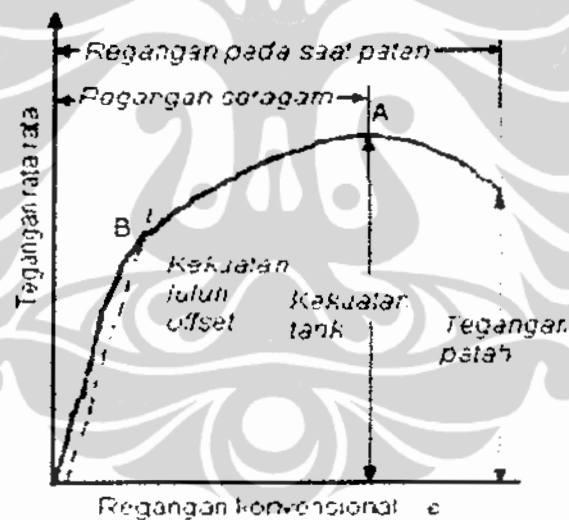
Regangan yang dipergunakan pada kurva diperoleh dengan cara membagi perpanjangan ukur benda uji dengan panjang awal, persamaannya yaitu

$$e_n = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.26)$$

Dimana:  $e_n$  = Regangan, %perpanjangan

$L$  = Panjang ukur benda uji setelah patah, mm

$L_0$  = Panjang awal benda uji, mm



Gambar 2.30 Kurva tegangan-regangan rekayasa [43]

Bentuk dan besaran pada kurva tegangan regangan suatu logam tergantung pada komposisi, perlakuan panas, deformasi plastis yang dialami, laju regangan, suhu dan keadaan tegangan yang menentukan selama pengujian. Parameter-parameter yang digunakan untuk menggambarkan kurva tegangan-regangan logam adalah sebagai berikut :

### 1. Kekuatan tarik (*Tensile strength*)

Kekuatan tarik maksimum (*Ultimate tensile strength*) adalah beban maksimum dibagi luas penampang awal benda uji, persamaannya adalah:

$$S_u = \frac{P_{maks}}{A_0} \quad (2.27)$$

Dimana:  $S_u$  = Tegangan maksimum, pascal atau psi

$P_{maks}$  = Beban maksimum, kg atau kN

### 2. Kekuatan luluh (*Yield strength*)

Kekuatan luluh adalah tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah kecil deformasi plastis yang ditetapkan. Untuk titik yang tidak jelas, kekuatan luluh sering disebut sebagai kekuatan luluh offset atau tegangan uji, yang ditentukan oleh tegangan yang berkaitan dengan perpotongan antara kurva tegangan-regangan dengan garis yang sejajar dengan elastis offset kurva oleh regangan tertentu (kekuatan luluh *offset*, pada gambar 2.28). Besarnya kekuatan luluh offset biasanya ditentukan sebagai regangan 0,2 atau 0,1 persen. Persamaannya adalah:

$$S_0 = \frac{P_{yield}}{A_0} \quad (2.28)$$

Dimana:  $S_0$  = Tegangan luluh, pascal atau psi

$P_{yield}$  = Beban pada titik luluh (*yield point*), kg atau KN

Pada gambar 2.28, titik A adalah batas elastis yang didefinisikan sebagai tegangan terbesar yang dapat ditahan oleh logam tanpa mengalami regangan permanen apabila beban diiadakan. Penentuan batas elastis tergantung dari kepekaan instrumen pengukur regangan, itulah sebabnya mengapa batas elastis itu sering diganti dengan batas utama (*batas proporsional*). *Batas proporsional* ialah tegangan dimana garis lengkung tegangan regangan menyimpang dari kelinierannya.

### 3. Perpanjangan (*elongation*)

Perpanjangan adalah regangan teknik pada saat patah,  $ef$ . Persamaannya adalah :

$$ef = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.29)$$

Dimana:  $ef$  = Regangan pada saat patah, %

$L_f$  = Panjang ukur benda uji setelah patah, mm

### 4. Pengurangan luas penampang (kontraksi)

Pengurangan luas penampang adalah besarnya penyusutan penampang benda uji pada patahan,  $q$ . Persamaannya adalah :

$$q = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (2.30)$$

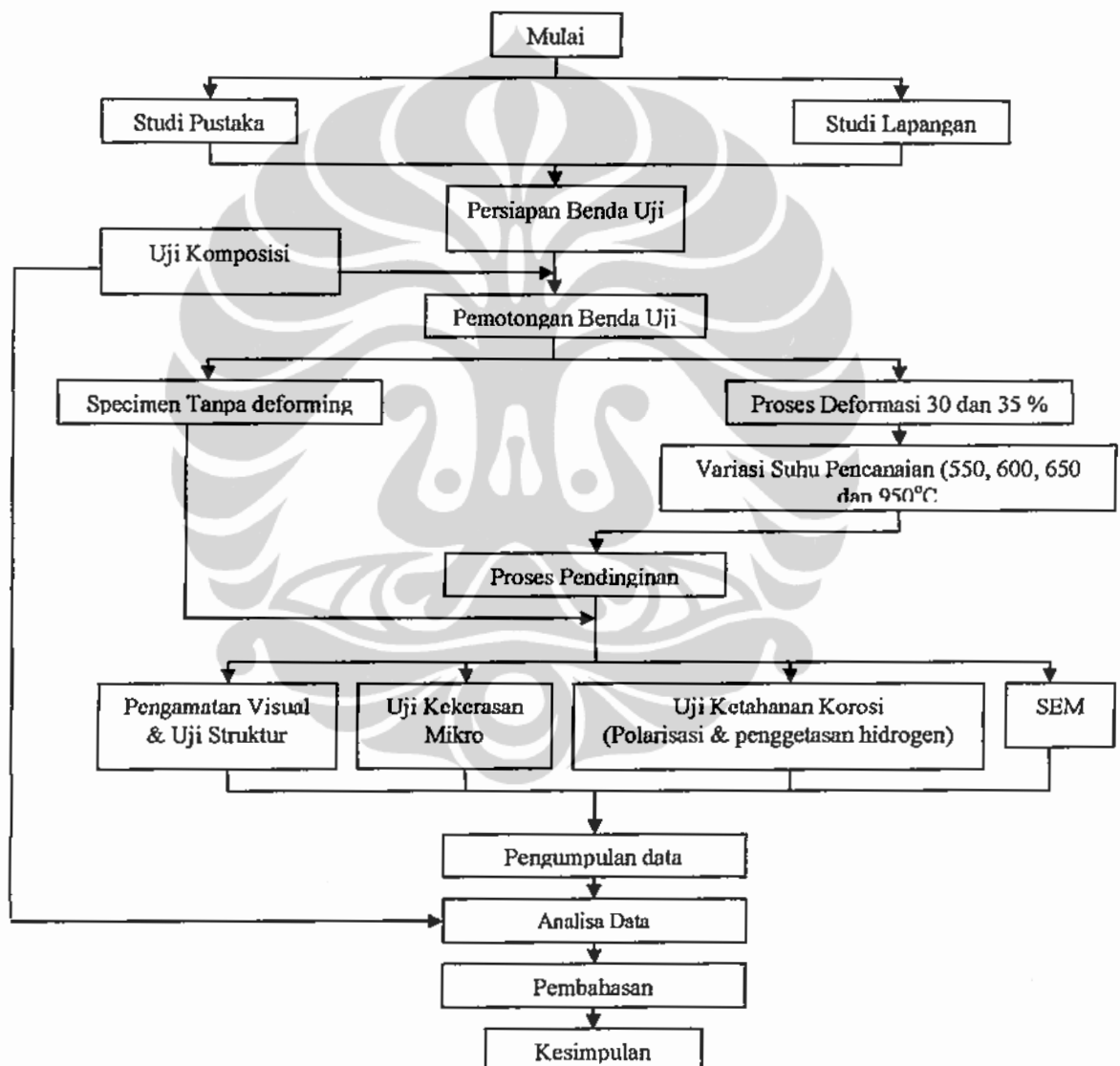
Dimana:  $q$  = Besarnya penyusutan penampang, %

$A_f$  = Luas benda uji setelah patah, mm<sup>2</sup>

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Prosedur Penelitian

Tahapan-tahapan prosedur yang dilakukan pada penelitian ini diuraikan pada diagram alir Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Semua pengujian dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia Depok.

### 3.2. Persiapan Bahan

#### 3.2.1. Alat

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Mesin Roll dengan kapasitas 20 ton
2. Mesin Pemanas / Oven Carbolite
3. Termokopel
4. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
5. Jangka Sorong
6. Mesin Amplas
7. Mesin Poles
8. Mikroskop Optik
9. Mesin *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)*
10. Mesin Pengujian Microhardness
11. Kamera digital

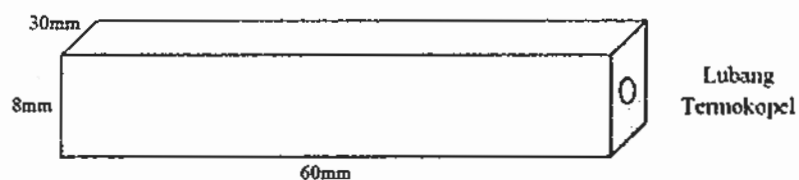
#### 3.2.2. Bahan

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini adalah *slab* baja karbon GR X42

### 3.3. Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Persiapan Benda Uji

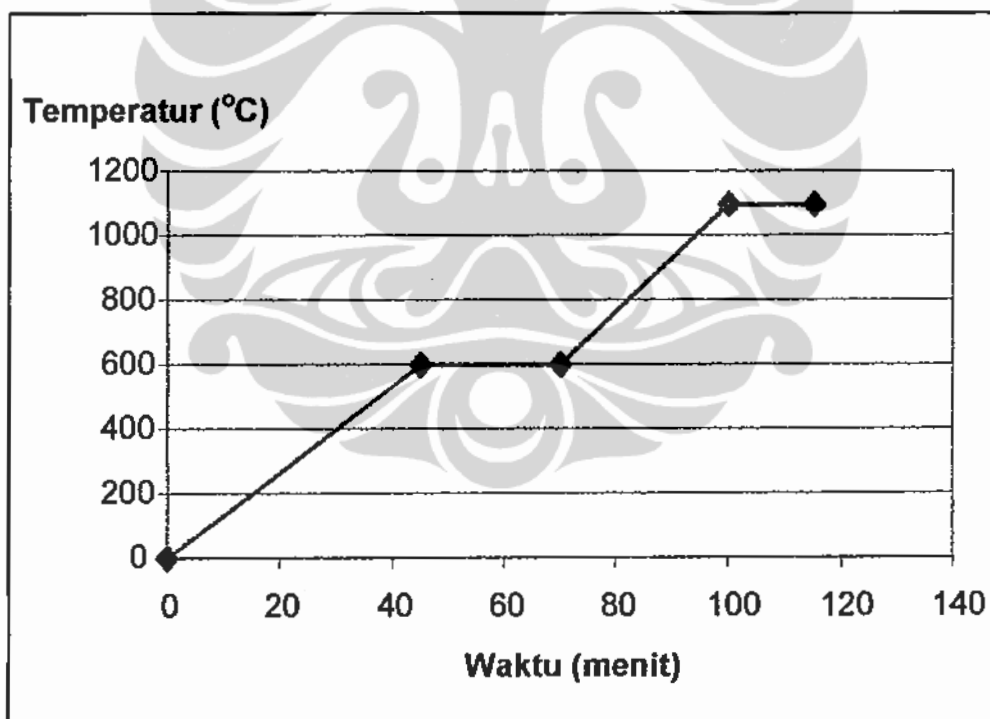
*Slab* baja karbon GR X42 dipotong berbentuk balok dengan ukuran 6 cm x 3 cm x 0,8 cm untuk dijadikan benda uji. Kemudian diberikan lubang untuk termokopel. Adapun kedalaman lubang adalah 10 mm dengan diameter sesuai diameter termokopel.



Gambar 3.2 Ilustrasi ukuran dan bentuk benda uji

### 3.3.2 Proses Termomekanikal, *Rolling* dan Pendinginan

Seluruh benda uji yang akan diukur disiapkan untuk berbagai tes, masing-masing dimasukkan ke dalam *furnace* atau dapur *Eurotherm* dengan siklus pemanasan yang dialami oleh benda uji adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3 Siklus pemanasan benda uji



Gambar 3.4 *Furnace* yang digunakan untuk proses pemanasan ulang



Gambar 3.5 Mesin *roll* yang digunakan untuk proses canai panas

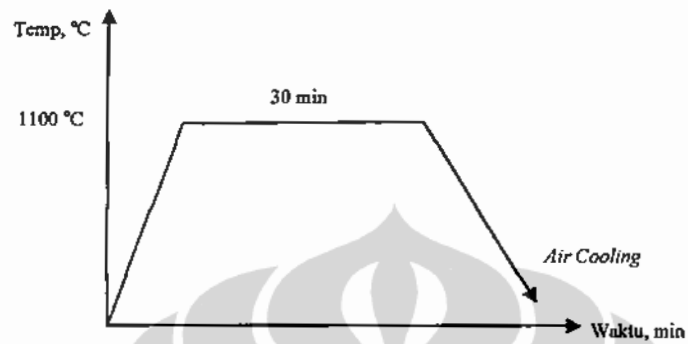
Penelitian ini dilakukan dengan beberapa variasi temperatur. Berikut rincian perlakuan panas yang diaplikasi pada masing-masing benda uji.

1. Benda uji A adalah baja karbon yang tidak mengalami perlakuan panas, yang diidentifikasi kekerasan, ketahanan korosi dan struktur mikronya sebagai acuan atau pembanding.

Universitas Indonesia

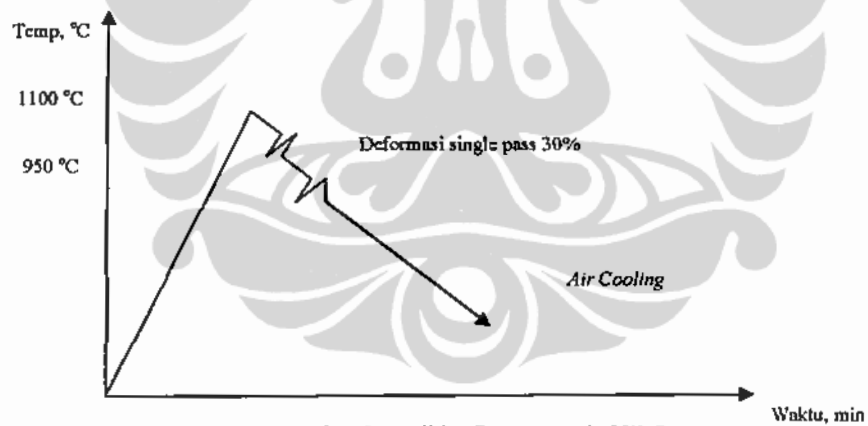


2. Benda uji B dipanaskan pada suhu  $1100^{\circ}\text{C}$  selama 30 menit, kemudian didinginkan.



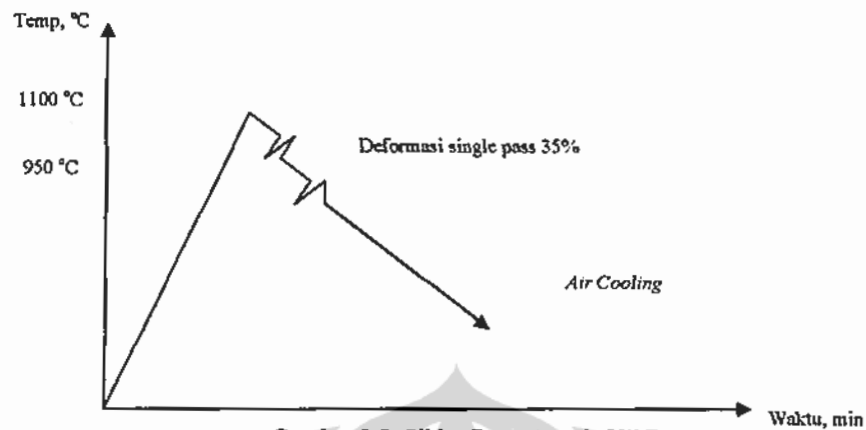
Gambar 3.6 Siklus Panas Benda Uji B

3. Benda uji C dipanaskan pada suhu  $1100^{\circ}\text{C}$  lalu segera di *rooling* ketika suhunya sekitar  $950^{\circ}\text{C}$  dengan deformasi hingga 0.3, kemudian didinginkan di udara.



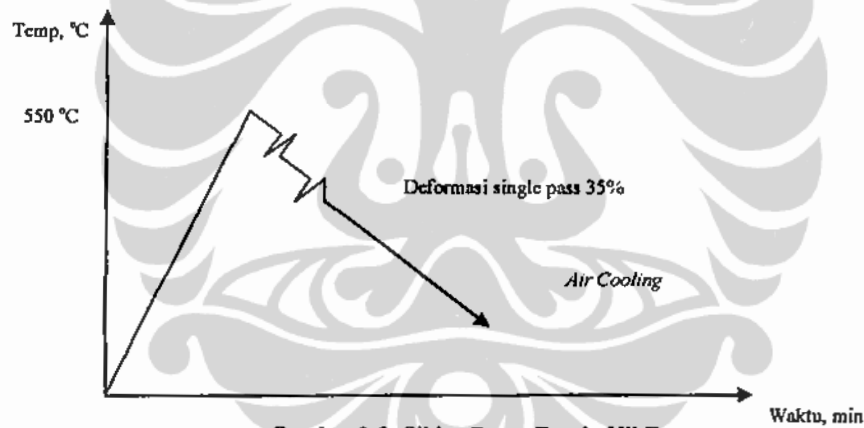
Gambar 3.7 Siklus Panas Benda Uji C

4. Benda uji D dipanaskan pada suhu  $1100^{\circ}\text{C}$  lalu segera di *rooling* ketika suhunya sekitar  $950^{\circ}\text{C}$  dengan deformasi hingga 0.35 ukuran awal, kemudian didinginkan.



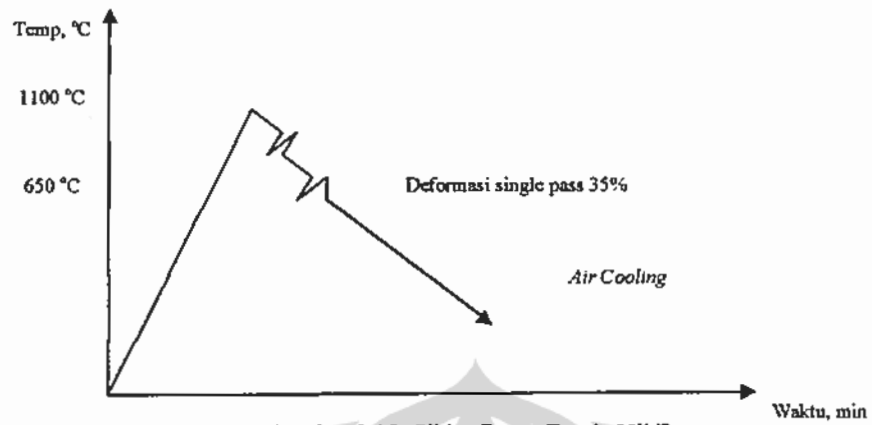
Gambar 3.8 Siklus Panas Benda Uji D

5. Benda uji E dipanaskan pada suhu  $550^{\circ}\text{C}$  lalu segera di *rolling* dengan deformasi hingga 0.35 ukuran awal, kemudian didinginkan.

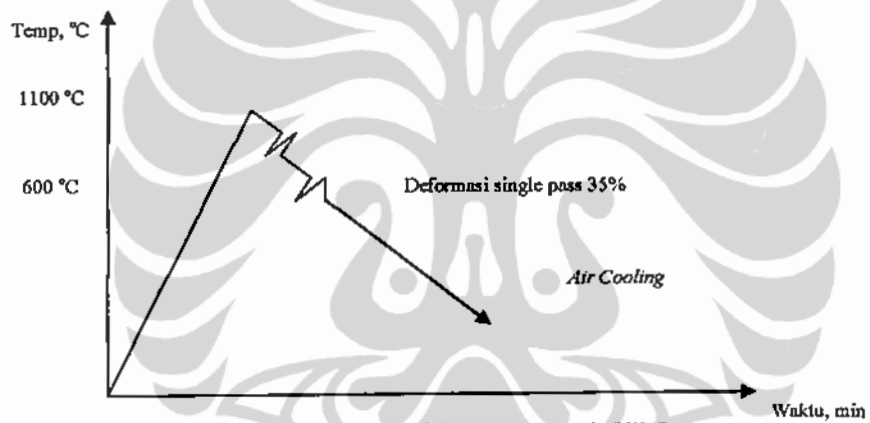


Gambar 3.9 Siklus Panas Benda Uji E

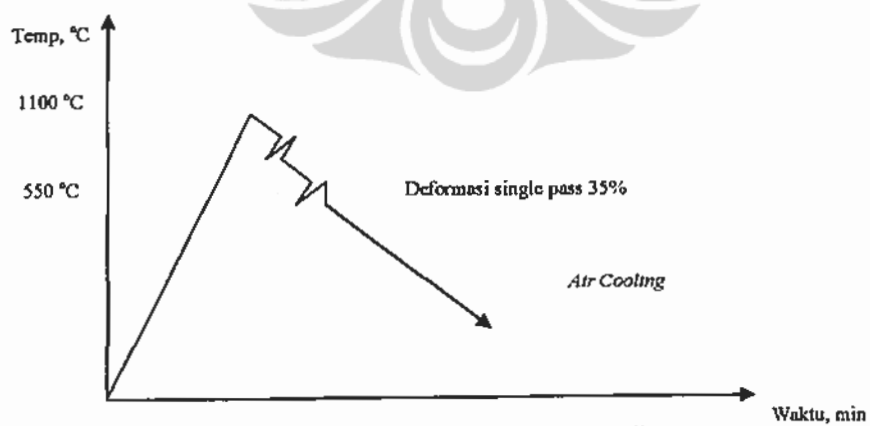
6. Untuk benda uji F, G dan H seluruhnya dipanaskan hingga suhu  $1100^{\circ}\text{C}$ , lalu masing-masing pada suhu  $550$ ,  $600$  dan  $650^{\circ}\text{C}$  dideformasi hingga 0.35 kali ukuran semula, setelah itu seluruhnya didinginkan di udara.



Gambar 3.10 Siklus Panas Benda Uji F



Gambar 3.11 Siklus Panas Benda Uji G



Gambar 3.12 Siklus Panas Benda Uji H

### 3.4. Pengamatan Metalografi

Untuk pengamatan mikrostrukturnya, benda uji terlebih dahulu di potong kemudian di mounting menggunakan resin dan *hardenener*. Setelah resin mengeras dimulailah proses pengamplasan. Proses pengamplasan dilakukan dari grit 120, 240, 480, 600, 800, 1000 dan 1500.

Setelah proses pengamplasan selesai benda uji dipoles dengan menggunakan kain beludru, air dan campuran titanium oksida serbuk, kemudian benda uji dietsa dengan Nital 2% untuk menghitung diameter butir.

### 3.5. Pengukuran Besar Butir

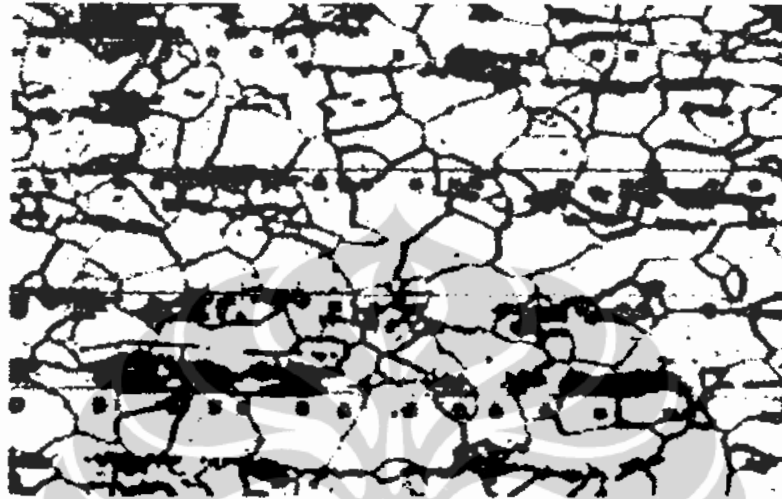
Pengukuran besar butir dilakukan dengan menggunakan metode garis intersept (*Intercept Method*). Metoda ini sangat cocok digunakan untuk menghitung besar butir non-equiaxial. Dengan membuat suatu garis lurus ( $L_r$ ) pada gambar struktur mikro dan menggunakan besaran tertentu sedemikian sehingga jumlah butir terpotong oleh suatu garis dapat dihitung dengan akurat. Panjang garis yang digunakan harus menghasilkan jumlah butir terpotong antara 50 – 150 butir oleh garis pada perbesaran yang dipilih.

Ketentuan perhitungan jumlah butir yang terpotong adalah: jika garis memotong penuh satu butir maka dihitung satu. Jika ujung garis tepat berakhir pada pertengahan butir, maka dihitung setengah. Pertemuan antara tiga butir dihitung satu setengah dan jika garis menyinggung batas butir, maka dihitung setengah. Kemudian hasil perhitungan jumlah butir terpotong digunakan dalam perhitungan dengan persamaan sebagai berikut:

$$L = V_v \times L_r / N_a \times M \quad (3.1)$$

- Dimana L : Besar butir rata-rata ( $\mu\text{m}$ )  
 $V_v$  : Fraksi volume fasa tertentu  
 $L_r$  : Panjang garis total ( $\mu\text{m}$ )  
 $N_a$  : Jumlah butir terpotong garis  
 $M$  : Perbesaran

Kemudian dari hasil perhitungan besar butir rata-rata diatas dikonversikan menjadi ukuran butir menurut standard ASTM E 112 mengenai *Grain Size Measurement*.



Gambar 3.13 Metoda pengukuran besar butir dengan menggunakan metode garis intersept.

### 3.6. Pengujian Korosi

#### 3.6.1. Pengukuran Laju Korosi dengan Metode Polarisasi

Pengujian ini menggunakan metode polarisasi yang mengacu pada ASTM G5. Tujuan dari pengujian ini adalah mendapatkan laju korosi dari sampel serta mengetahui daerah korosi yang terjadi dari kurva yang dihasilkan pada pengujian.

Tahapan pengujian korosi metode polarisasi antara lain :

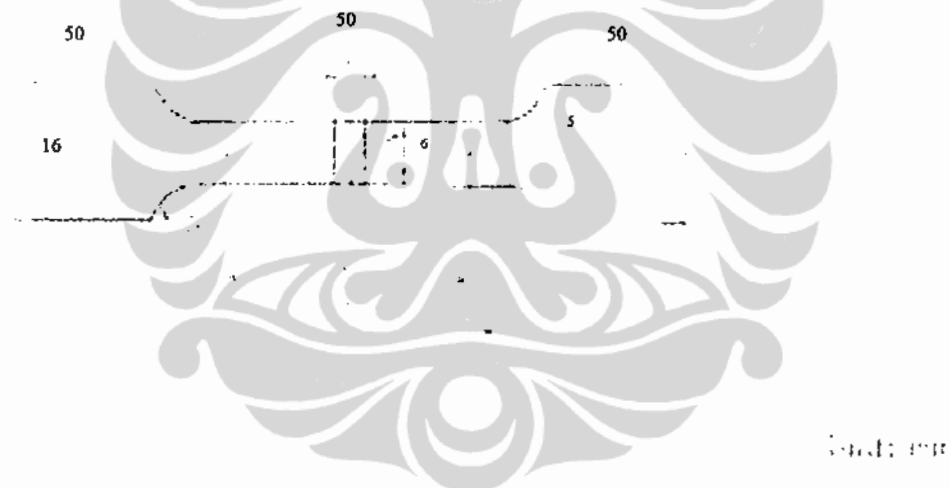
1. Benda uji dipotong menjadi bentuk lingkaran dengan diameter 1 cm.
2. Bagian tembaga pada kabel di solder ke benda uji menggunakan *tin solder*.
3. Benda uji tersebut di mounting menggunakan dengan resin dan *hardener*.  
Tunggu hingga mounting kering.
4. Permukaan benda uji di amplas hingga rata kemudian dibersihkan dengan alkohol.
5. Hitung luas permukaan benda uji aktual.

6. Buka software CMS 100, tunggu hingga potensial korosi stabil. Pilih metode tafel, atur setting pada komputer dengan input data luas permukaan, berat jenis dan sebagainya seperti yang tertera.
7. Tunggu hingga layar monitor menampilkan kurva polarisasi sehingga didapatkan laju korosinya.

### 3.6.2. Pengukuran Keuletan Baja Karbon GR X42 Terhadap Penggetasan Hidrogen

#### 3.6.2.1. Pembuatan Benda Uji untuk Uji Tarik

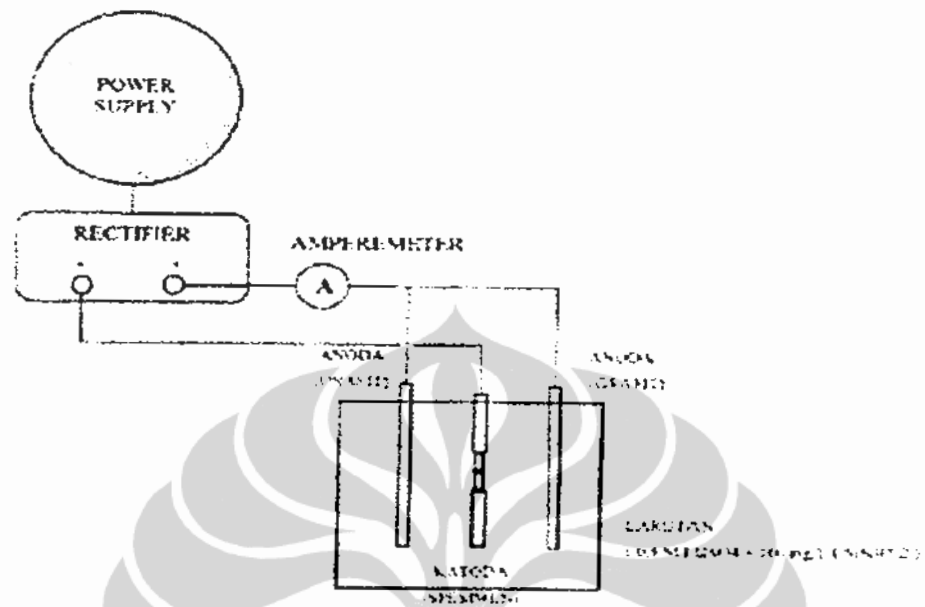
Pembuatan benda uji untuk pengujian tarik baja karbon GR X42 orisinil dan yang mengalami proses termo-mekanikal sesuai dengan standard ASTM A 370 dengan pemberian takikan sesuai standard ASTM F 519



Gambar 3.14 Benda uji untuk uji tarik setelah proses *hydrogen charging*.

#### 3.6.2.2. Hydrogen Charging

Hydrogen charging merupakan proses elektrokimia untuk memasukkan atom hidrogen kedalam permukaan logam dengan cara difusi. Proses *hydrogen charging* ini menggunakan larutan 1N  $H_2SO_4$  + 100 mg/L Thiourea  $CS(NH_2)_2$  dengan menggunakan rapat arus  $1mA/cm^2$  selama 10 menit. Sel elektrokimia ini terdiri dari grafit pada anoda, dan benda uji uji tarik ditempatkan pada katoda



Gambar 3.15 Rangkaian proses *hydrogen charging*.

### 3.6.2.3. Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan salah satu metoda karakterisasi untuk mengetahui sifat mekanik material. Pengujian ini menggunakan standard ASTM E-8M untuk mengetahui degradasi sifat mekanik material yang meliputi kekuatan tarik dan ketangguhannya akibat proses pemasukan hidrogen ke dalam logam. Benda uji uji tariknya menggunakan standard ASTM A370 dan F519 untuk kondisi takikan.



Gambar 3.17 Mesin uji tarik di Lab Teknik Metalurgi dan Material FTUI.

#### 3.6.2.4. Fraktografi

Fraktografi permukaan patahan dengan mikroskop dapat memberikan informasi penting mengenai jenis perpatahan. Fraktografi patahan hasil pengujian tarik dilihat dengan menggunakan foto makro untuk melihat permukaan secara makro dan Scanning Electron Microscope (SEM) untuk perbesaran yang lebih besar sehingga model patahan pada struktur butir dapat terlihat





Gambar 3.18 Scanning Electron Microscope di Lab Teknik Metalurgi dan Material FTUI



## BAB IV

### HASIL PENGUJIAN

#### 4.1. Data Karakterisasi Komposisi Kimia

Komposisi kimia benda uji ditentukan menggunakan Optical Emission Spectroscopy (OES). Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.1 dibawah:

Tabel 4.1. Komposisi Kimia Baja Karbon GR X42 (dalam % berat)

Baja Karbon GR X 42	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
	0,156	0,271	0,009	0,02	0,711	<0,005	0,019
	Mo	Ti	Cu	Nb	V	Al	Fe
	<0,005	0,002	0,343	<0,002	0,002	0,032	98,379

#### 4.2. Pengukuran Benda Uji Selama Proses Rolling

Perhitungan target tebal benda uji dengan persen deformasi yang diinginkan sebelumnya diperoleh melalui persamaan berikut:

$$\text{Deformasi} = \ln (H_0/H_f) \quad (4.1)$$

Dengan % deformasi adalah persentasi perubahan ketebalan benda uji;  $H_0$  adalah tebal awal benda uji (dengan satuan mm); dan  $H_f$  adalah tebal akhir benda uji (mm)

Seluruh ketebalan benda uji diukur sebelum dan sesudah proses canai dan rolling. Data ketebalan sampel dapat dilihat pada Tabel 4.2 dibawah.

Ketebalan benda uji yang akan dirolling sebelumnya diukur dengan jangka sorong kemudian tebal target deformasi dihitung menggunakan persamaan 4.1. Besar deformasi target adalah 0,3 dan 0,35.

Tabel 4.2. Hasil Pengukuran Ketebalan Benda Uji

No	Benda Uji	Deskripsi Benda Uji		Tebal Awal (mm)	Deformasi	Tebal Akhir (mm)
		T <sub>Reheat</sub> (°C)	T <sub>Akhir Roll</sub> (°C)			
1	A	-	-	8,00	-	8,00
2	B	1100	-	8,00	-	8,00
3	C	1100	950	7,95	0,3	6,45
4	D	1100	950	8,00	0,35	5,85
5	E	550	550	8,20	0,35	6,20
6	F	1100	550	8,10	0,35	6,30
7	G	1100	600	8,00	0,35	6,50
8	H	1100	650	8,00	0,35	6,30

### 4.3. Hasil Perhitungan Butir

Hasil pengukuran besar butir pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3. Hasil Pengukuran Diameter Butir

No	Benda Uji	Deskripsi Benda Uji		Deformasi	Grain Size (µm)	Grain Size Number
		T <sub>Reheat</sub> (°C)	T <sub>Akhir Roll</sub> (°C)			
1	A	-	-	-	40	6
2	B	1100	-	-	28,3	7
3	C	1100	950	0,30	28,3	7
4	D	1100	950	0,35	28,3	7
5	E	550	550	0,35	28,3	7
6	F	1100	550	0,35	56,5	5
7	G	1100	600	0,35	40	6
8	H	1100	650	0,35	28,3	7

#### 4.4. Hasil Pemeriksaan Kekerasan

Tabel 4.4. Hasil Kekerasan Vickers (Hv) Benda Uji

No	Benda Uji	Deskripsi Benda Uji	Kekerasan Vickers (Hv)	Kekerasan Rata-rata (Hv)
1	A	Bulk	211	209
			212	
			207	
			209	
			207	
2	B	0-1100°C	214	215
			206	
			200	
			201	
			185	
3	C	0-1100-950°C (Deformasi 0,3)	167	171
			170	
			172	
			169	
			180	
4	D	0-1100-950°C (Deformasi 0,35)	188	182
			182	
			185	
			183	
			170	
5	E	0-550°C (Deformasi 0,35)	282	241
			228	
			248	
			226	
			219	
6	F	0-1100-550°C (Deformasi 0,35)	232	211
			212	
			207	
			198	
			204	
7	G	0-1100-600°C (Deformasi 0,35)	223	212
			217	
			211	
			211	
			201	
8	H	0-1100-650°C (Deformasi 0,35)	177	191
			180	
			197	
			203	
			198	

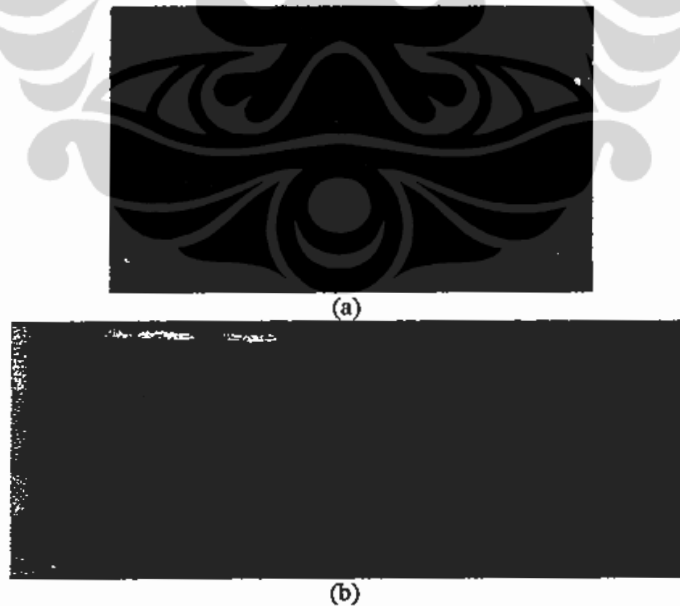
#### 4.5. Hasil pengukuran Laju Korosi

Tabel 4.5. Hasil Pengukuran Laju Korosi Benda Uji

No	Benda Uji	Deskripsi Benda Uji		Deformasi	Laju Korosi (mpy)
		T <sub>Reheat</sub> (°C)	T <sub>Akhir Roll</sub> (°C)		
1	A	-	-	-	8,574
2	B	1100	-	-	3,601
3	C	1100	950	0,30	4,411
4	D	1100	950	0,35	2,402
5	E	550	550	0,35	6,753
6	F	1100	550	0,35	5,470
7	G	1100	600	0,35	5,742
8	H	1100	650	0,35	6,153

#### 4.6. Hasil Pengamatan Metalografi

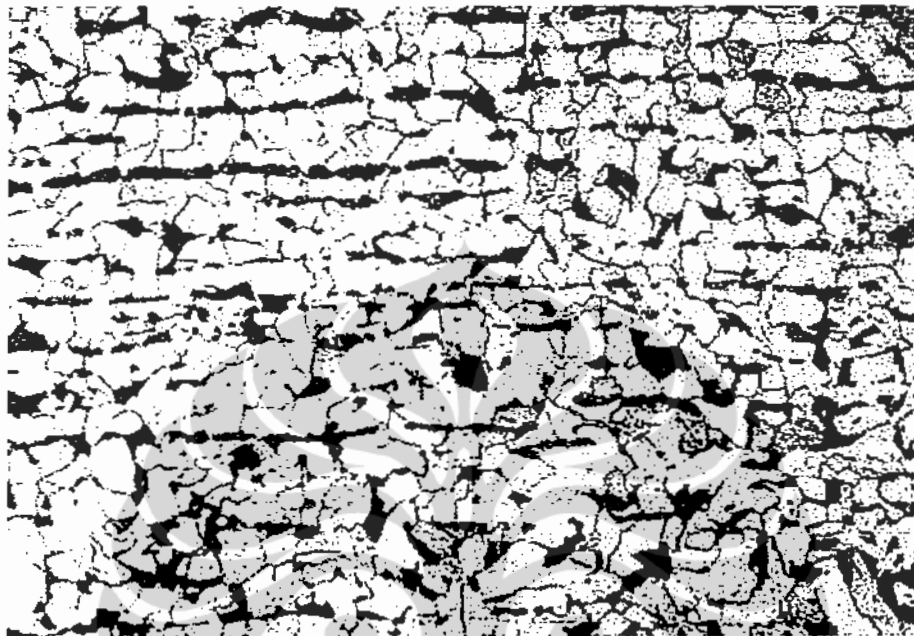
##### 4.6.1. Pengamatan Secara Makro



Gambar 4.1 Benda uji (Baja Karbon GR X42) yang digunakan (a) Sebelum di deformasi; (b) Sesudah di deformasi

#### 4.6.2. Pengamatan Secara Mikro

##### A. Benda Uji A (*Bulk Sample* – Baja Karbon GR X42)



(a)



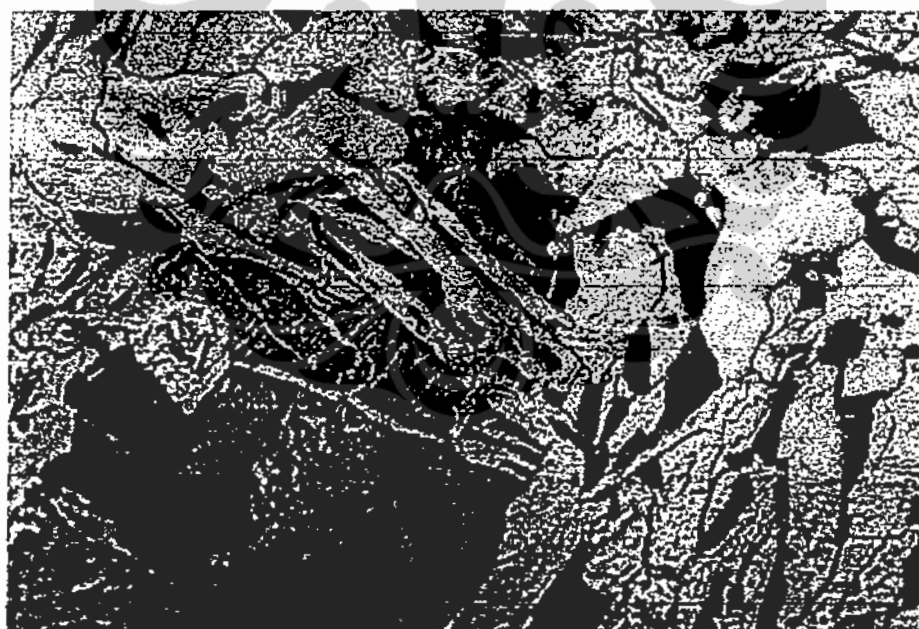
(b)

Gambar 4.2 Gambar struktur mikro Baja Karbon GR X42 sebelum dideformasi yang di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x; (b) Perbesaran 500x.

B. Benda Uji B (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan hingga 1100°C)



(a)



(b)

Gambar 4.3 Gambar struktur mikro Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan hingga 1100°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x; (b) Perbesaran 500x.

C. Benda Uji C (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 950 °C dengan deformasi 0,30)



(a)

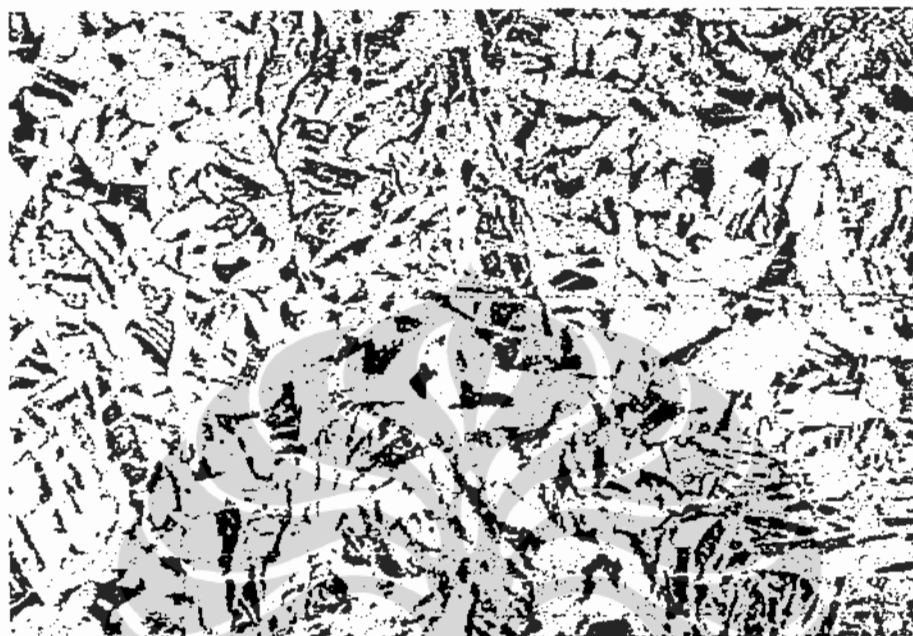


(b)

Gambar 4.4 Gambar struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,30 pada suhu 950°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x; (b) Perbesaran 500x.



D. Benda Uji D (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada  $1100^{\circ}\text{C}$  dan di *roll* pada  $950^{\circ}\text{C}$  dengan deformasi 0,35)



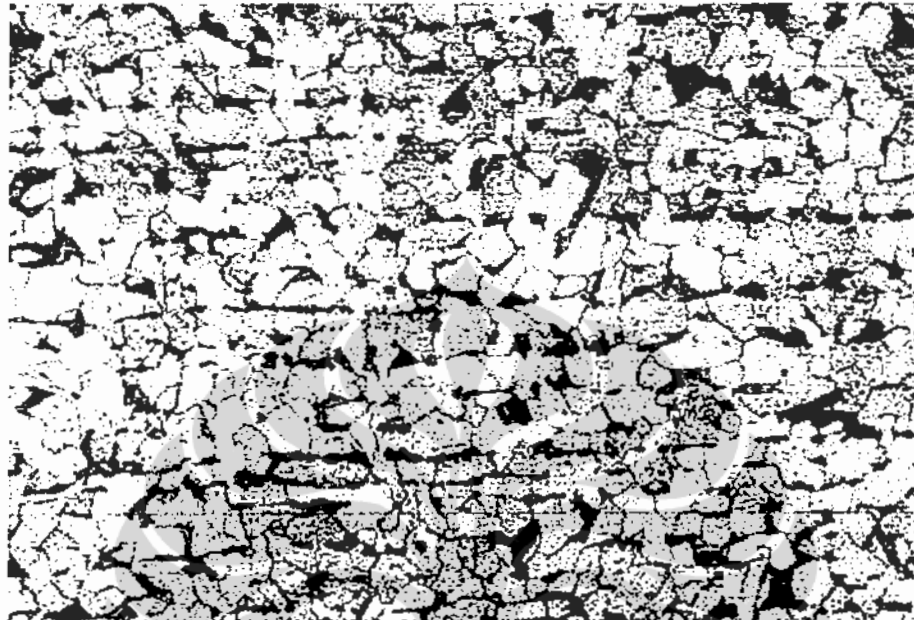
(a)



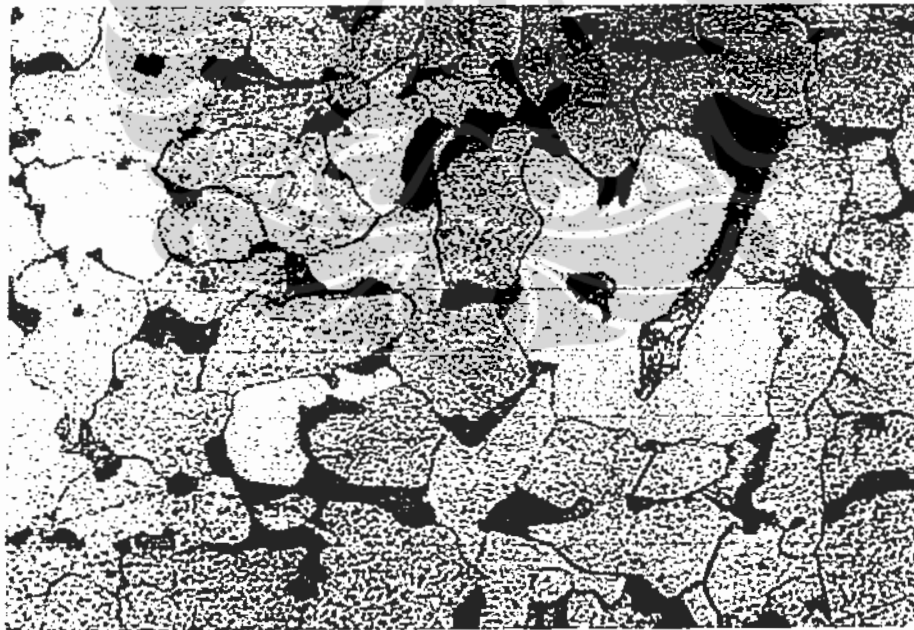
(b)

Gambar 4.5 Gambar struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada  $1100^{\circ}\text{C}$  kemudian dideformasi 0,35 pada suhu  $950^{\circ}\text{C}$  dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x; (b) Perbesaran 500x.

E. Benda Uji E (Baja Karbon Gr X42 yang dipanaskan hingga 550°C dan di-roll dengan deformasi 0,35)



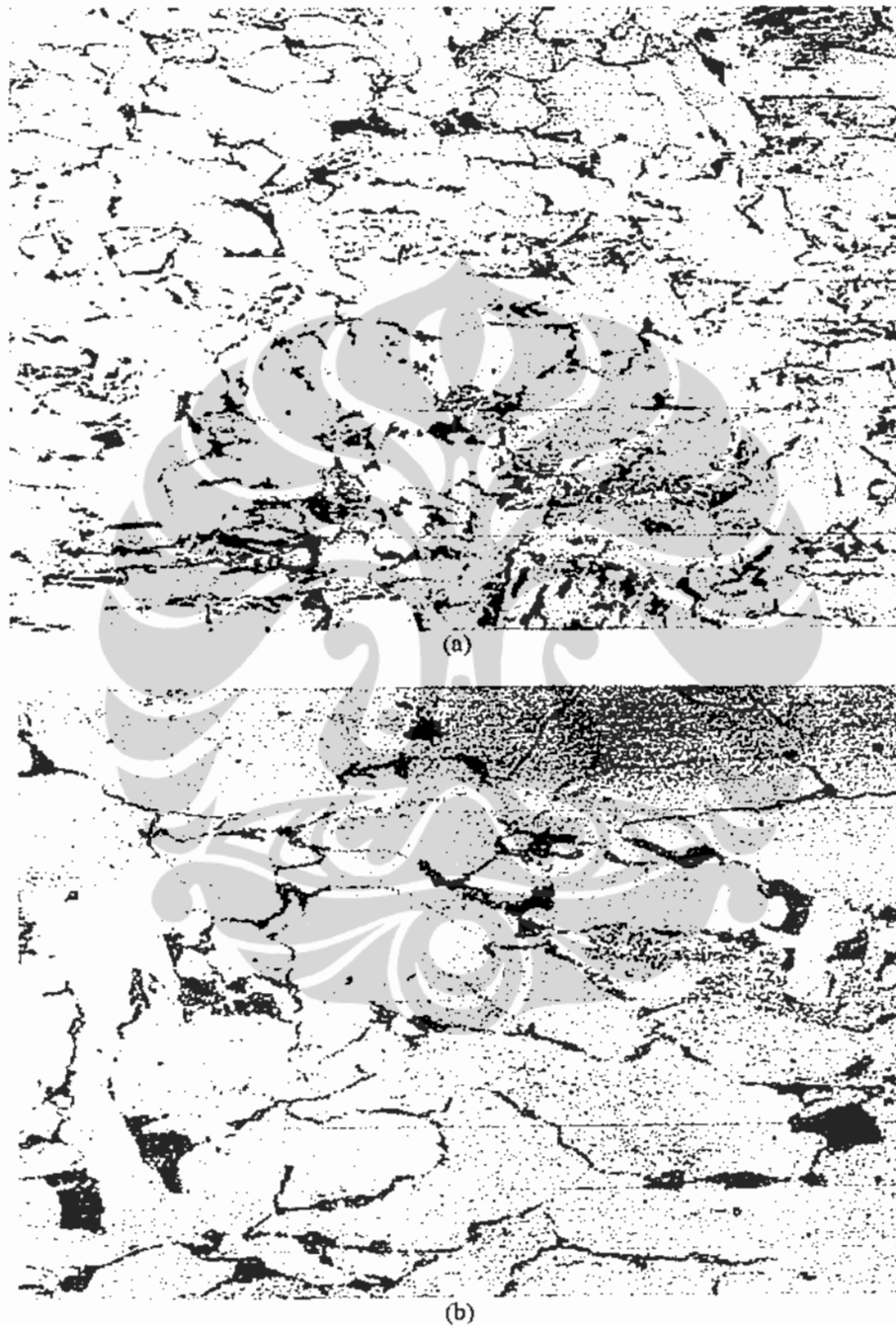
(a)



(b)

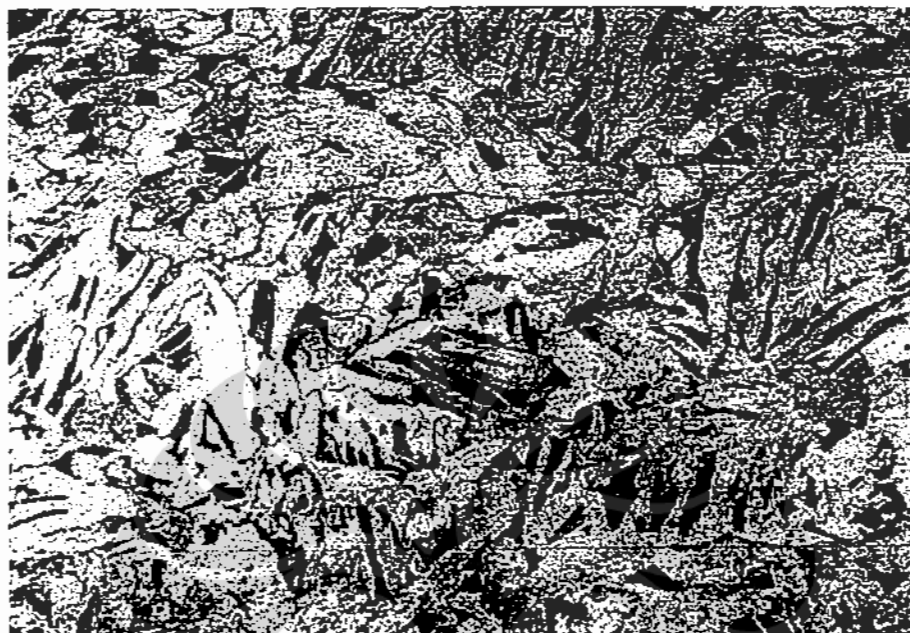
Gambar 4.6 Gambar struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dideformasi 0,35 pada suhu 550°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x; (b) Perbesaran 500x.

F. Benda Uji F (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 550 °C dengan deformasi 0,35)



Gambar 4.7 Gambar struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 550°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x; (b) Perbesaran 500x.

G. Benda Uji G (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 600 °C dengan deformasi 0,35)



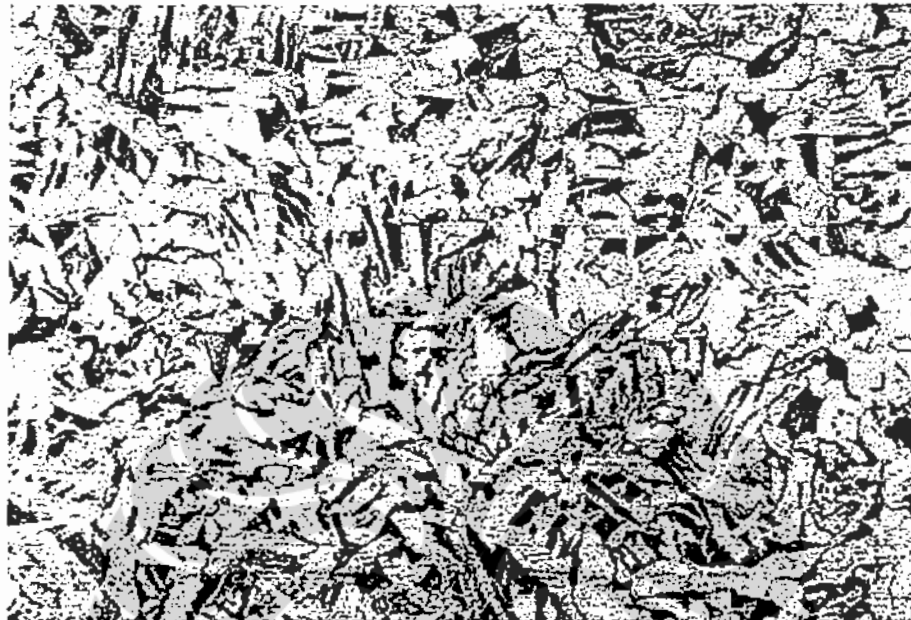
(a)



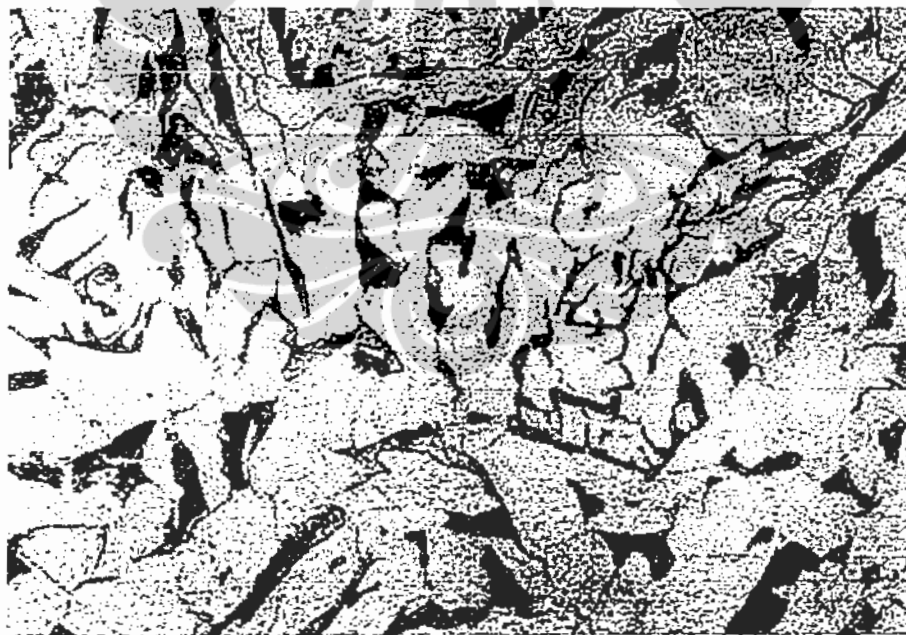
(b)

Gambar 4.8 Gambar struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 600°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x; (b) Perbesaran 500x.

H. Benda Uji H (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 650 °C dengan deformasi 0,35)



(a)



(b)

Gambar 4.9 Gambar struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 650°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 200x; (b) Perbesaran 500x.

#### 4.6.3. Pengamatan Secara Mikro dengan Scanning Electron Microscope

##### A. Benda Uji A (*Bulk Sample* – Baja Karbon GR X42)



(a)

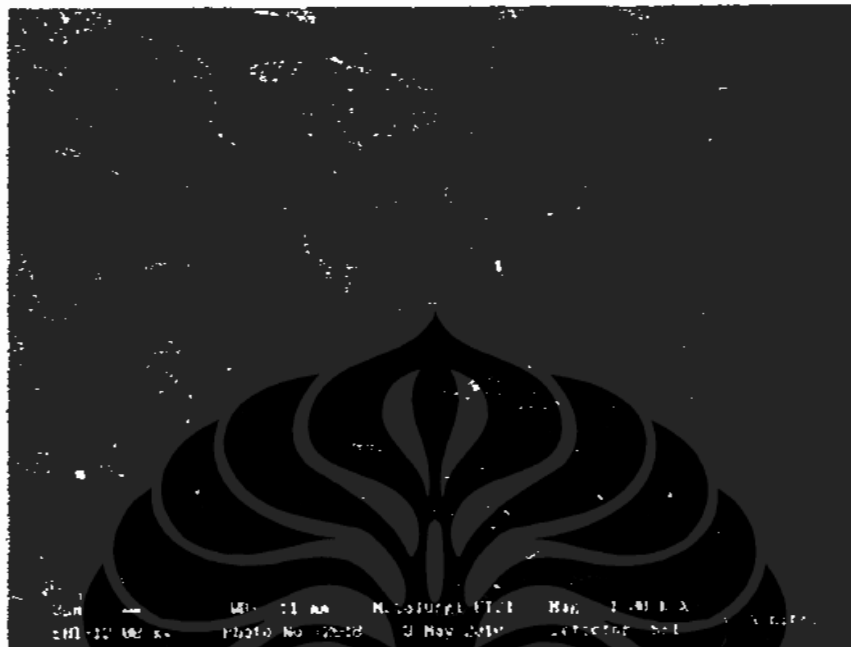


(b)

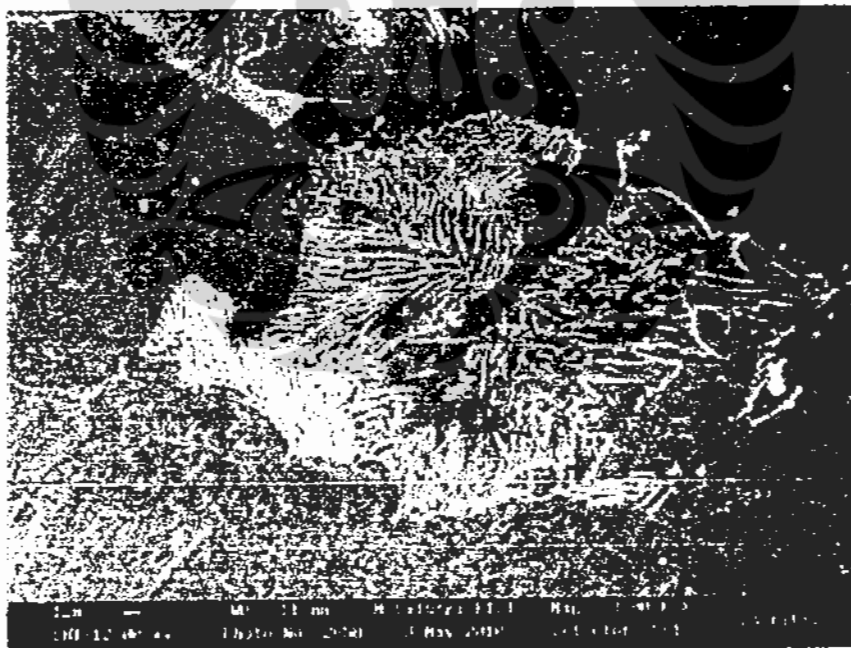
Gambar 4.10 Foto SEM struktur mikro Baja Karbon GR X42 sebelum dideformasi yang di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x



B. Benda Uji B (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan hingga 1100°C)



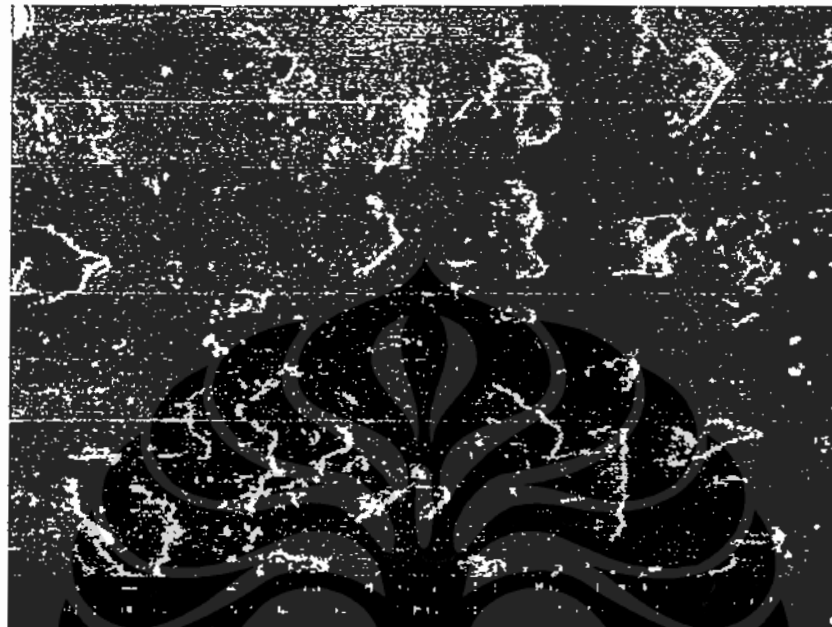
(a)



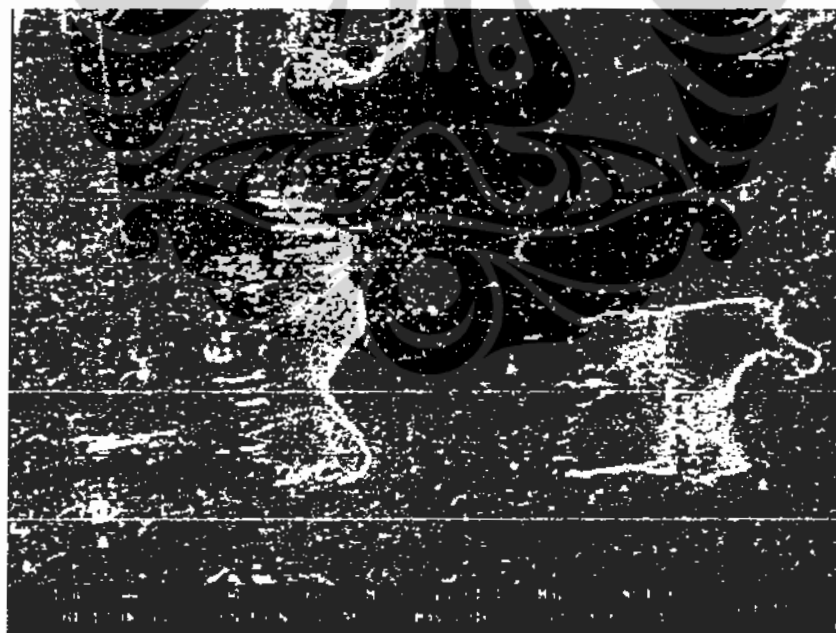
(b)

Gambar 4.11 Foto SEM struktur mikro Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan hingga 1100°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x

C. Benda Uji C (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada  $1100^{\circ}\text{C}$  dan di *roll* pada  $950^{\circ}\text{C}$  dengan deformasi 0,30)



(a)

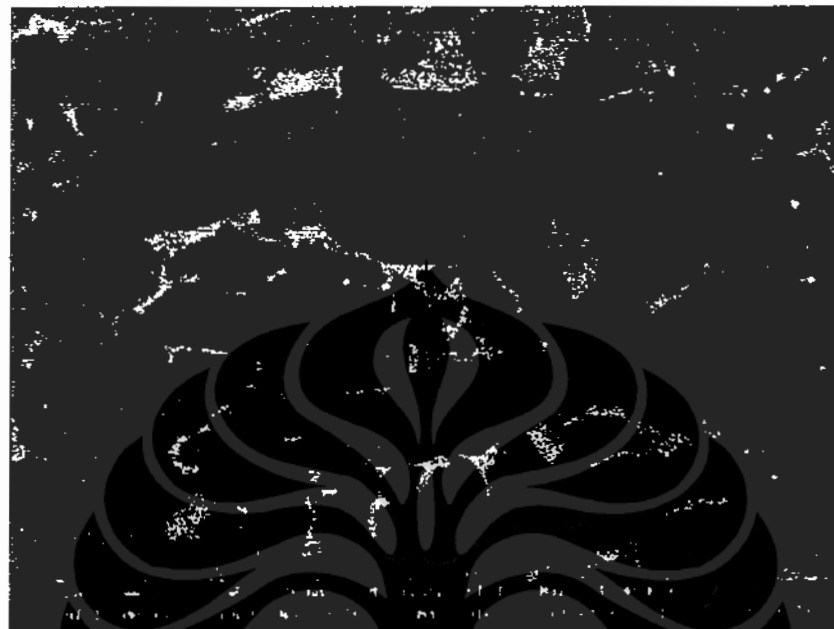


(b)

Gambar 4.12 Foto SEM struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada  $1100^{\circ}\text{C}$  kemudian dideformasi 0,30 pada suhu  $950^{\circ}\text{C}$  dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x



D. Benda Uji D (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 950 °C dengan deformasi 0,35)



(a)



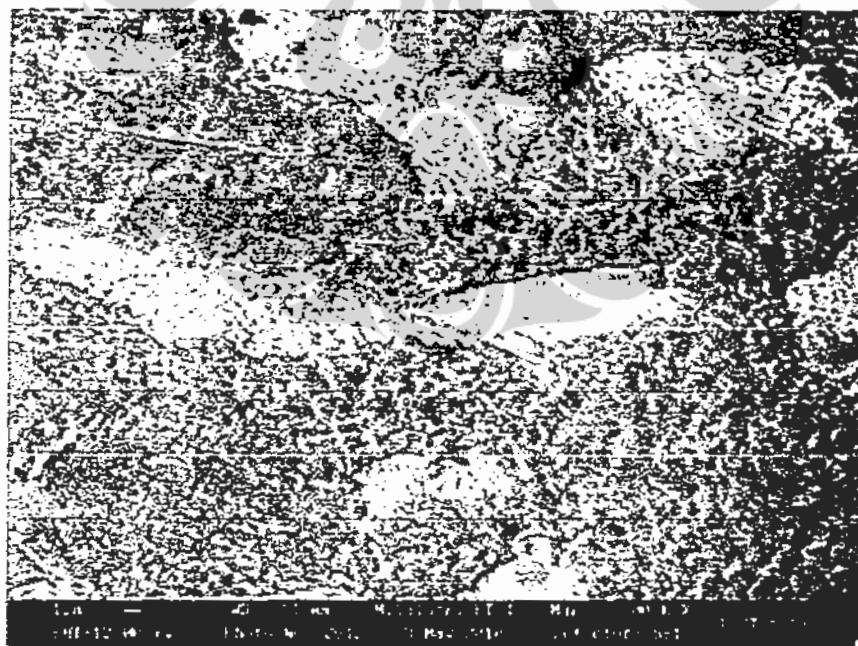
(b)

Gambar 4.13 Foto SEM struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 950°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x

E. Benda Uji E (Baja Karbon Gr X42 yang dipanaskan hingga 550°C dan di-roll dengan deformasi 0,35)



(a)



(b)

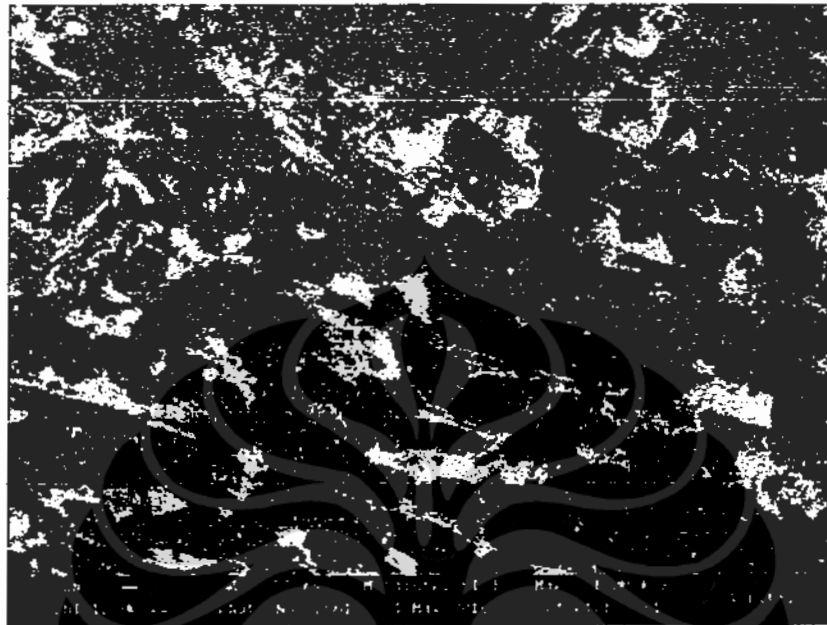
Gambar 4.14 Foto SEM struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dideformasi 0,35 pada suhu 550°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x

F. Benda Uji F (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 550 °C dengan deformasi 0,35)

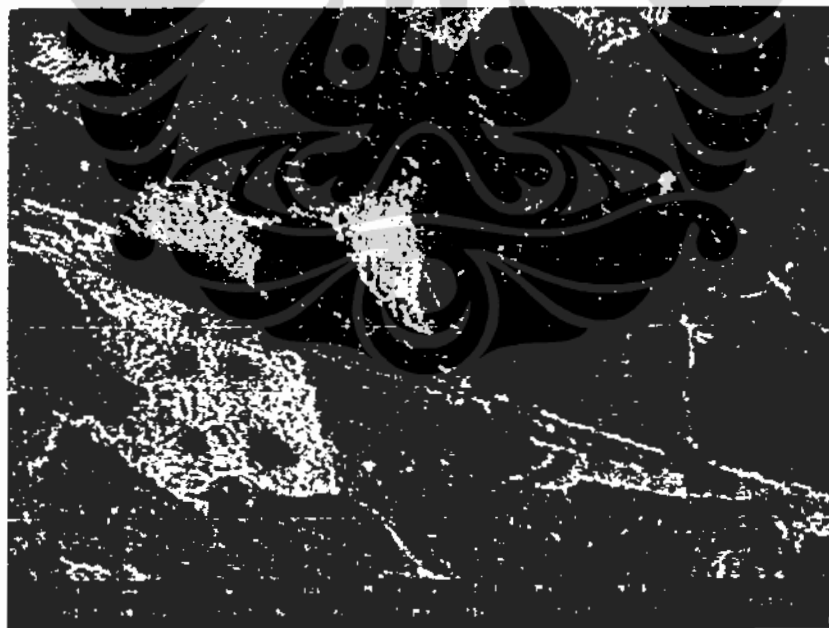


Gambar 4.15 Foto SEM struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 550°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x

G. Benda Uji G (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 600 °C dengan deformasi 0,35)



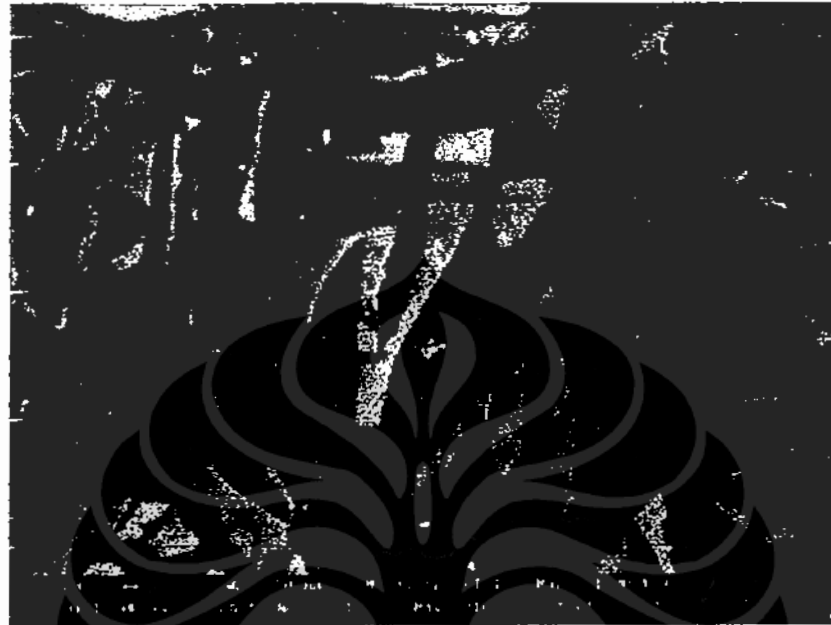
(a)



(b)

Gambar 4.16 Foto SEM struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 600°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x

H. Benda Uji H (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 650 °C dengan deformasi 0,35)



(a)



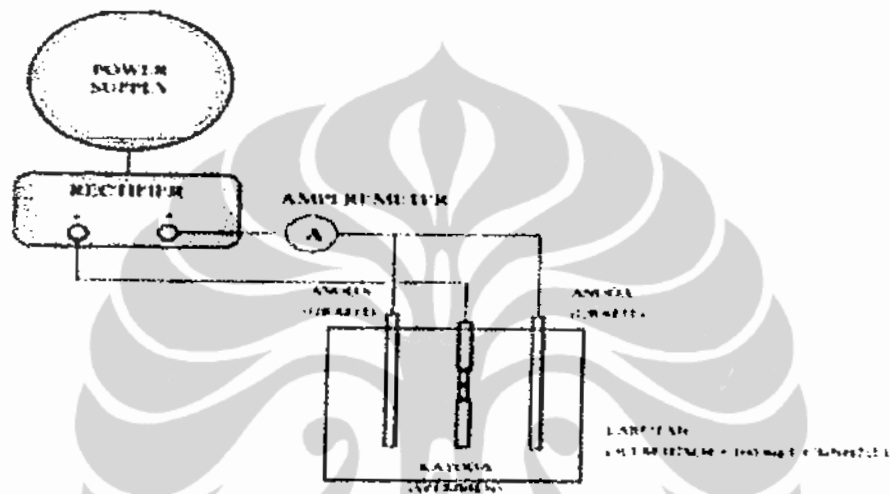
(b)

Gambar 4.17 Foto SEM struktur mikro Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 650°C dan di etsa dengan larutan Nital 2% (a) Perbesaran 1000x; (b) Perbesaran 3000x

#### 4.7. Uji Ketangguhan Benda Uji Terhadap Penggetasan Hydrogen

##### 4.7.1. Proses *Hydrogen Charging* [8, 44, 45]

Proses pemasukan hidrogen dilakukan menggunakan sirkuit galvanostatik (polarisasi katodik) dengan larutan 0,5 M  $H_2SO_4$  ditambah 100 mg/L Thiourea ( $CS[NH_2]_2$ ) dengan pemberian rapat arus  $1 \text{ mA/cm}^2$  dan waktu *charging* dilakukan selama 10 menit. Skema disain alatnya adalah sebagai berikut:



Gambar 4.18 Rangkaian Proses *Hydrogen Charging* [8]



Gambar 4.19 Susunan Alat dan Bahan Pada Proses *Hydrogen Charging*

#### 4.7.2. Data Hasil Uji Tarik

Setelah proses *hydrogen cherging* dilakukan pengujian tarik untuk mengetahui degradasi sifat mekanik benda uji dan juga pengamatan morfologi patahannya dengan menggunakan foto makro dan SEM. Berikut hasil pengujian tarik pada benda uji:

Tabel 4.6. Hasil Pengukuran Uji Tarik

No	Benda Uji	Deskripsi Benda Uji		Deformasi	Regangan, $\delta$ (%)
		T <sub>Reheat</sub> (°C)	T <sub>Akhir Roll</sub> (°C)		
1	A	-	-	-	77,99
2	B	1100	-	-	80,20
3	C	1100	950	0,30	79,23
4	D	1100	950	0,35	85,20
5	E	550	550	0,35	64,19
6	F	1100	550	0,35	65,28
7	G	1100	600	0,35	80,35
8	H	1100	650	0,35	69,52

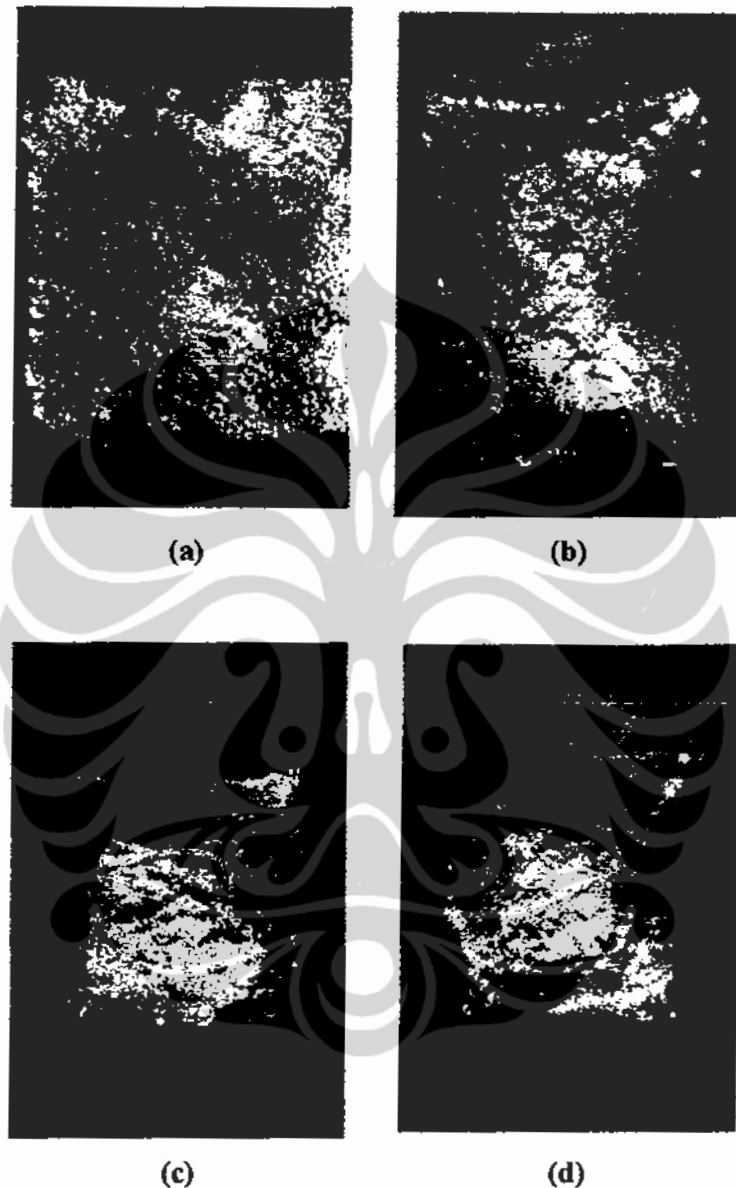
Tabel 4.7. Data Hasil Uji Tarik

No	Kode Benda Uji	Bentuk Benda Uji	Dimensi Benda Uji (mm)	Luas Penampang (mm <sup>2</sup> )	Panjang Ukur (mm)	Pu (kg)	Py (kg)	Panjang Akhir (mm)	$\Delta L$ (mm)	Ultimate Stress, $\sigma_u$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield Stress, $\sigma_y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Regangan, $\epsilon$ (%)
1	A	Plat	t = 8.00 w = 5.80	46,40	23,60	2410,00	1780,00	42,00	18,40	51,93	38,36	77,99
2	B	Plat	t = 8.00 w = 5.80	46,40	27,25	2310,00	1500,00	49,10	21,85	49,78	32,33	80,20
3	C	Plat	t = 6.40 w = 5.70	36,48	24,16	1660,00	1100,00	43,30	19,14	45,50	30,15	79,23
4	D	Plat	t = 6.00 w = 5.80	34,80	23,60	1590,00	1020,00	43,70	20,10	45,69	29,31	85,20
5	E	Plat	t = 6.30 w = 5.80	36,54	24,18	2290,00	2000,00	39,70	15,52	62,67	54,73	64,19
6	F	Plat	t = 6.00 w = 5.80	34,80	23,60	2010,00	1640,00	39,00	15,40	57,76	47,13	65,28
7	G	Plat	t = 6.00 w = 6.20	37,20	24,40	1660,00	1080,00	44,00	19,60	44,62	29,03	80,35
8	H	Plat	t = 6.00 w = 5.80	34,80	23,60	1930,00	1500,00	40,00	16,40	55,46	43,10	69,52

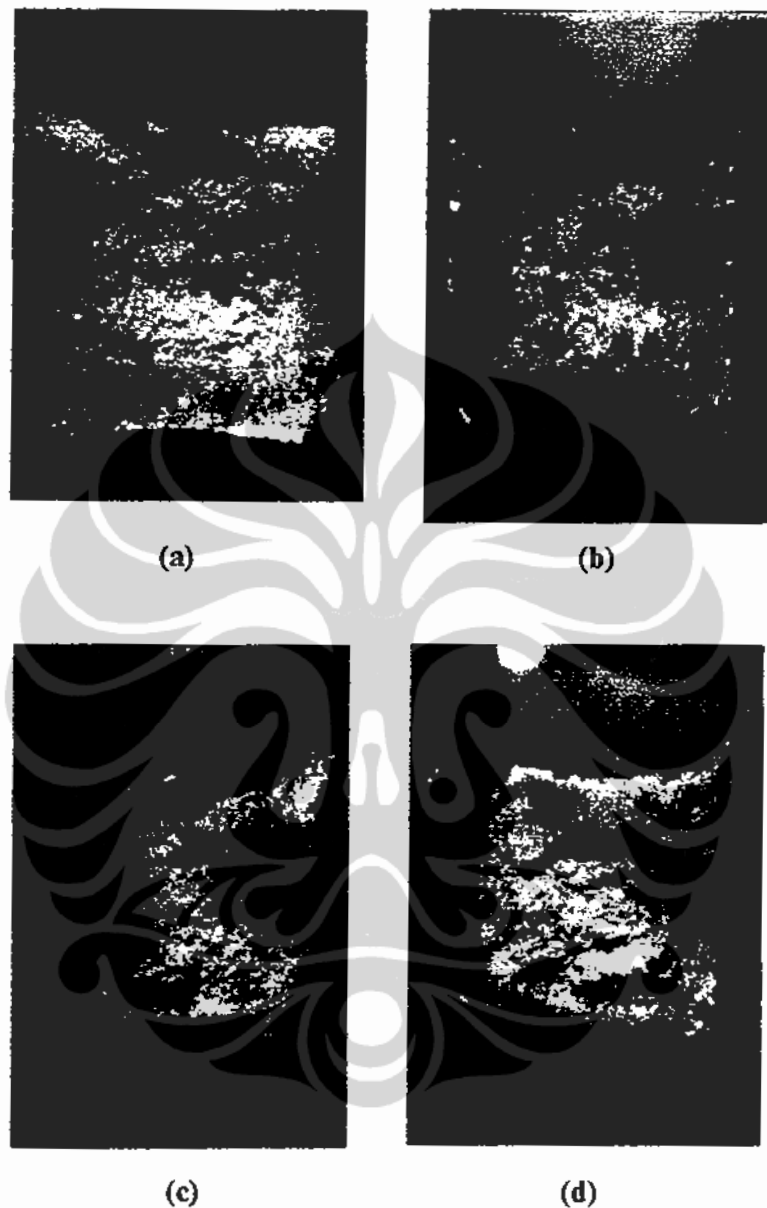


### 4.7.3. Hasil Pengamatan Fraktografi

#### 4.7.3.1. Pengamatan Foto Mikro Dengan Kamera Olympusmicroscope



Gambar 4.20 Foto Makro Permukaan Patahan Hasil Uji Tarik Dengan Perbesaran 20x (a) Benda Uji sebelum dideformasi; (b) Benda Uji yang dipanaskan pada 1100°C; (c) Benda Uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 0,30 pada suhu 950°C; (d) Benda Uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 950°C



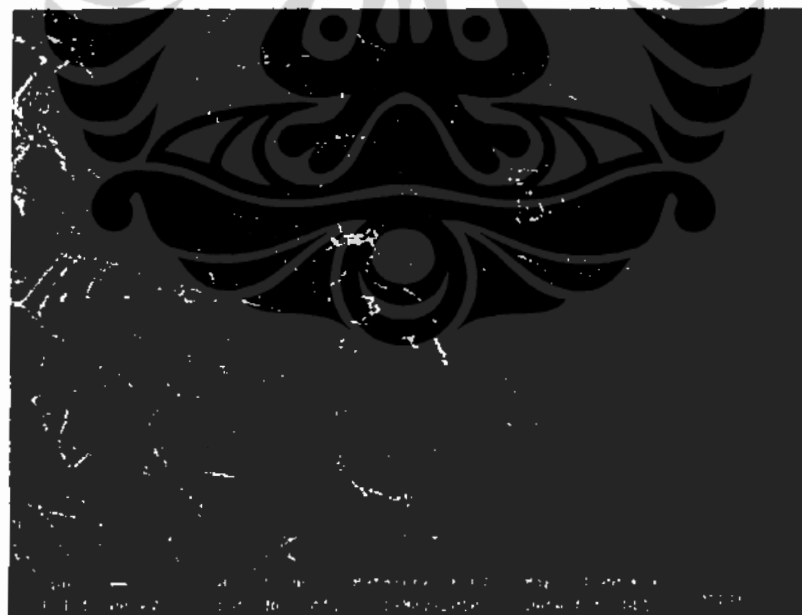
Gambar 4.21 Foto Makro Permukaan Patahan Hasil Uji Tarik Dengan Perbesaran 20x (a) Benda Uji yang dideformasi 0,35 pada suhu 550°C; (b) Benda Uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 550°C; (c) Benda Uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 600°C; (d) Benda Uji yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 650°C

#### 4.7.3.2. Pengamatan Mikro Benda Uji Setelah Penggetasan Dengan Scanning Electron Microscope

##### A. Benda Uji A (*Bulk Sample* – Baja Karbon GR X42)



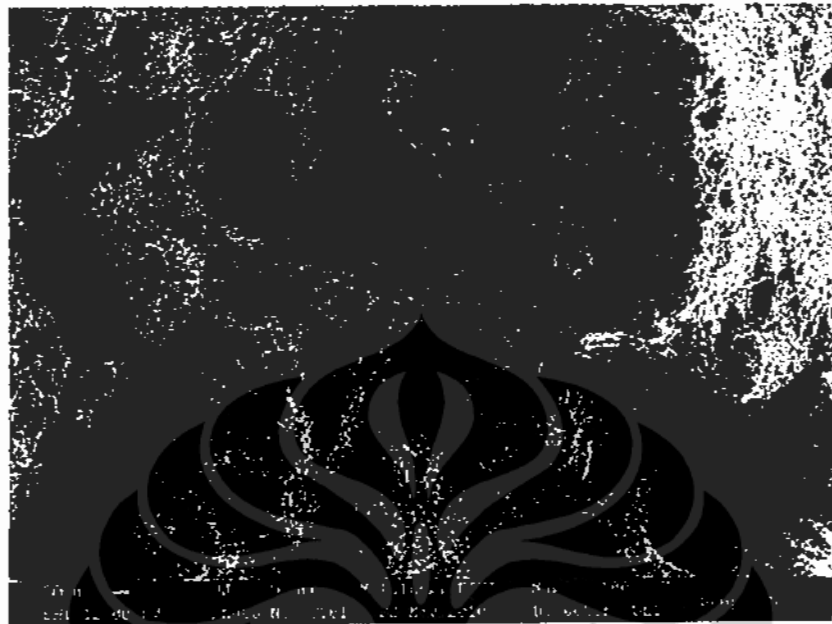
(a)



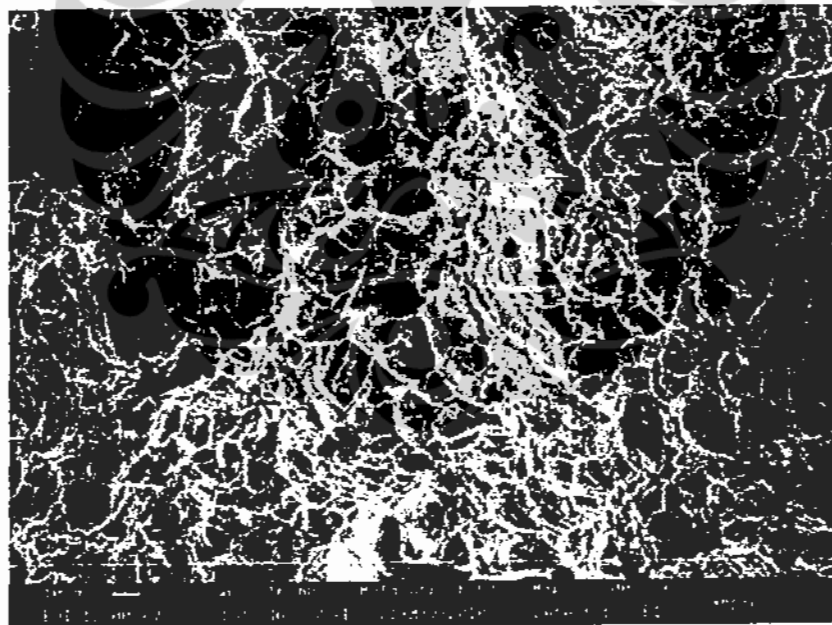
(b)

Gambar 4.22 Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari Baja Karbon GR X42 sebelum dideformasi (a) Perbesaran 500x; (b) Perbesaran 1000x.

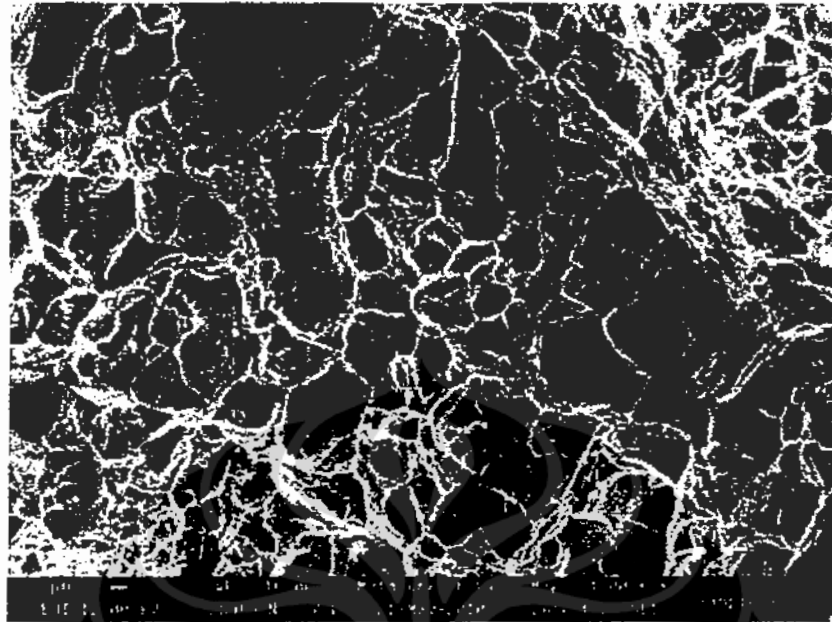
B. Benda Uji B (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan hingga 1100°C)



(a)



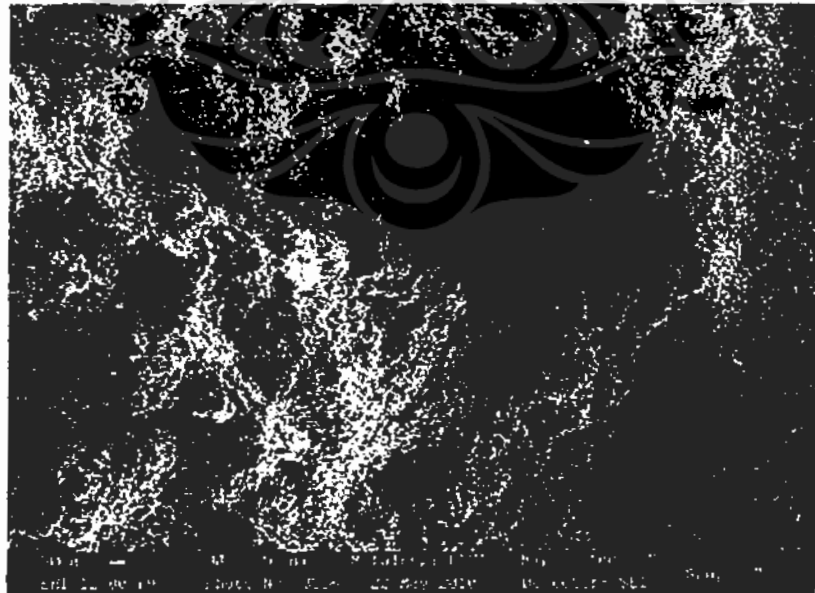
(b)



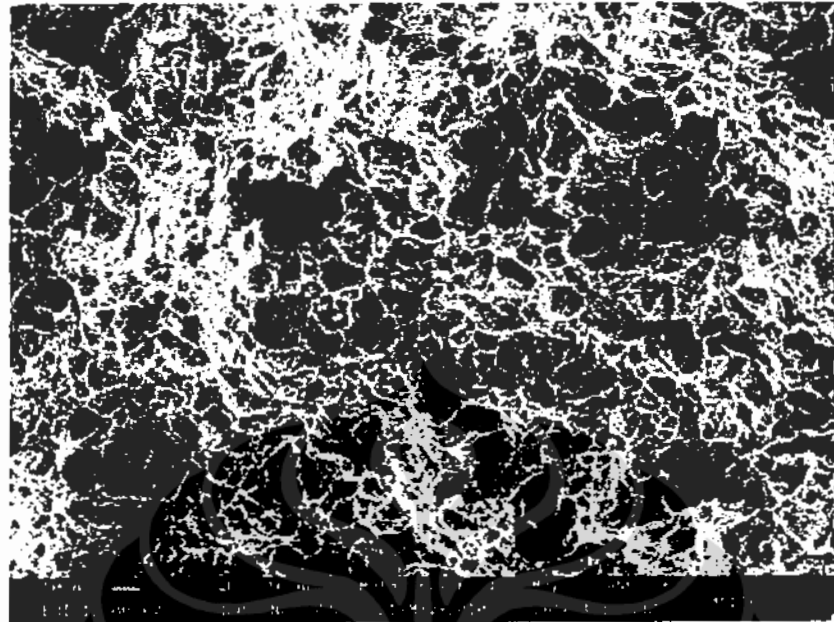
(c)

Gambar 4.23 Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan hingga 1100°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x.

C. Benda Uji C (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 950 °C dengan deformasi 0,30)



(a)



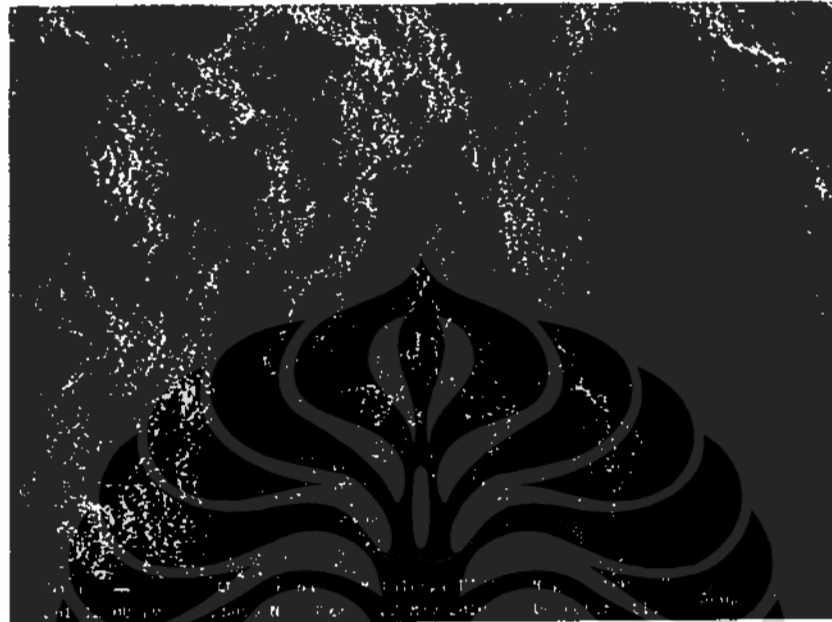
(b)



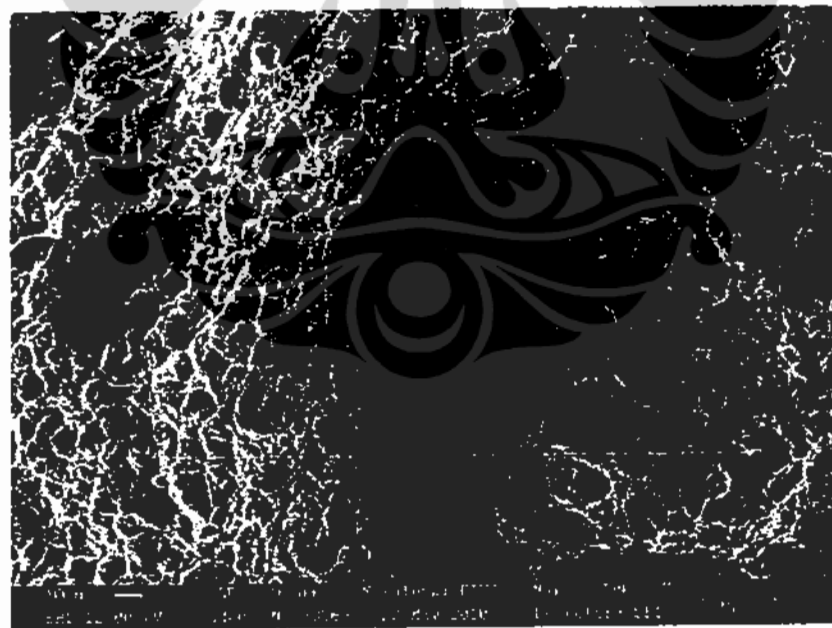
(c)

Gambar 4.24 Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada  $1100^{\circ}\text{C}$  kemudian dideformasi 0,30 pada suhu  $950^{\circ}\text{C}$  (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x.

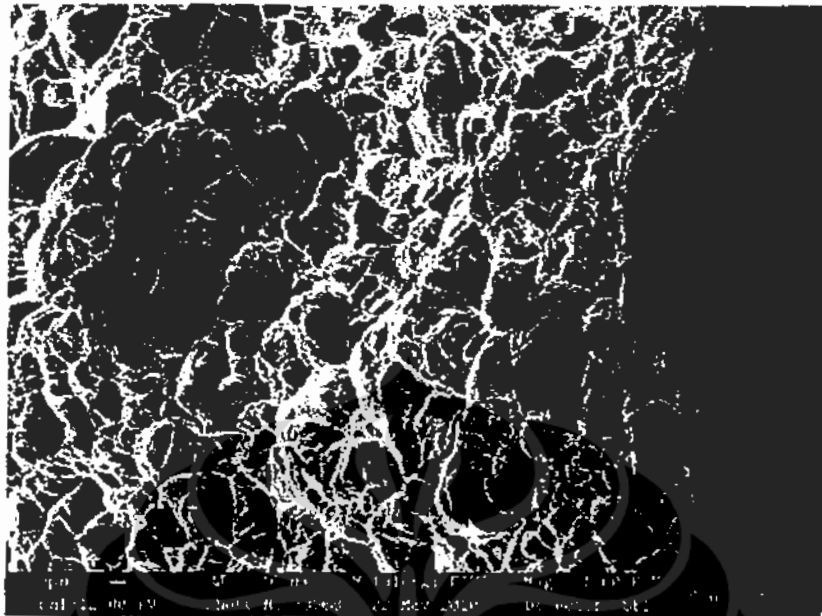
D. Benda Uji D (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 950 °C dengan deformasi 0,35)



(a)



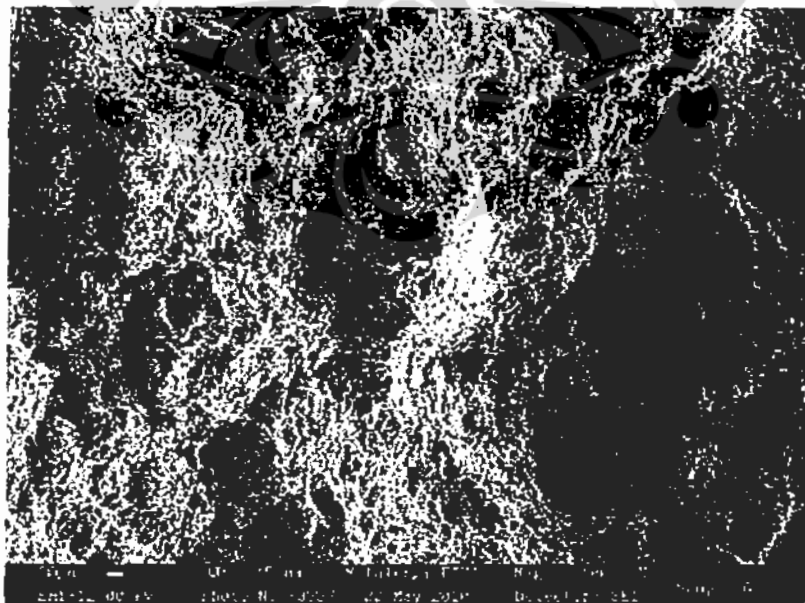
(b)



(c)

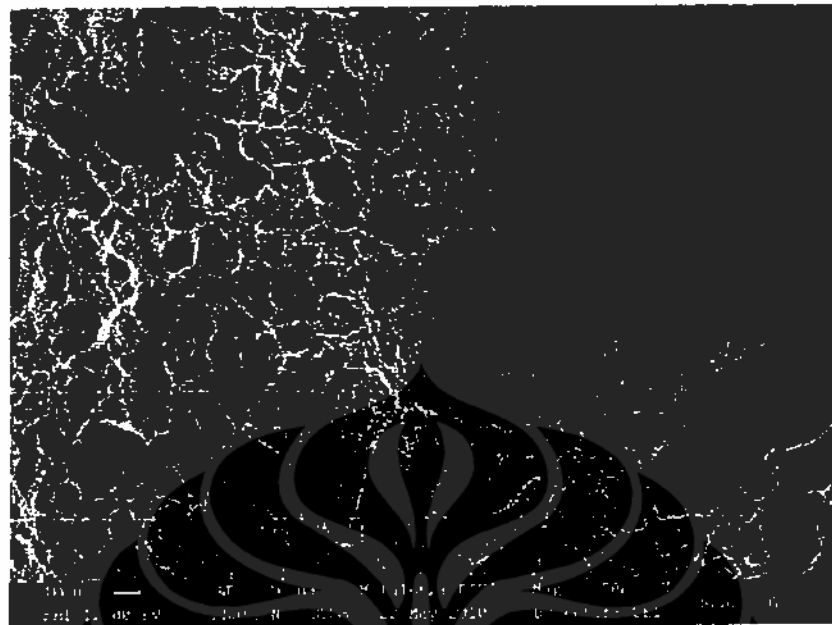
Gambar 4.25 Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 950°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x.

E. Benda Uji E (Baja Karbon Gr X42 yang dipanaskan hingga 550°C dan di-roll dengan deformasi 0,35)



(a)





(b)



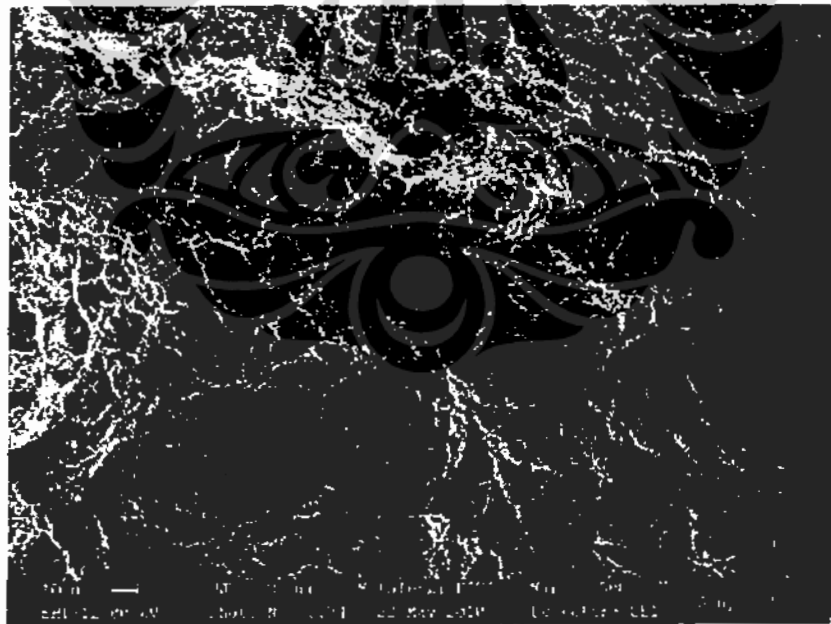
(c)

Gambar 4.26 Foto SEM struktur mikro patahan Baja Karbon GR X42 yang mengalami penggetasan hidrogen sesudah dideformasi 0,35 pada suhu 550°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x.

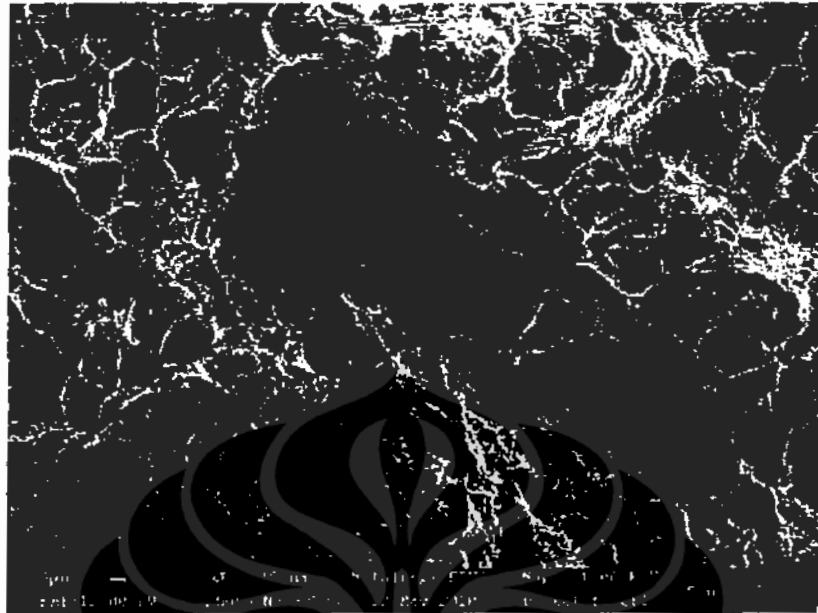
F. Benda Uji F (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 550 °C dengan deformasi 0,35)



(a)



(b)



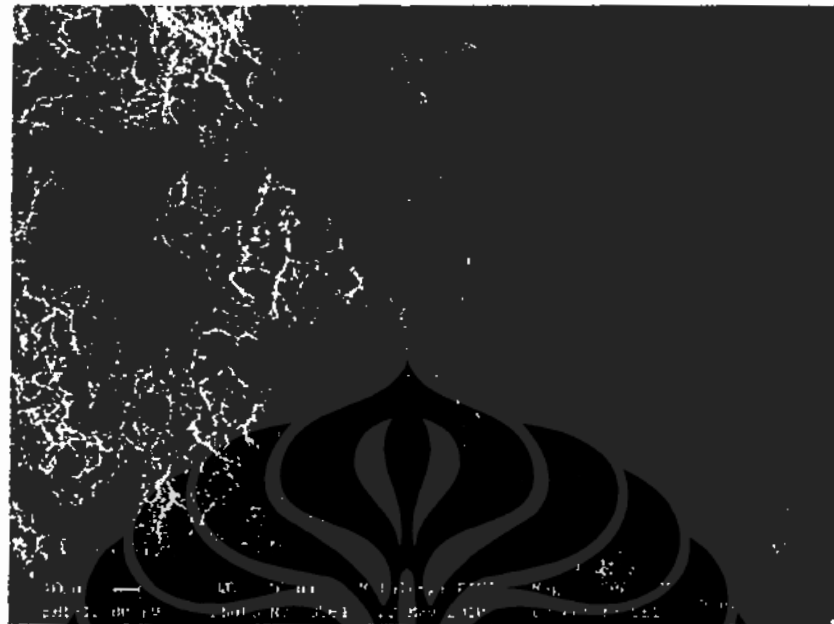
(c)

Gambar 4.27 Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 550°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x.

G. Benda Uji G (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 600 °C dengan deformasi 0,35)



(a)



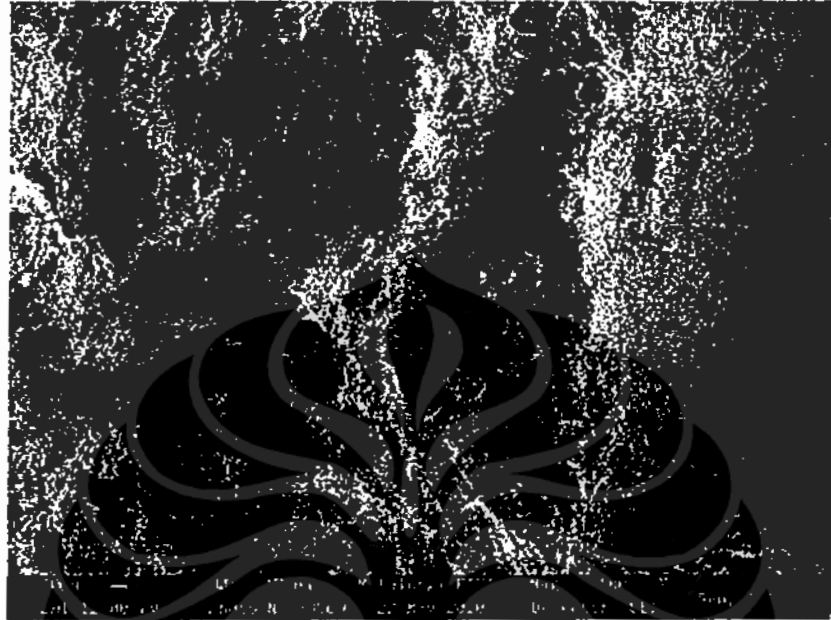
(b)



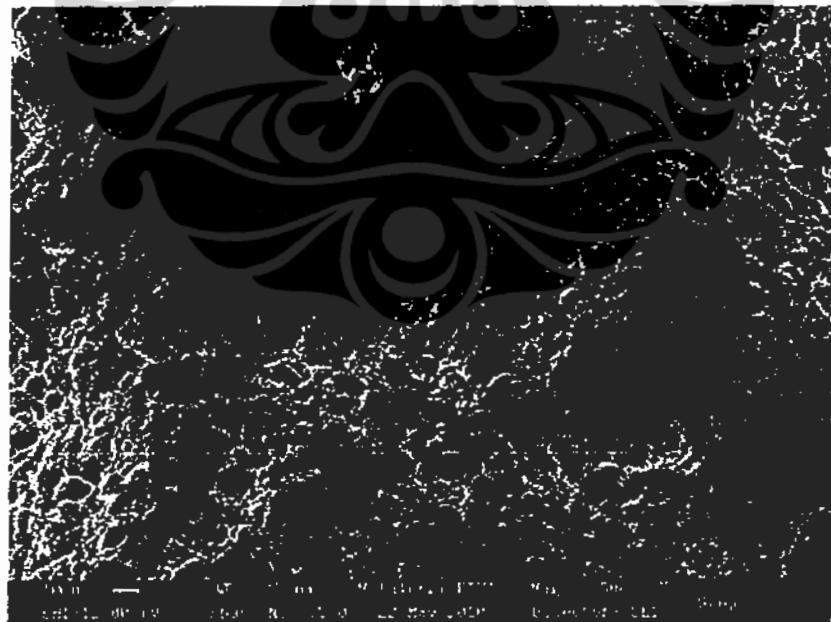
(c)

Gambar 4.28 Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada 1100°C kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 600°C (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x.

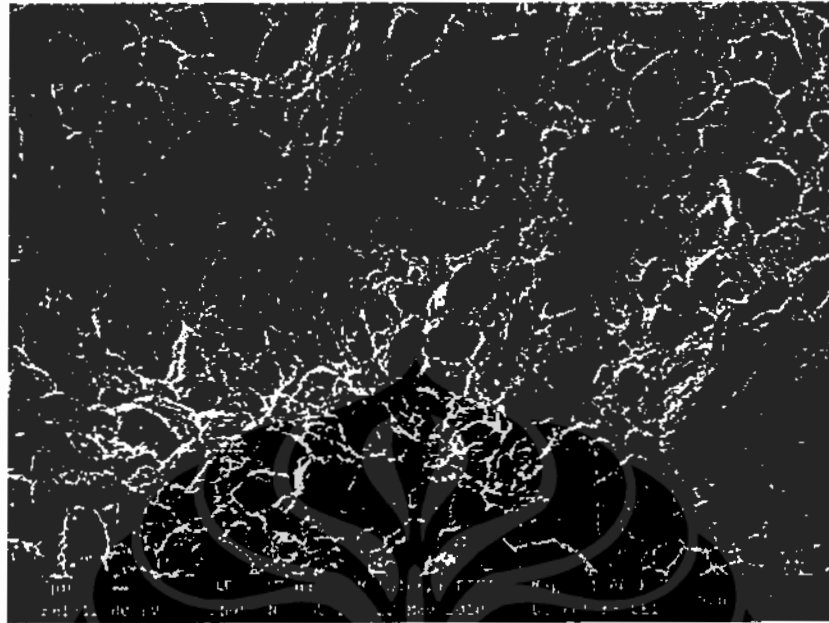
H. Benda Uji H (Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di *roll* pada 650 °C dengan deformasi 0,35)



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.29 Foto SEM struktur mikro permukaan hasil uji tarik dari Baja Karbon GR X42 sesudah dipanaskan pada  $1100^{\circ}\text{C}$  kemudian dideformasi 0,35 pada suhu  $650^{\circ}\text{C}$  (a) Perbesaran 100x; (b) Perbesaran 500x; (c) Perbesaran 1000x.

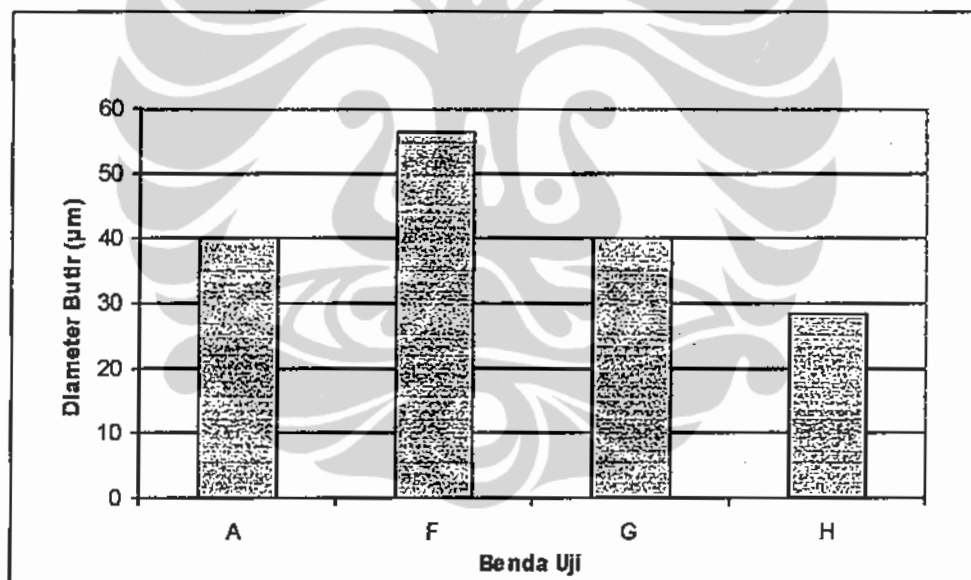
## BAB V

### PEMBAHASAN

#### 5.1. Data Karakterisasi Komposisi Kimia

Komposisi kimia baja karbon GR X42 yang dapat dilihat pada Lampiran 1, diverifikasi menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Dari data yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 diperoleh kandungan baja karbon sekitar 0,156% unsur Karbon dan kandungan unsur paduan Niobium, Vanadium dan Titanium dibawah 0,002%.

#### 5.2. Hasil Perhitungan Butir



Gambar 5.1 Perubahan diameter butir ferit yang di rolling pada suhu 550°C (Benda Uji F), 600°C (Benda Uji G) dan 650°C (Benda Uji H) terhadap benda uji yang tidak di deformasi (Benda Uji A).

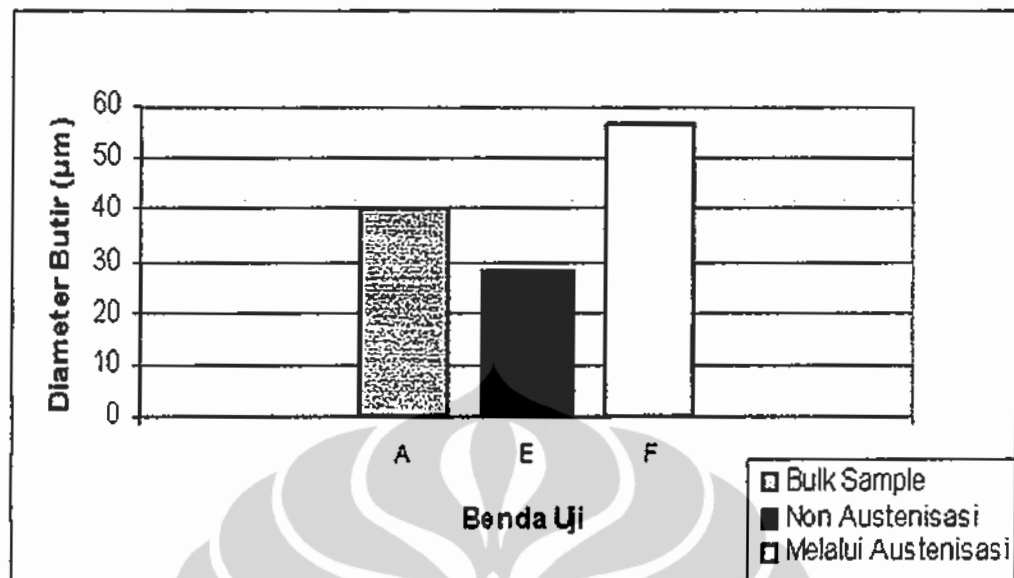
Pada bagian ini diamati perubahan deformasi butir benda uji yang diperoleh melalui deformasi pada beberapa area temperatur canai. Sebelumnya dilakukan aplikasi pemanasan ulang terhadap benda uji hingga 1100°C dan kemudian pada

temperatur yang ditentukan, benda uji dilewatkan pada mesin *rolling* dan dideformasi satu arah dengan persentasi deformasi sebesar 0,35. Untuk perbandingan, temperatur akhir canai dibedakan yaitu pada temperatur 550, 600, 650 dan 950°C.

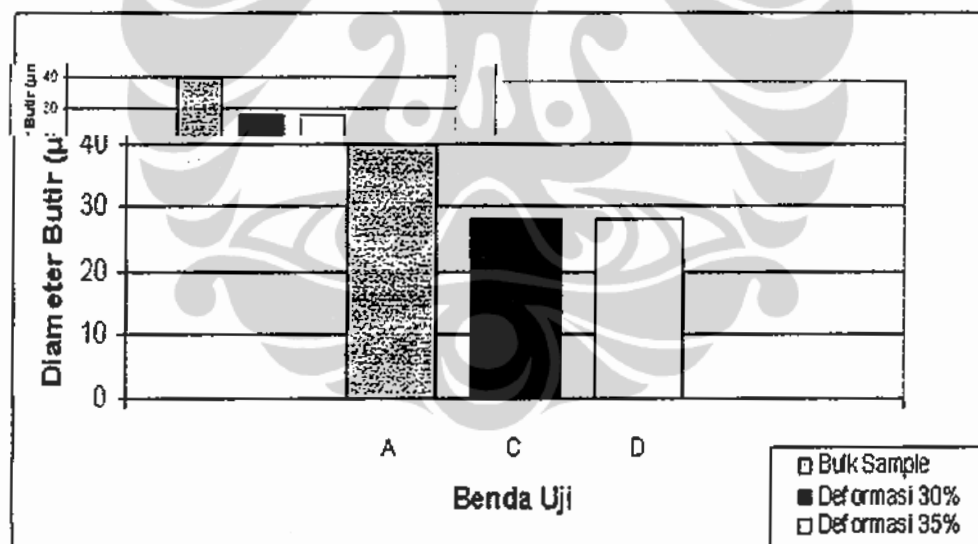
Butir yang diperoleh pada benda uji H yang dipanaskan pada suhu 1100°C lalu dideformasi ke 650°C memiliki diameter yang lebih kecil dibanding butir benda uji (G) yang diperoleh melalui pemanasan 1100°C kemudian dideformasi pada 600°C. Begitu juga dengan butir yang diperoleh pada benda uji (G) memiliki diameter yang lebih kecil dibanding butir benda uji (F) yang diperoleh melalui pemanasan 1100°C kemudian dideformasi pada 550°C. Namun karena faktor pemuaiian selama proses pendinginan benda uji F memiliki diameter yang lebih besar (56  $\mu\text{m}$ ) dibanding dengan benda uji awal yang tidak mengalami deformasi sementara benda uji G memiliki diameter butir yang sama dengan benda awal (40  $\mu\text{m}$ )

Gambar 5.2 dibawah menjelaskan pengaruh temperatur pemanasan hingga 1100°C terhadap diameter butir benda uji. Benda uji E yang mengalami pemanasan hingga 550°C lalu segera dirolling dengan deformasi 0,35 memiliki diameter butir sekitar 28,3  $\mu\text{m}$  yang lebih kecil dibanding dengan spesimen awal (40  $\mu\text{m}$ ), secara kontras berlawanan dengan benda uji F yang juga dirolling dengan deformasi yang sama pada suhu 550°C namun sebelumnya melalui pemanasan hingga 1100°C. Lamanya waktu pendinginan sebelum rolling dari 1100°C ke 550°C memberi pengaruh yang signifikan terhadap diameter butir. Butir memiliki waktu yang cukup untuk bertumbuh.





Gambar 5.2 Perbandingan diameter butir benda uji yang di rolling dengan deformasi 0,35 pada suhu 550°C (dengan dan tanpa pemanasan pada 1100°C).



Gambar 5.3 Pengaruh persentasi deformasi terhadap diameter butir benda uji.

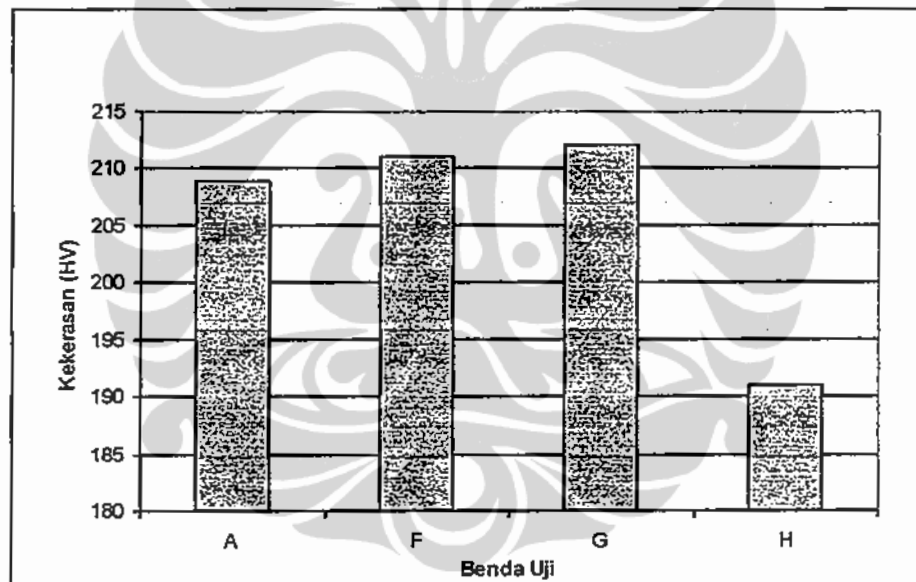
Sementara pada Gambar 5.3 diatas perbedaan persentasi deformasi 0,30 dan 0,35 pada benda uji C dan D yang dilakukan pada suhu 950°C setelah sebelumnya dipanaskan hingga 1100°C tidak memberi perbedaan yang berarti terhadap diameter

butir. Hal ini dapat dikarenakan perbedaan persentase deformasi yang juga tidak terlalu signifikan, sehingga efek perbedaan persentase deformasi sebesar  $\pm 0,05$  tidak mempengaruhi diameter butir secara berarti.

### 5.3. Hasil Pemeriksaan Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada benda uji awal dan benda uji hasil proses canai pada temperatur 550, 600, 650 dan 950°C. Metode pengujian kekerasan yang digunakan adalah metode microhardness Vickers. Hasil pengujian nilai kekerasan secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.4.

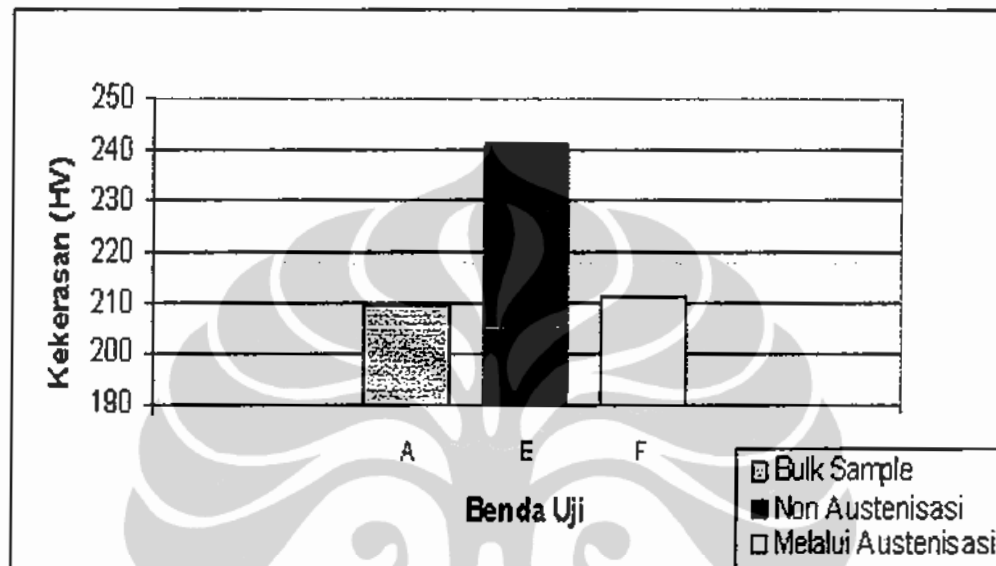
Perbandingan kekerasan benda uji baja karbon GR X42 dapat digambarkan pada Gambar 5.4 di bawah ini.



Gambar 5.4 Perubahan kekerasan benda uji yang di rolling pada suhu 550°C (Benda Uji F), 600°C (Benda Uji G) dan 650°C (Benda Uji H) terhadap benda uji yang tidak di deformasi (Benda Uji A).

Nilai kekerasan benda uji F (211 Hv) yang diperoleh pada proses deformasi 0,35 pada suhu 550°C setelah pemanasan 1100°C cenderung meningkat dibanding benda uji awal A (209 Hv), walaupun peningkatan yang diperoleh tidak terlalu signifikan. Peningkatan kekerasan terus teramati hingga proses deformasi 0,35 benda

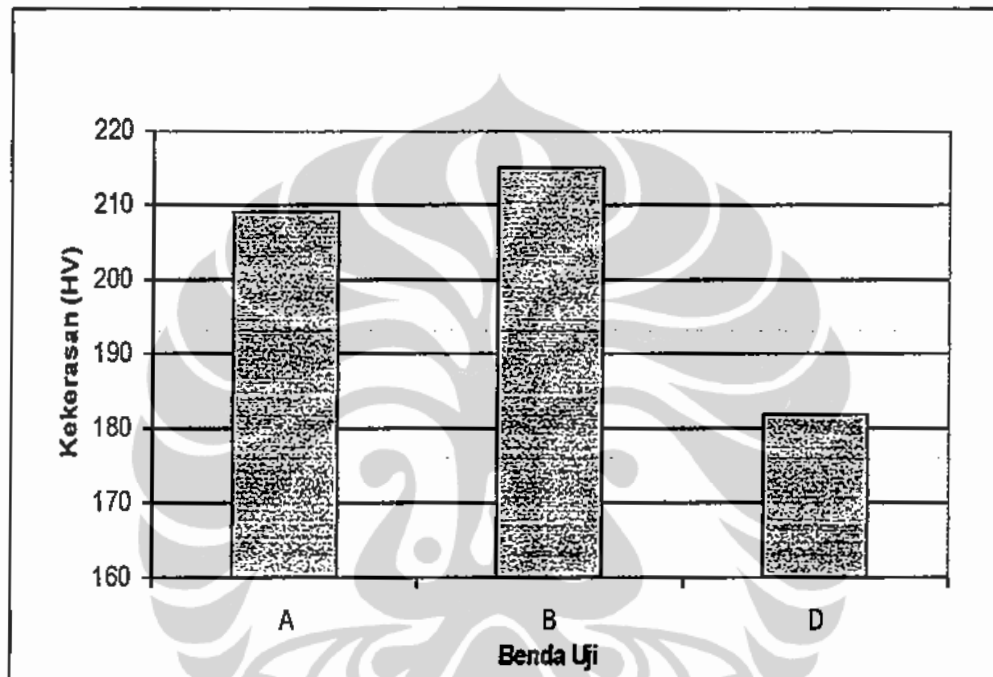
uji G (212 Hv) pada 600°C kemudian secara signifikan menurun pada benda uji H (191 Hv) yang dideformasi 0,35 pada suhu 650°C yang sebelumnya mengalami pemanasan hingga 1100°C.



Gambar 5.5 Perbandingan kekerasan benda uji yang di rolling dengan deformasi 35% pada suhu 550°C (dengan dan tanpa pemanasan pada 1100°C).

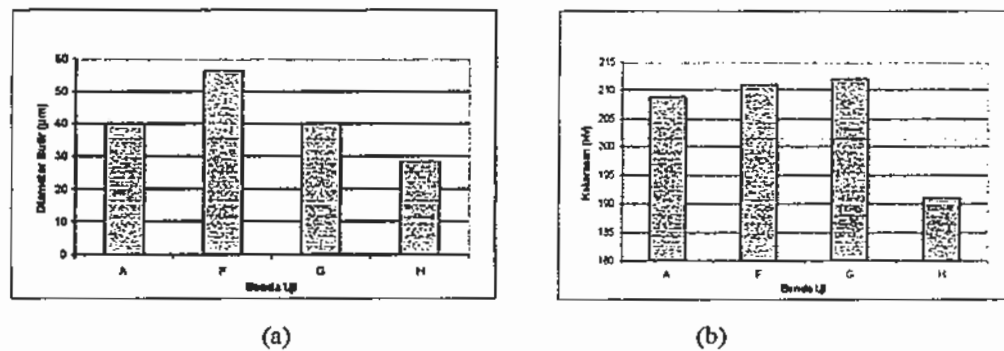
Nilai kekerasan benda uji E (241 Hv) yang di rolling dengan proses deformasi 0,35 pada 550°C jauh lebih tinggi dibanding nilai kekerasan benda uji F (211 Hv) yang dirolling dengan deformasi dan suhu yang sama namun sebelumnya dipanaskan pada suhu 1100°C. Hal ini dapat dijelaskan karena benda uji E dengan butir yang kecil akan memiliki batas butir yang banyak sehingga pergerakan dislokasi akan semakin mudah terhambat. Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan akan semakin tinggi. Diameter butir yang lebih besar pada benda uji F (56,5  $\mu\text{m}$ ) memiliki nilai kekerasan yang lebih kecil daripada benda uji E. Hal ini disebabkan material dengan butir yang relatif besar memiliki batas butir yang lebih sedikit dibandingkan dengan material yang memiliki butir kecil. Batas butir ini

merupakan penghalang yang akan menghambat pergerakan dislokasi. Jika batas butirnya sedikit maka dislokasi akan semakin mudah bergerak sehingga material semakin mudah dideformasi dan memiliki nilai kekerasan lebih rendah dibandingkan dengan material yang memiliki butir kecil.



Gambar 5.6 Pengaruh deformasi terhadap kekerasan benda uji yang dipanaskan pada suhu  $\geq 950^{\circ}\text{C}$ .

Namun fenomena hubungan peningkatan kekerasan dengan mengecilnya diameter butir diatas tidak ditemukan pada pengamatan perubahan kekerasan benda uji A, F, G dan H seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4 diatas, maupun benda uji D yang dideformasi pada suhu  $950^{\circ}\text{C}$  dengan deformasi 0,35, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.6. Perbandingan grafik kekerasan pada Gambar 5.4 dengan grafik diameter butir benda uji yang sama pada Gambar 5.1 ditunjukkan pada Gambar 5.7 dibawah. Diperoleh pola grafik yang hampir sama diantara keduanya, sehingga dipelajari perilaku perubahan besar butir dan juga bentuk struktur mikro butir yang terbentuk terhadap nilai kekerasannya.



Gambar 5.7 Perbandingan pola grafik diameter butir dan kekerasan benda uji A, F, G dan H.

Penurunan nilai kekerasan seiring dengan berkurangnya ukuran butir pada proses pemanasan di atas  $600^{\circ}\text{C}$  disebabkan oleh energi termal dari proses pemanasan akan menghilangkan tegangan sisa pada batas butir hasil proses canai. Proses penghilangan tegangan sisa ini lebih dikenal dengan istilah *recover*. Penghilangan tegangan sisa pada batas butir ini mengakibatkan berkurangnya kekerasan material. Jika energi yang diberikan cukup tinggi maka akan terjadi pembentukan *nuclei* pada batas butir. *Nuclei* tersebut akan mengalami transformasi nukleasi sehingga timbul butir-butir poligon baru yang bebas dari tegangan. Tahapan ini dikenal dengan istilah rekristalisasi.

Peningkatan temperatur pada benda uji juga memperbesar energi kinetik antar atom yang memudahkan pergerakan dislokasi yang akhirnya menurunkan kekerasan material.

#### 5.4. Hasil pengukuran Laju Korosi

Fenomena korosi dipengaruhi oleh banyak faktor, yang dapat diklasifikasikan menjadi empat kategori yaitu faktor lingkungan, faktor metalurgis, kondisi pengerjaan dan faktor ketergantungan waktu seperti aging, lapisan pelindung atau temperatur. Korosi disebabkan oleh adanya beberapa faktor simultan, sebagai suatu hasil reaksi antara logam dengan lingkungan.

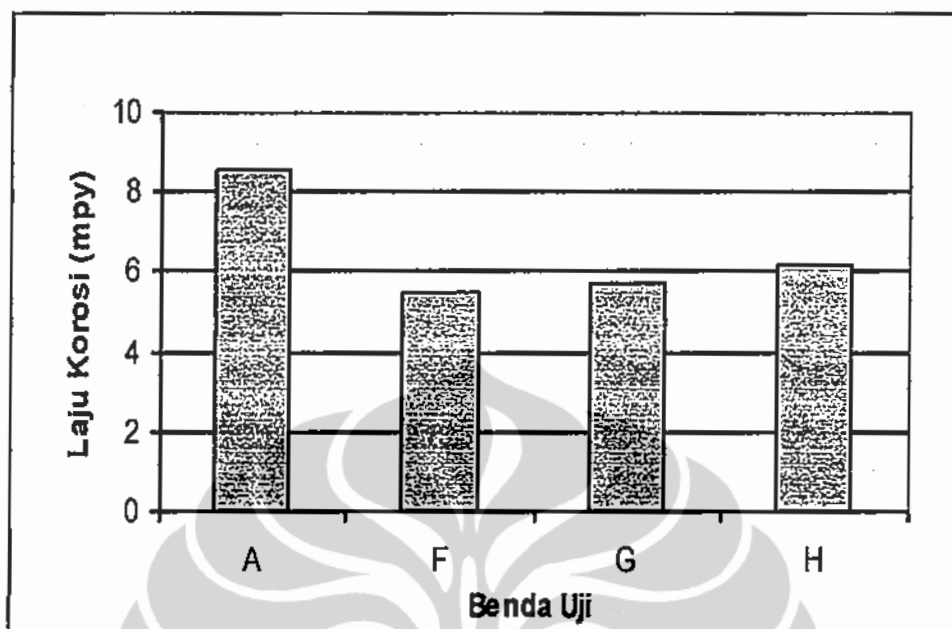
Pada faktor metalurgis prinsip terjadinya korosi adalah karena adanya daerah-daerah yang bersifat anodik-katodik pada permukaan logam, dimana korosi terjadi

pada daerah yang bersifat anodik. Penyebab terjadinya daerah katodik dan anodik ini antara lain adalah ketidak seragaman struktur kristal pada logam tersebut, fenomenanya dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme, diantaranya:

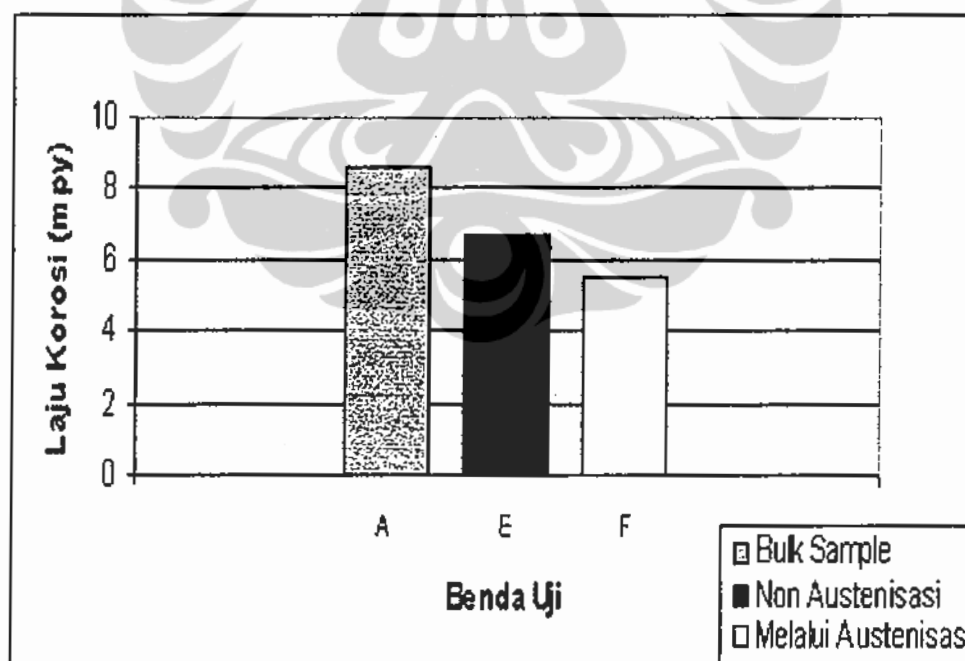
1. Ukuran butir yang tidak merata dapat mengakibatkan butir yang lebih kecil akan bersifat anodik dibandingkan butir yang lebih besar.
2. Timbulnya sel-sel mikro anodik dan katodik yang diakibatkan karena adanya batas butir yang tingkat energinya lebih tinggi dibandingkan dengan kristal di batas butir, dimana batas butir akan bersifat lebih anodik dibandingkan daerah butir.
3. Adanya pengendapan fasa dapat mengakibatkan terjadinya korosi interkristalin. Adanya komposisi kimia yang tidak homogen yang diakibatkan terjadinya segregasi unsur-unsur paduan pada waktu pembekuan dapat menimbulkan bagian butir yang bersifat lebih katodik atau inert.
4. Terjadinya inklusi dalam butir yang mengakibatkan daerah-daerah yang bersifat lebih anodik dan katodik dibandingkan dengan bagian butir lain.
5. Rusaknya film oksida juga dapat menimbulkan korosi, karena daerah permukaan logam yang berada di bawah lapisan oksida yang rusak akan bersifat lebih anodik dibandingkan daerah permukaan yang tertutup oleh lapisan oksida.

Pengukuran laju korosi dilakukan pada benda uji awal dan benda uji hasil proses canai pada temperatur 550, 600, 650 dan 950°C. Metode pengujian laju korosi yang digunakan adalah metode Polarisation Tafel. Hasil pengujian nilai laju korosi secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Perbandingan laju korosi benda uji baja karbon GR X42 dapat digambarkan pada Gambar 5.8 dan 5.9 di bawah ini:



Gambar 5.8 Perubahan laju korosi benda uji yang di *rolling* pada suhu 550°C (Benda Uji F), 600°C (Benda Uji G) dan 650°C (Benda Uji H) terhadap benda uji yang tidak di deformasi (Benda Uji A).

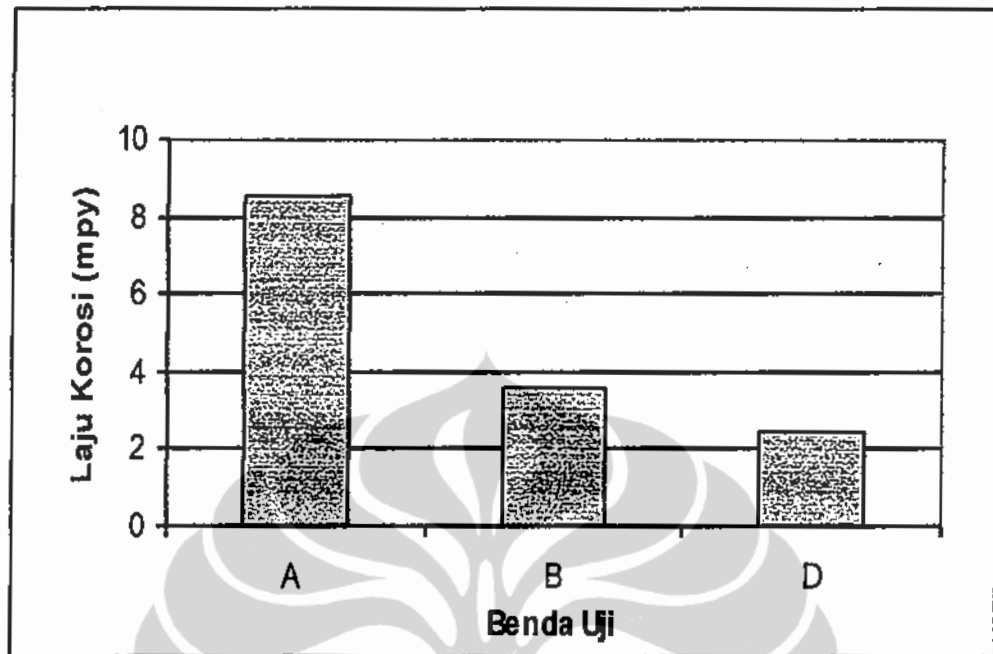


Gambar 5.9 Perbandingan laju korosi benda uji yang di *rolling* dengan deformasi 0,35 pada suhu 550°C (dengan dan tanpa pemanasan pada 1100°C).

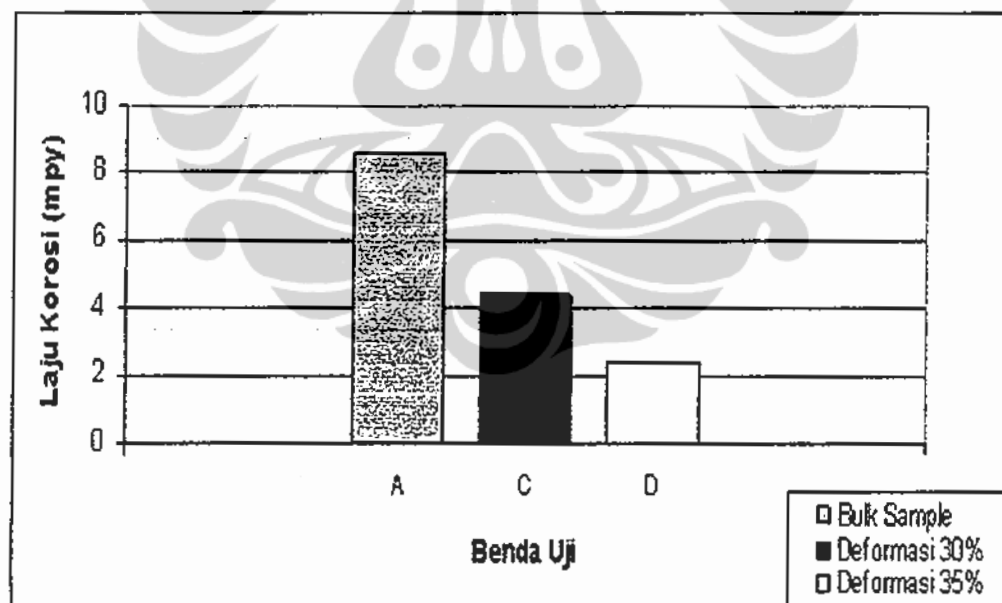
Ketahanan korosi suatu material dapat ditunjukkan melalui laju korosinya. Dari Gambar 5.8 kita dapat mengamati penurunan laju korosi benda uji F yang memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada benda uji awal yang tidak terdeformasi. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada bagian 5.3 proses deformasi pada benda uji F tidak menyebabkan ukuran butir ferit-nya berukuran lebih kecil dibanding benda uji awal. Dengan semakin besarnya ukuran butir maka jumlah batas butirnya semakin berkurang. Batas butir merupakan suatu daerah antarmuka antara butir yang satu dengan butir yang lain dengan arah kristalografi yang berbeda. Pada batas butir ini pula biasanya dislokasi terakumulasi. Batas butir memiliki tingkat energy yang lebih besar daripada butir sehingga daerah ini sangat rentan terjadi peristiwa korosi. Dengan ukuran butir yang lebih besar mengakibatkan batas butir menjadi berkurang sehingga laju korosi pun menjadi turun.

Namun fenomena pengaruh ukuran butir terhadap laju korosi seperti dijelaskan diatas tidak ditemukan pada benda uji yang lain. Secara umum laju korosi benda uji baik yang dideformasi pada suhu 550, 600, 650 dan 950°C lebih kecil dibandingkan laju korosi benda uji awal. Untuk ketahanan korosi benda uji B, C dan D yang mengalami pemanasan ulang hingga 1100°C (benda uji B) kemudian dideformasi 0,30 dan 0,35 di temperatur 950 °C, penurunan laju korosinya dapat dipahami melalui peningkatan keseragaman fasa dalam struktur mikro yang diperoleh melalui proses pemanasan pada temperatur tinggi. Fasa tunggal atau seragam memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan dengan multi fasa dikarenakan pada multi fasa akan terbentuk fasa yang bersifat anodik dan katodik sehingga dapat memicu korosi galvanik.





Gambar 5.10 Pengaruh deformasi terhadap laju korosi benda uji yang dipanaskan pada suhu  $\geq 950^{\circ}\text{C}$ .



Gambar 5.11 Pengaruh persen deformasi terhadap laju korosi benda uji yang dipanaskan pada suhu  $950^{\circ}\text{C}$ .

Untuk benda uji E (yang diperoleh pada proses deformasi 0,35 pada suhu 550°C tanpa pemanasan 1100°C), benda uji G dan H (yang diperoleh pada proses deformasi 0,35 pada suhu 600°C dan 650°C dengan pemanasan 1100°C), laju korosinya juga cenderung berkurang dibanding benda uji awal A (Gambar 5.8 dan 5.9). Hal ini juga mungkin dapat dipahami dari fasa struktur mikro yang terbentuk. Sehingga sekalipun ukuran butirnya lebih kecil daripada benda uji awal, namun fasa struktur mikronya mempengaruhi peningkatan ketahanan benda uji terhadap korosi.

Untuk penelitian lebih lanjut, disarankan untuk melihat hubungan keseragaman fasa benda uji terhadap ketahanan korosinya. Demikian juga dengan pengujian korosinya, perlu dilakukan verifikasi dengan pengujian korosi yang berbeda dengan penelitian ini untuk melihat kesesuaian peningkatan laju korosi dengan mengecilnya ukuran butir atau meningkatnya keseragaman fasa dalam struktur mikro.

#### 5.5. Hasil Pengamatan Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan terhadap benda uji sebelum dan sesudah deformasi. Dalam penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap butir ferit dan proses pembentukannya. Baja Karbon GR X42 memiliki struktur feritik – pearlitik dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut:

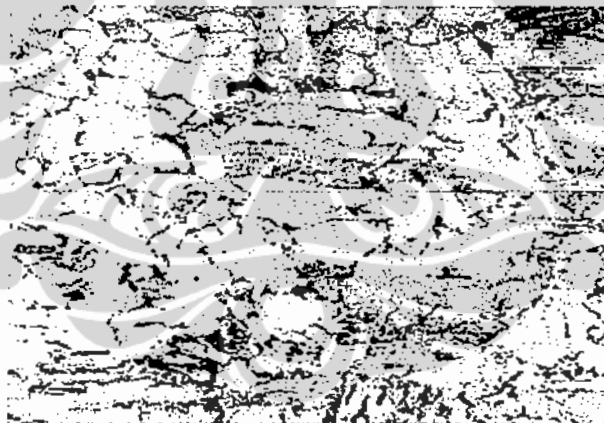


Gambar 5.12 Struktur mikro Baja Karbon GR X42.

Sementara Baja Karbon GR X42 yang diroll pada suhu 550°C dengan deformasi 0,35 dan didinginkan di udara, struktur mikronya sedikit terelongasi, struktur ferit – pearlitik masih mendominasi.



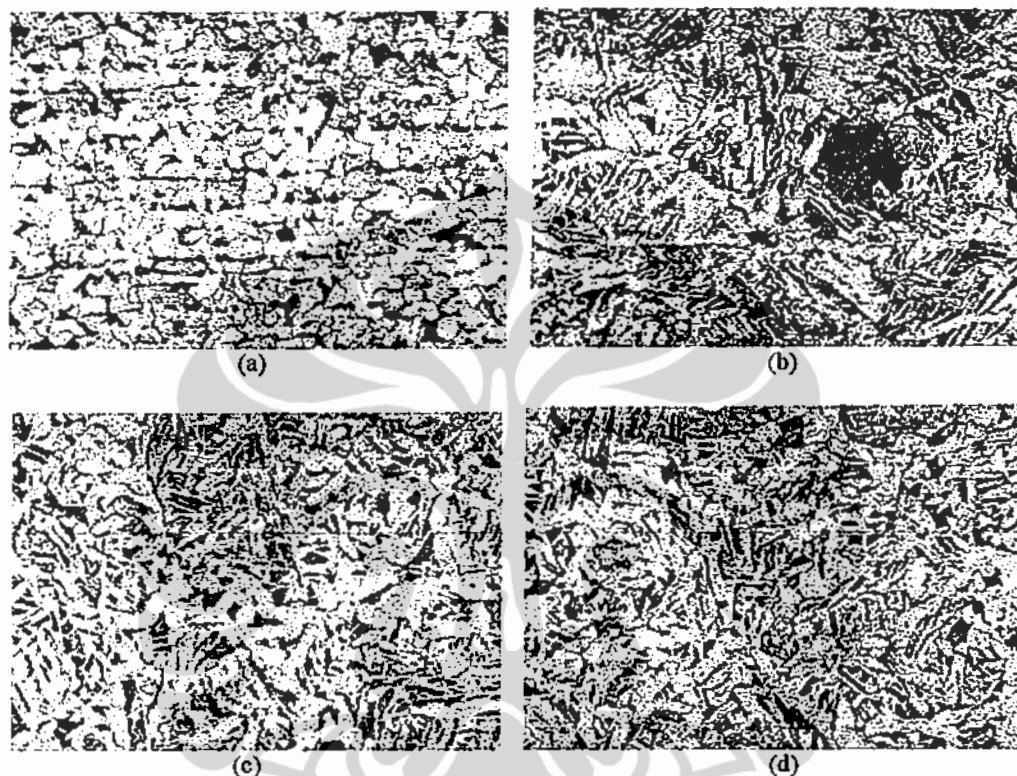
Gambar 5.13 Baja Karbon Gr X42 yang dipanaskan hingga 550°C dan di-roll dengan deformasi 0,35



Gambar 5.14 Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan pada 1100°C dan di roll pada 550°C dengan deformasi 0,35.

Baja Karbon GR X42 yang dipanaskan hingga 1100°C kemudian di roll pada suhu 550°C dengan deformasi 0,35 dan didinginkan di udara memiliki struktur yang lebih terelongasi dari pada Baja Karbon pada point satu dan dua. Bentuknya sedikit

*equiaxed* atau poligonal yang ditandai dari batas butirnya yang dipisah oleh batas kontinyu dan linier. Kelarutan karbon pada struktur ini kelihatan lebih tinggi jika dibanding dengan benda uji pada poin empat dibawah.



Gambar 5.15 Struktur mikro benda uji awal (A), benda uji yang dideformasi 0% pada suhu 1100°C (B), benda uji yang di rolling dengan deformasi 0,35 pada suhu 950°C (D) dan benda uji yang di rolling dengan deformasi 0,35 pada suhu 650°C (H).

Gambar (a) adalah struktur mikro benda uji awal (A); Gambar (b) adalah struktur mikro benda uji (B) yang dipanaskan hingga 1100°C, lalu didinginkan di udara; Gambar (c) adalah struktur mikro benda uji (D) yang dipanaskan hingga 1100°C, kemudian dideformasi 0,35 pada temperatur 950°C, lalu didinginkan di udara; dan Gambar (d) adalah benda uji (H) yang dipanaskan hingga 1100°C, kemudian dideformasi 0,35 pada suhu 650°C lalu didinginkan di udara.

Dari gambar diatas terlihat jelas transisi pembentukan struktur ferit Widmanstätten. Bentuk kristal ferit Widmanstätten yang terelongasi terlihat berwarna putih dan tidak terdapat substruktur didalam masing-masing kristalnya. Bagian yang berwarna gelap pada gambar tersebut adalah struktur martensite yang terbentuk selama proses pendinginan. Bentuk butirnya pipih dan panjang dan struktur menjadi sangat tidak teratur dibanding material awal.

Bentuk dan ukuran butir dapat mempengaruhi sifat mekanis dari material. Material dengan bentuk butir pipih atau memanjang sebagai hasil dari proses pengubahan struktur mikro (misalkan proses canai) memiliki nilai kekuatan lebih tinggi dibandingkan dengan material dengan bentuk butir bulat. Hal tersebut dikarenakan butir pipih hasil proses pengubahan bentuk memiliki tegangan sisa (*residual stress*) yang dapat meningkatkan kekuatan namun akan menurunkan keuletan. Butir yang pipih dan panjang tersebut memiliki tegangan sisa (*residual stress*) yang timbul saat proses canai yang berada di batas butir. Keberadaan tegangan sisa pada butir akan menghambat pergerakan dislokasi sehingga akan menyebabkan material menjadi lebih kuat dan lebih keras, namun keuletan (*ductility*) akan menurun.

## **5.6. Uji Ketangguhan Benda Uji Terhadap Penggetasan Hydrogen**

### **5.6.1. Data Hasil Uji Tarik**

Pengujian tarik dilakukan pada benda uji awal dan benda uji hasil proses canai pada temperatur 550, 600, 650 dan 950°C. Hasil pengujian tarik secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Lampiran 5.

Proses pengujian tarik pada benda uji dilakukan untuk mengetahui pengaruh masuknya hidrogen (*hydrogen charging*) terhadap kekuatan dan ketangguhan benda uji. Proses *hydrogen charging* dilakukan dengan menggunakan 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sebagai sumber hidrogen ditambah 100 ppm larutan Thiourea (CS[NH<sub>2</sub>]<sub>2</sub>) untuk mengurangi efek rekombinasi pada permukaan logam dan menggunakan rapat arus sebesar 1 mA/cm<sup>2</sup> selama 10 menit. Reaksi yang terjadi pada proses ini merupakan reaksi

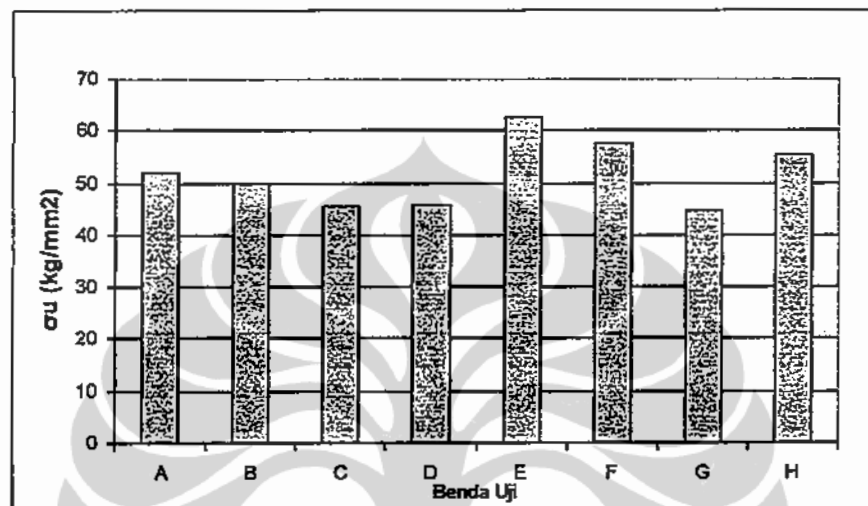
elektrokimia yang mereduksi ion hidrogen menjadi atom hidrogen yang kemudian karena reaktifitas dan ukurannya yang sangat kecil dapat berdifusi hingga ke kisi kristal dalam logam. Dari Gambar 2.7 dapat dilihat ruang-ruang kosong antara Fe dan C pada struktur FCC dan BCC yang dapat dimasuki disisipi oleh hidrogen.

Dari hasil pengujian tersebut terlihat sedikit penurunan kekuatan hingga spesimen D kemudian peningkatan kekuatan rata-rata teramati pada benda uji yang dirolling dengan deformasi 0,35 pada spesimen E hingga H. Peningkatan kekuatan akibat pemasukan hidrogen secara signifikan teramati pada benda uji yang mengalami rolling dengan deformasi 0,35 pada temperatur 550°C (dengan dan tanpa austenisasi) dan 650°C, namun persentase regangannya lebih rendah daripada benda uji A dan B yang tidak mengalami deformasi. Fenomena ini menjelaskan efek adsorpsi hidrogen kedalam logam yang kemudian menginisiasi penggetasan benda uji. Masuknya atom hidrogen ke dalam logam akan mengurangi gaya kohesi antar atom dalam logam tersebut. Dengan menurunnya gaya kohesif dari logam akan mengakibatkan semakin mudahnya logam mengalami kegagalan akibat hidrogen yang masuk dan mencapai konsentrasi kritis.

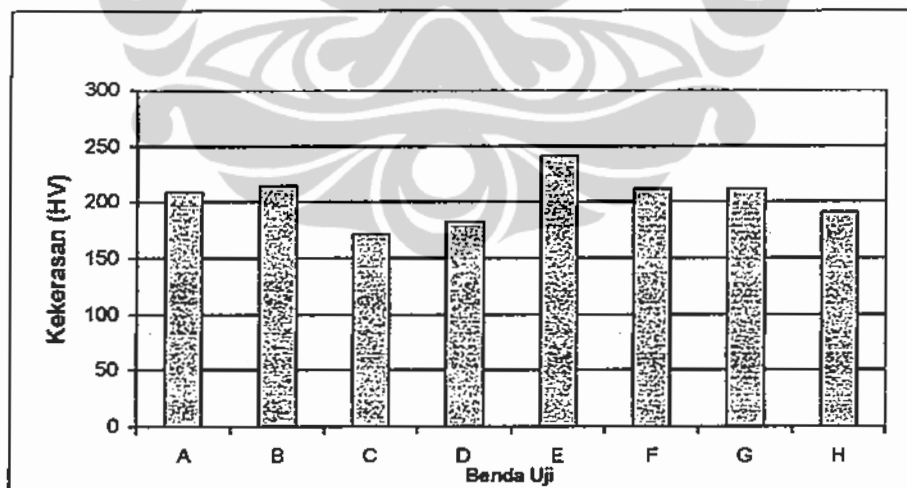
Selain itu terjadinya reaksi kombinasi atom hidrogen yang membentuk molekul  $H_2$  yang menghasilkan tekanan yang cukup untuk menginisiasi suatu retak. Dengan adanya inisiasi retak ini, saat benda uji dipapar dengan suatu pembebanan maka tegangan akan terkonsentrasi dan hal ini menurunkan kekuatan material.

Dari kurva 5.13, 5.14 dan 5.15 dibawah terlihat ketangguhan rata-rata benda uji yang mengalami deformasi di daerah austenit mengalami penurunan dibanding spesimen awal, sementara ketangguhan rata-rata benda uji yang mengalami deformasi di daerah ferit mengalami peningkatan dibanding dengan spesimen awal. Korelasi peningkatan kekuatan yang diperoleh dibandingkan dengan kecenderungan kekerasan yang dapat dilihat pada Gambar 5.14. Benda uji yang dideformasi pada temperatur 550, 600 dan 650°C memiliki kekerasan yang lebih rendah atau sama dengan kekerasan benda uji yang tidak dideformasi. Sehingga dapat disimpulkan kelarutan fasa mikro yang bersifat keras namun getas pada rentang temperatur deformasi ini

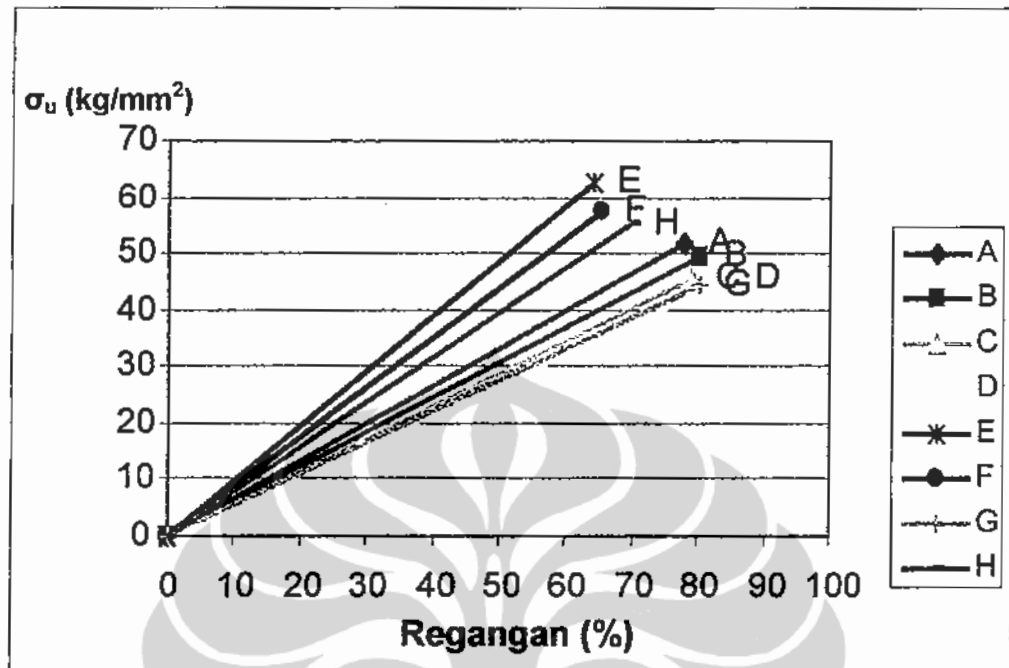
memberi kontribusi terhadap peningkatan kekuatan struktur ferit. Dikaitkan dengan bentuk struktur mikronya, struktur mikro austenite terlihat lebih memudahkan kelarutan hidrogen dibanding struktur mikro ferit. Bentuk butir ferit Widmanstätten mempersulit peningkatan konsentrasi dan kelarutan hidrogen di dalam struktur.



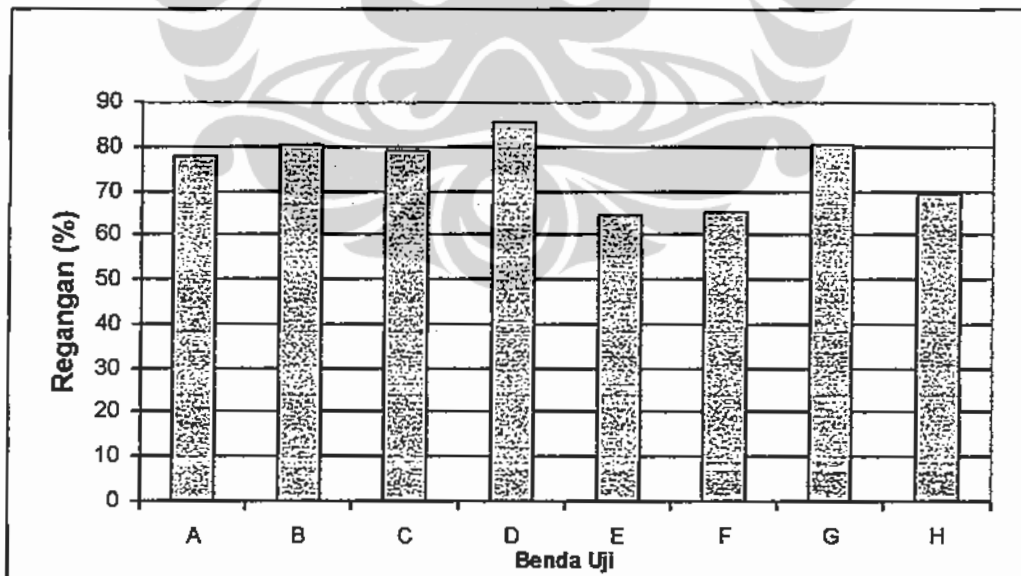
Gambar 5.16 Kurva perbandingan kekuatan benda uji awal (A) dengan yang dideformasi pada beragam temperatur (B, C, D, E, F, G dan H)



Gambar 5.17 Kurva perbandingan kekerasan benda uji awal (A) dengan yang dideformasi pada beragam temperatur (B, C, D, E, F, G dan H)



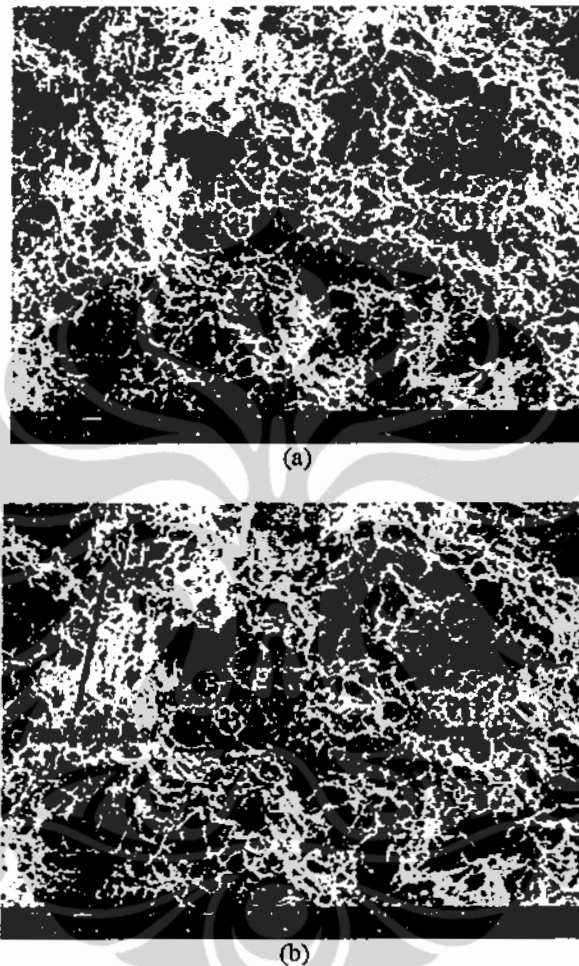
Gambar 5.18 Kurva kekuatan dan persen regangan benda uji awal (A) dan benda uji yang dideformasi pada beragam temperatur (B, C, D, E, F, G dan H)



Gambar 5.19 Kurva perbandingan persen regangan benda uji awal (A) dengan yang dideformasi pada beragam temperatur (B, C, D, E, F, G dan H)



### 5.6.2. Hasil Pengamatan Fraktografi



Gambar 5.20 Struktur mikro hasil analisa SEM dari permukaan patahan benda uji yang diperoleh melalui uji tarik setelah sebelumnya digetaskan dengan *hydrogen charging*.

Pengujian fraktografi (perpatahan) hasil uji tarik bertujuan untuk mengetahui sifat dari benda uji setelah mengalami proses pemasukan hidrogen. Sampel yang digunakan adalah sampel perpatahan hasil uji tarik baja karbon GR X42 yang sebelumnya mengalami proses canai pada temperatur 550, 600, 650 dan 950°C, kemudian dideformasi satu arah dengan persen deformasi 0,35. Benda uji yang putus

pada pengujian tarik dipotong, kemudian dibuat spesimen uji SEM yang memperlihatkan permukaan patahan daerah yang gagal. Hasil pengujian fraktografi dapat dilihat pada Gambar 4.22 hingga Gambar 4.29.

Dari hasil pengamatan fraktografi terlihat adanya bentuk *dimple* dan *cleavage* pada daerah permukaan retakan. Dimple terjadi akibat pemberian beban yang kemudian dapat mengakibatkan microvoid. Selanjutnya microvoid akan bertumbuh seiring dengan peningkatan tekanan dari hidrogen yang mengakibatkan kekuatannya berkurang. Pada permukaan perpisahannya juga ditemukan karakteristik patahan quasi cleavage (granular dan intergranular), yang merupakan gabungan patahan dari cleavage dan deformasi plastis. Quasi cleavage merupakan ciri patah getas dan menunjukkan pengaruh hidrogen dalam proses penggetasan material.

Difusi atom hidrogen ke dalam permukaan logam akan terjebak di dalam batas butir, dislokasi ataupun inklusi. Hidrogen tersebut akan terjebak di dalam void yang terdapat diantara batas butir. Dengan adanya reaksi rekombinasi dari atom hidrogen di dalam logam, maka atom hidrogen akan menjadi molekul gas hidrogen yang mempunyai internal pressure yang tinggi. Tingginya internal pressure dari molekul gas hidrogen yang terbentuk di dalam permukaan logam akan menyebabkan lemahnya energi kohesi dari logam. Hal ini dapat memudahkan penjalaran retakan sehingga patahan yang terbentuk menjadi patahan getas.

## BAB VI

### KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

1. Dari data hasil pengukuran besar butir ferit terdapat kecenderungan sebagai berikut: diameter butir yang lebih kecil dengan semakin tingginya suhu deformasi (*rolling*) yang diaplikasi. Diameter butir ferit yang di-*rolling* pada suhu 650°C dengan deformasi 0,35 adalah 28,3  $\mu\text{m}$ , lebih kecil daripada diameter butir ferit yang di-*rolling* dengan deformasi 0,35 pada suhu 600°C (yaitu 40  $\mu\text{m}$ ) dan diameter butir ferit yang di-*rolling* dengan deformasi 0,35 pada suhu 600°C lebih kecil daripada diameter butir ferit yang diperoleh melalui *rolling* pada suhu 550°C (yaitu 56,5  $\mu\text{m}$ ). Sementara diameter butir ferit yang di-*rolling* pada suhu 550°C tanpa pemanasan pada suhu 1100°C, yaitu 28,3  $\mu\text{m}$ , memiliki diameter butir yang lebih kecil dibandingkan benda uji yang di-*rolling* pada suhu yang sama tetapi dengan melalui pemanasan pada suhu 1100°C (yaitu 56,5  $\mu\text{m}$ ).
2. Butir ferit yang diperoleh melalui *rolling* pada suhu 600 dan 650°C cenderung membentuk struktur ferit Widmanstätten.
3. Pada pengukuran kekerasan mikro butir ferit, tingkat kekerasan benda uji yang di-*rolling* dengan deformasi 0,35 pada suhu 550°C cenderung meningkat hingga suhu 600°C, kemudian secara drastis menurun pada benda uji yang di-*rolling* dengan deformasi 0,35 pada suhu 650°C. Kekerasan mikro benda uji yang di-*rolling* pada suhu 550°C tanpa mengalami pemanasan pada suhu 1100°C, sekitar 241 Hv, jauh lebih tinggi dibanding dengan kekerasan benda uji yang di-*rolling* pada 550°C setelah proses pemanasan pada suhu 1100°C (yaitu 211 Hv).
4. Peningkatan kekerasan mikro juga teramati pada benda uji yang dipanaskan hingga 1100°C dan tidak mengalami di-*rolling*. Namun penurunan kekerasan

yang signifikan terjadi saat benda di-rolling pada suhu 950°C dengan deformasi 0,30 dan 0,35.

5. Laju korosi benda uji yang mengalami deformasi 0,35 pada suhu 550, 600, 650, dan 950°C secara umum berkurang dibandingkan benda uji awal. Laju korosi benda uji yang di-rolling pada suhu 550°C setelah melalui pemanasan pada suhu 1100°C diperoleh sekitar 5,470 mpy, lebih rendah dibanding dengan benda uji yang di-rolling pada suhu 550°C dan tanpa pemanasan 1100°C. Sementara laju korosi benda uji yang dideformasi 0,35 pada suhu 950°C lebih rendah daripada laju korosi benda uji yang di-rolling pada suhu yang sama namun dengan deformasi 0,30.
6. Peningkatan kekuatan akibat pemasukan hidrogen secara signifikan teramati pada benda uji yang mengalami rolling dengan deformasi 0,35 pada temperatur 550°C (dengan dan tanpa proses pemanasan pada suhu 1100°C) dan 650°C, namun persentase regangannya lebih rendah daripada benda uji awal yang tidak mengalami deformasi. Sementara kekuatan benda uji yang di deformasi 0,30 dan 0,35 di daerah temperatur austenit lalu dipapar dengan proses penggetasan hidrogen mengalami penurunan dibanding dengan benda uji awal.
7. Hasil pengamatan fraktografi dengan menggunakan SEM untuk benda uji yang mengalami *hydrogen charging* kemudian dilakukan pengujian tarik, patahan yang terjadi adalah *intergranular quasi cleavage* dan *transgranular quasi cleavage*.

**DAFTAR REFERENSI**

1. Edwin Scott, Jr., "*ASA Materials Market Digest*", www.asa.net, 2009, hal 1-6.
2. William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 6<sup>th</sup> ed., John Wiley & Son, Inc., 2003.
3. <http://www.keytometals.com/CorrosionofCarbonSteel> (21 Juni 2009).
4. R. Supardi, *Korosi dan Kegagalan yang Terjadi Pada Pengecatan Otomotif*, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Industri Logam dan Mesin, Departemen Perindustrian dan Perdagangan, Bandung, 2002.
5. Dong-Woo Suh, Chang-Seok Oh, Sung-Joon Kim, "*Limit of Ferrite Grain Refinement by Severe Plastic Deformation of Austenite*", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 36A, 2005, 1057 – 1059.
6. R. K. Brzuszek, P. C. M. Rodrigues, L. S. Motta, D. B. Santos, "*Microstructural Evolution of Ultra Fine Grained C-Mn Steel Warm Rolling and Intercritical Annealed*", *Mat. Res.* Vol. 5 No. 3, 2002.
7. *ASM Specialty Handbook, Carbon and Alloy Steel*, ASM International, 1996.
8. Nurul Hadi, *Pengaruh Ukuran Butir dan Pemberian Tegangan Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon Rendah Akibat Hydrogen Embrittlement*, Teknik Material ITB, 2008.
9. J. Zrník, J. Drnek, Z. Novy, S. V. Dobatkin, O. Stejskal, "*Structure Evolution During Severe Warm Plastic Deformation of Carbon Steel*", *Rev. Adv. Mater. Sci.* 10, 2005, hal. 45-53.
10. I. Kozasu, *Material Science and Technology*, Vol. 7, *Constitution and Properties of Steel* Ed by F. B. Pickering, VCH, 1993, hal. 184.
11. R. P. Anantatmula, J. R. Divine, *Corrosion of Low-Carbon Steel Under Environmental Conditions at Hanford: Two-Year Soil Corrosion Test Results*, Prepared for the U.S. Department of Energy Office of Environmental Restoration and Waste Management, 1995.

12. Jason S Lee, Richard I Ray, Edward J Lemieux, Alexander U Falster dan Brenda J Little, *An Evaluation of Carbon Steel Corrosion under Stagnant Seawater Conditions, Biofouling*, Vol. 20 (4/5), 2004, Hal: 237-247.
13. <http://www.kevtometals.com/CasificationofCarbonandLow-AlloySteels> (21 Juni 2009).
14. Toshiyasu Nishimura, *Corrosion resistance of Si-Al-bearing ultrafine-grained weathering steel*, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 9 (2008) 013005 (7pp).
15. Rafiq A. Siddiqui, Sabah A. Abdul-Wahab, Tasneem Pervez dan Sayyad Z. Qamar, *Hydrogen embrittlement in low carbon steel*, *Archives of Materials Science*, Vol. 28, No. 1-4, 2007.
16. Hisakichi Sunada, *Hydrogen Embrittlement of Warm Worked High Carbon Steel*, *Transactions ISIJ*, Vol. 28, 1988, hal 678-682.
17. Rahmat Saptono, *Pengetahuan Bahan 2008*, Departemen Metalurgi dan Material FTUI, 2008.
18. Joko Tri Wardoyo, *Metode Peningkatan Tegangan Tarik dan Kekerasan Pada Baja Karbon Rendah Melalui Baja Fasa Ganda*, *TEKNOIN*, Vol. 10 No. 3, 2005.
19. Nandyo Alpalmy, "Analisa Ukuran Butir Ferit Dan Laju Korosi Baja HSLA 0,029% Nb Setelah Canai Panas." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2008.
20. <http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/info/fundroll/fundroll.htm> (27 Mei 2010).
21. George Krauss, *Steels: Processing, Structure and Performance*, ASM International, The Materials Information Society, Ohio, 2005.
22. Shiro Imai, *Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, May 26 31, 2002. "General Properties of TMCP Steels"*. Plate Technical Dept., Nippon Steel Corporation. Tokyo Japan. ISBN 7-880653-58-3 (Set); ISSN 1098-6189 (Set).

23. John Dryden, "Controlled Rolled XLERPLATE® - Strong, Tough and Weldable" dari [www.bluescopesteel.com.au/go/news/controlled-rolled-xlerplate-strongtough-and-weldable](http://www.bluescopesteel.com.au/go/news/controlled-rolled-xlerplate-strongtough-and-weldable) (3 Desember 2008).
24. Joanne Nicholas, "What are TMCP (Thermo-Mechanically Controlled Processed) steels?" Copyright © 2000, TWI Ltd. Diakses 2 Des. 2008 <http://www.twi.co.uk/content/faqimn002.html>.
25. Tomoyuki Yokota, *Ferrite Grain Size Refinement Through  $\gamma \rightarrow \alpha$  Transformation*, NKK Corp. (JFE group).
26. Yajima et al., 'Extensive Application of TMCP-manufactured High Tensile Steel Plates to Ship Hulls and Offshore Structures', Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol 24 No. 1, February 1987.
27. Anita Juliawatri. "Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Besar Butir Austenit Prior pada Baja HSLA 0.029%Nb Hasil Coran Kontinu Selama Pemanasan Isothermal." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2002.
28. ASM Specialty Handbook, *Carbon and Alloy Steel*, (ASM International, 1996).
29. Uhlig H., *Corrosion and Corrosion Control* (3<sup>rd</sup> edition), Wiley, New York, 1985.
30. Fontana, Mars G., *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, 1986.
31. Denny A. Jones. *Principles and Prevention of Corrosion*. (New York: Mcmillan, 1991).
32. Dwi Sapdiyanto, "Pengaruh Perlakuan Panas Pengerasan terhadap Kekerasan dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah pada Tabung Gas Elpiji." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 1996.
33. Thomas J. C. Eun, *Hydrogen Damages in Oil Refinery and Petroleum Plants*, Keyano College Suncor Energy, 2005.
34. M. B. Ndaliman, "An Assessment of Mechanical Properties of Medium Carbon Steel under Different Quenching Media", Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology Minna, Nigeria, 2006, hal 100-104.

35. Gye-Won Hong, Jay-Young Lee, "*The Interaction of hydrogen and the Cementite-Ferrite Interface in Carbon Steel*", *Journal of Materials Science* 18, 1983, hal 271-277.
36. Y. Estrin, M. Janecek, G. I. Raab, R. Z. Valiev, A. Zi, "*Severe Plastic Deformation as a Means of Producing Ultra-Fine-Grained Net Shaped Micro Electro-Mechanical Systems Parts*", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38A, 2007, 1906 – 1909.
37. S. Dobatkin, J. Zmik, I. Mamuzik, "*Mechanical and Services Properties of Low Carbon Steels Processed by Severe Plastic Deformation*", *Metalurgia* 48 (2009) 3, hal. 157-160.
38. W.J. Pollock, *Hydrogen Embrittlement of Cadmium-Plated Ultra High Strength Steels in Paint Strippers*, Department of Defence, Defence Science and Technology Organisation, Aeronautical Research Laboratories, Melbourne, Victoria, 1984.
39. Jozef Zmik, Sergei V. Dobatkin, Ondrej Stejskal, *Effect of thermomechanical conditions on ultrafine grained structure formation in carbon steels by severe plastic deformation*, 2008.
40. Jianhong Li, Pingguang Xu, Yo Tomota, Yoshitaka Adachi, *Dinamic Recrystallization Behavior in a Low-carbon Martensite Steel by Warm Compression*, *ISIJ International*, Vol 48 (2008), hal. 1008 – 1013.
41. Hyun Uk Hong, Jong Bong Lee, Ho Jin Choi, *Improvement of Resistance to Hydrogen Induced Cracking in Electric Resistance Welded Pipes Fabricated with Slit Coils*, *Met. Mater. Int.*, Vol. 15, No. 1 (2009), pp. 133-139.
42. T. Hara, H. Asahi & H. Ogawa, *Conditions of Hydrogen-Induced Corrosion Occurrence of X65 Grade Line Pipe Steels in Sour Environments*, *CORROSION*—Vol. 60, No. 12, 2004, Hal: 1113 – 1121.
43. Gunawan Dwi Haryadi, *Pengaruh Suhu Tempering Terhadap Kekerasan Struktur Mikro dan Kekuatan Tarik pada Baja K-460*, *ROTASI*, Volume 7 No 3, 2005.



44. Wang Keun Kim, Seong Ung Koh, Boo Young Yang & Kyoo Young Kim, *Effect of Environmental and Metallurgical Factors on Hydrogen Induced Cracking of HSLA Steels*, Corrosion Science Vol. 50, 2008 Hal: 3336 – 3342.
45. Helmy, Penggetasan Hydrogen Pada Baja AISI 4437, Teknik Material ITB, 2004



## LAMPIRAN

- |                   |                                    |
|-------------------|------------------------------------|
| <b>Lampiran 1</b> | Sertifikat Pabrik Dari Baja GR X42 |
| <b>Lampiran 2</b> | Kurva Temperatur Proses Rolling    |
| <b>Lampiran 3</b> | Kurva Tafel Pengukuran Laju Korosi |
| <b>Lampiran 4</b> | Kuva Pengukuran Uji Tarik          |









**LAMPIRAN 2**

**Kurva Temperatur Proses Rolling**

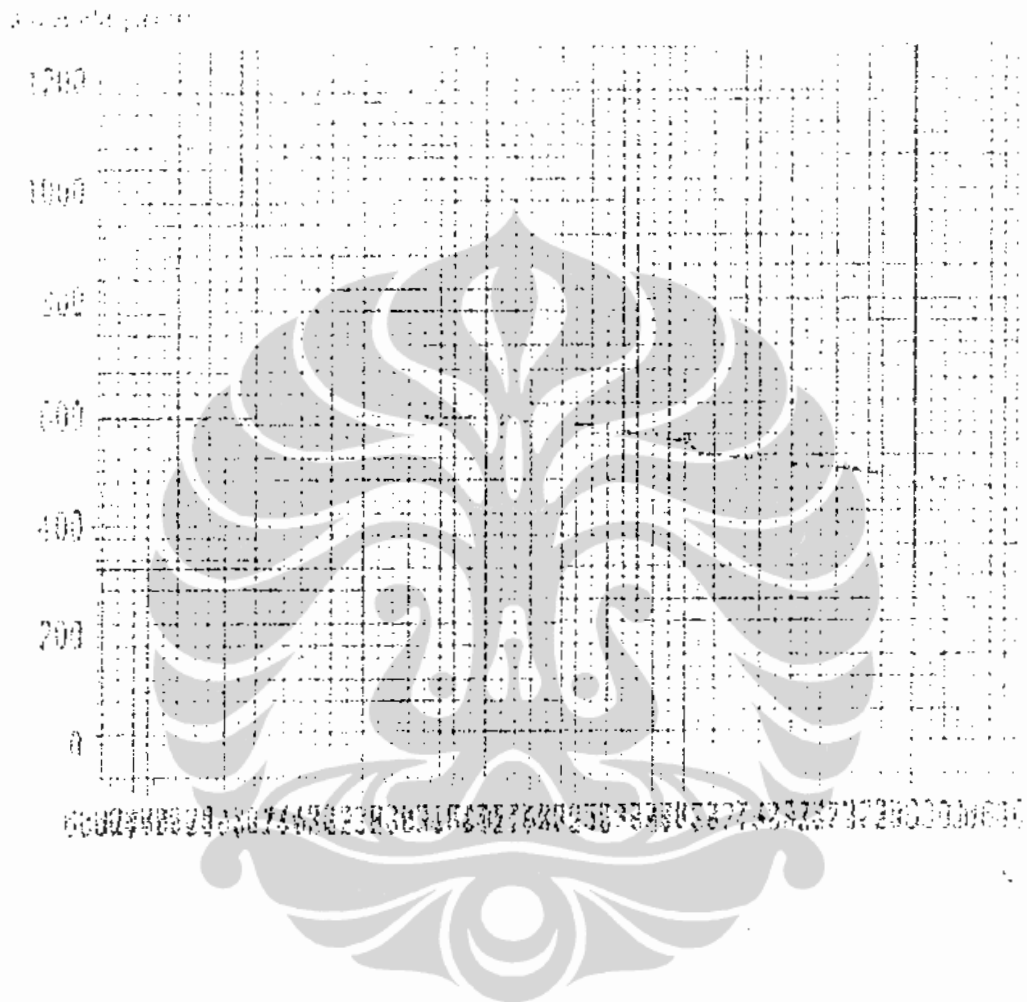
**1. Proses Deformasi Benda Uji C (0-1100-950°C; deformasi 30%)**



## 2. Proses Deformasi Benda Uji D (0-1100-950°C; deformasi 35%)

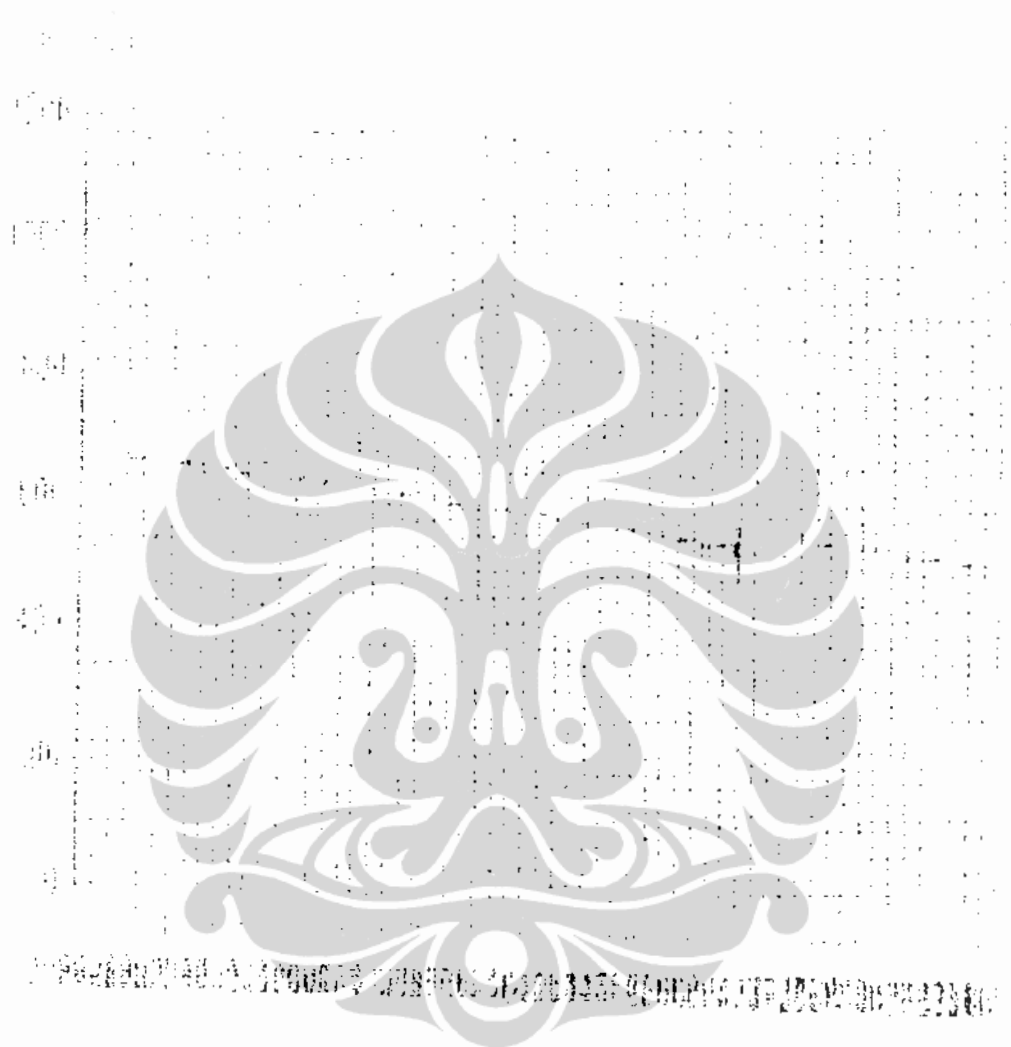


### 3. Proses Deformasi Benda Uji E (0-550°C; deformasi 35%)

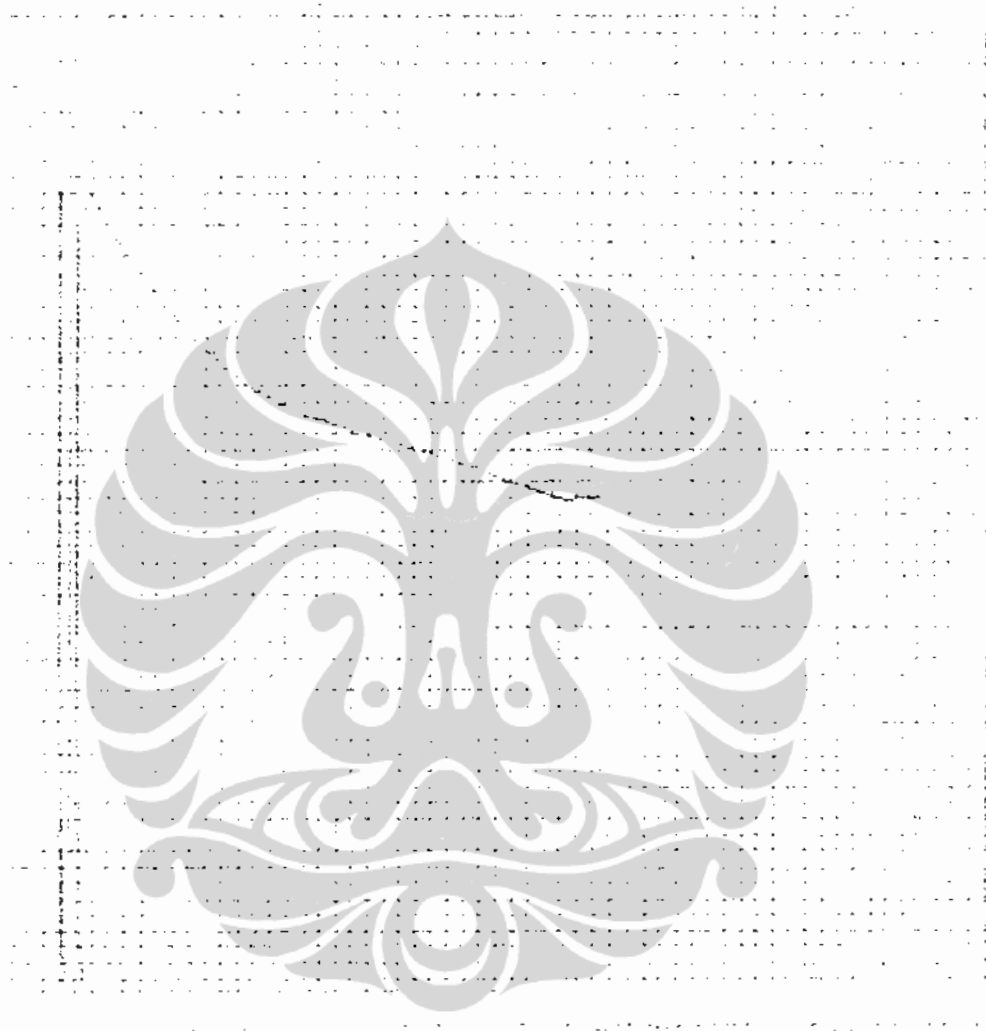




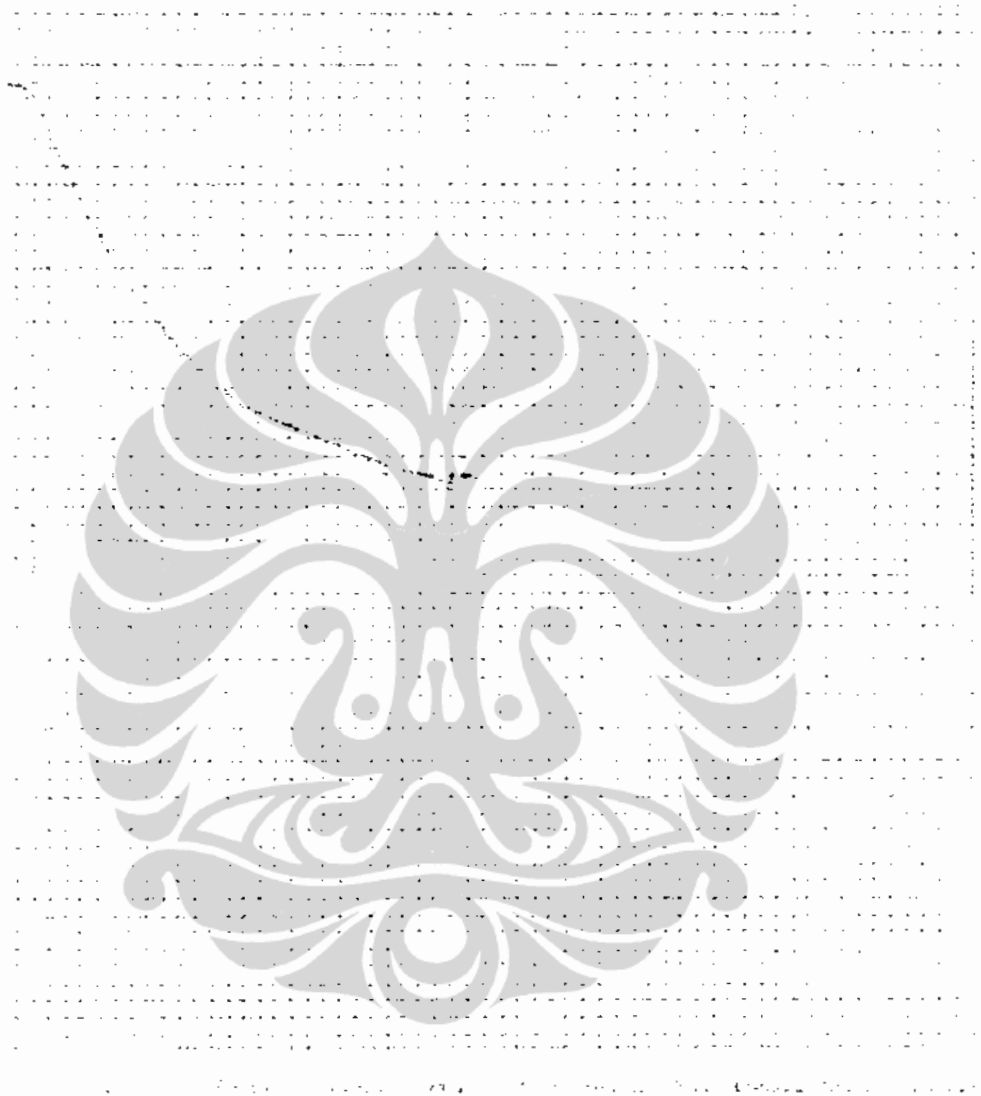
#### 4. Proses Deformasi Benda Uji F (0-1100-550°C; deformasi 35%)



### 5. Proses Deformasi Benda Uji G (0-1100-600°C; deformasi 35%)



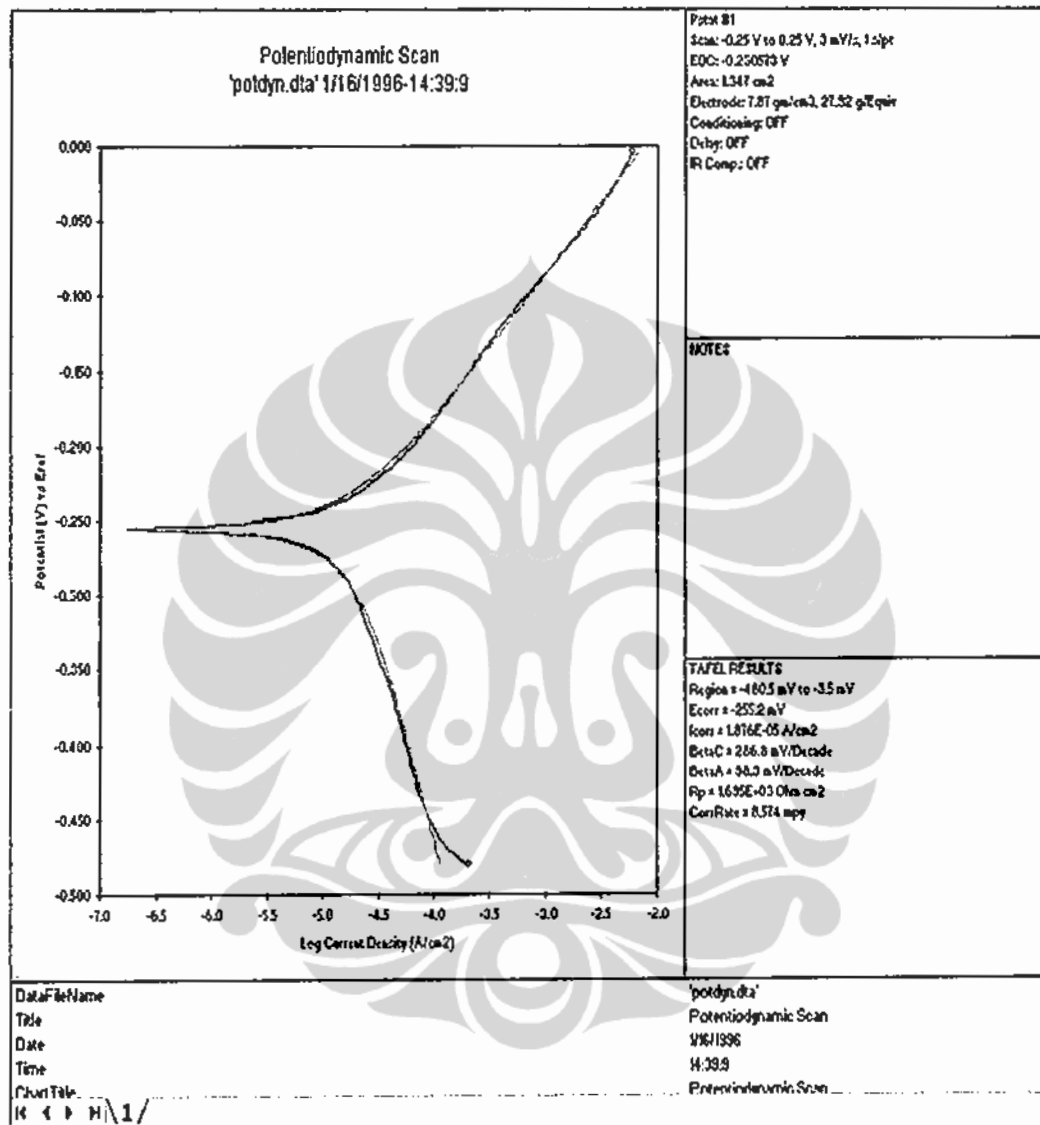
## 6. Proses Deformasi Benda Uji H (0-1100-650°C; deformasi 35%)



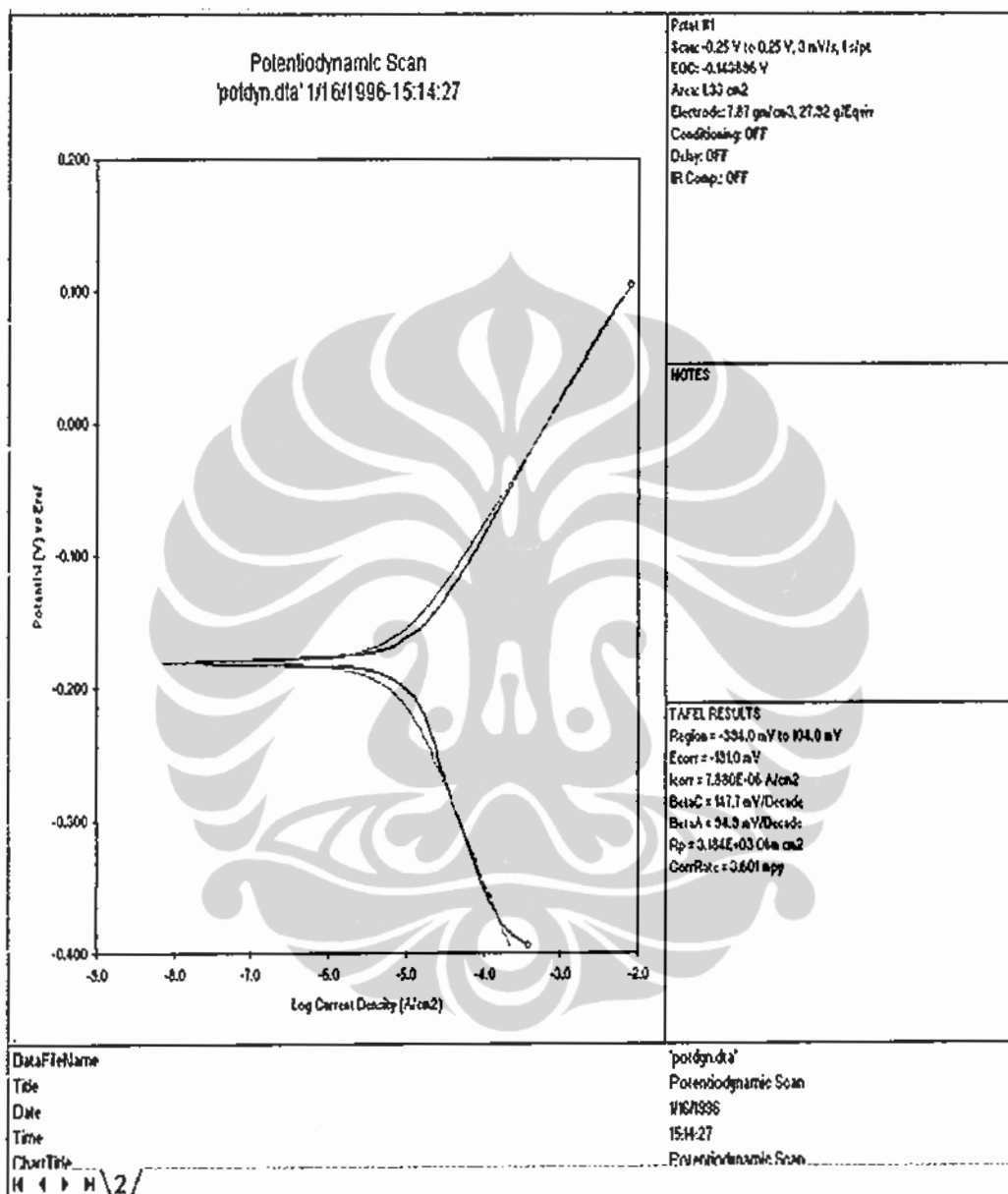


Universitas Indonesia

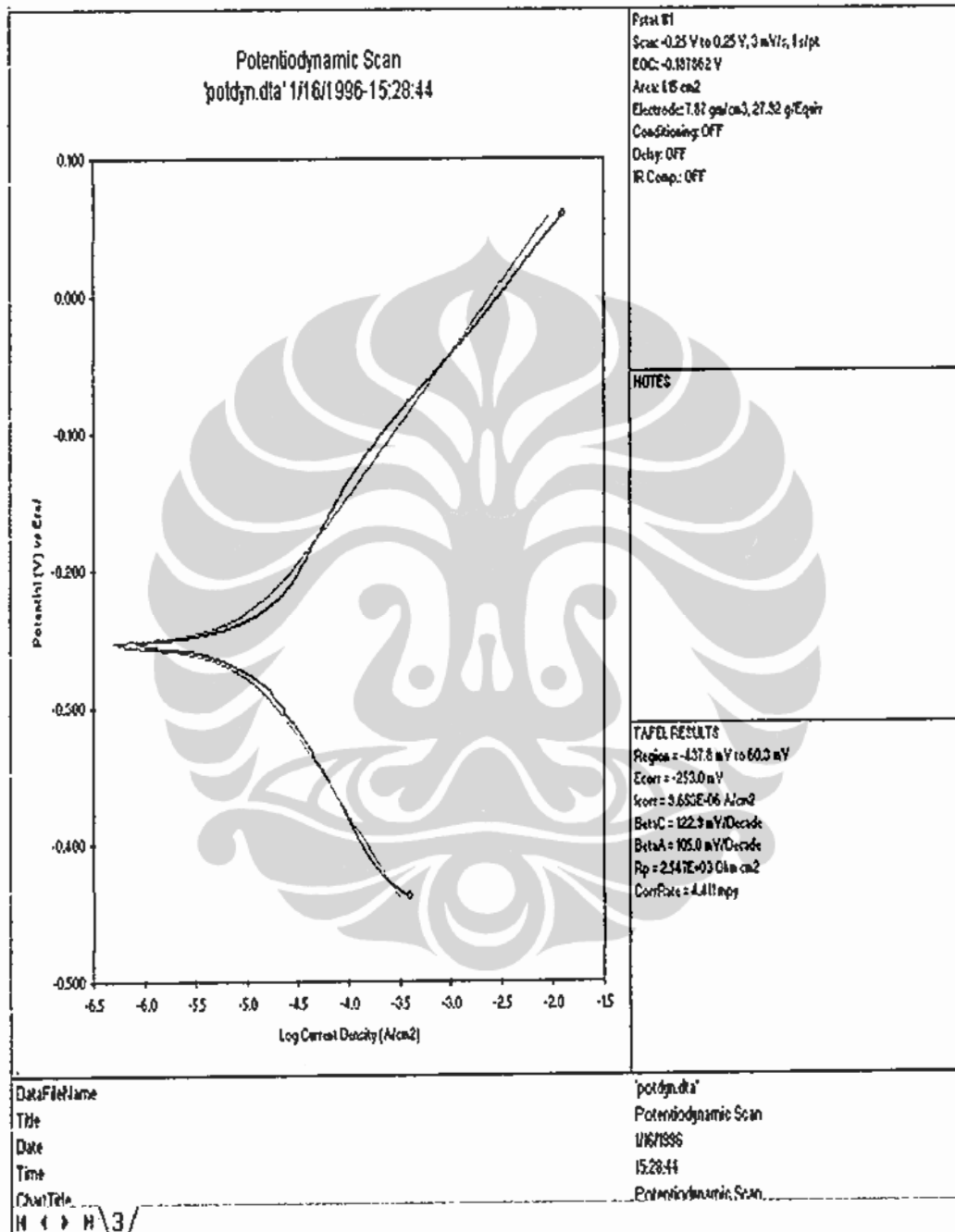
### 1. Kuva Polarisasi Benda Uji A (Bulk Sample)



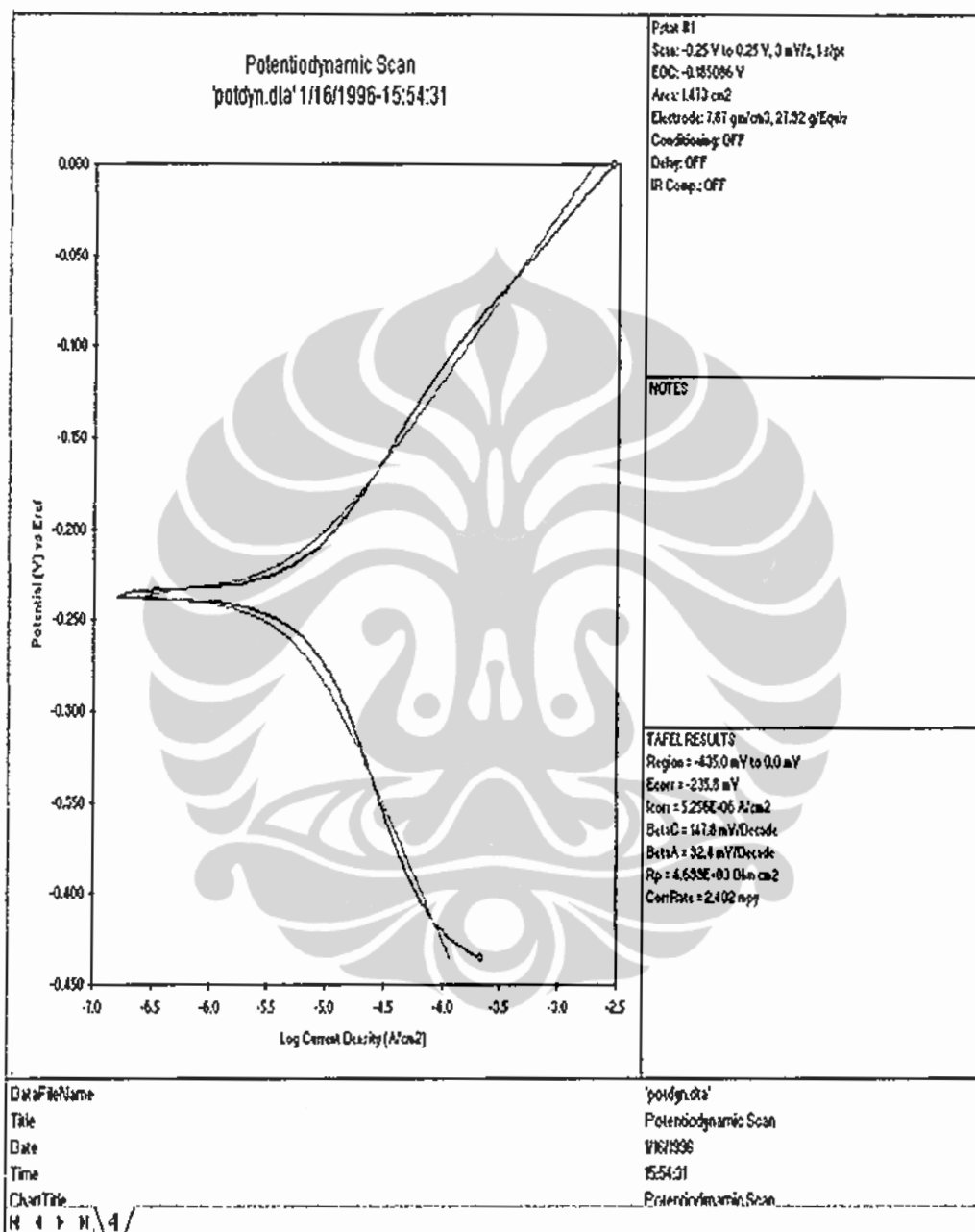
## 2. Kuva Polarisasi Benda Uji B (0-1100°C)



### 3. Kuva Polarisasi Benda Uji C (0-1100-950°C; deformasi 30%)

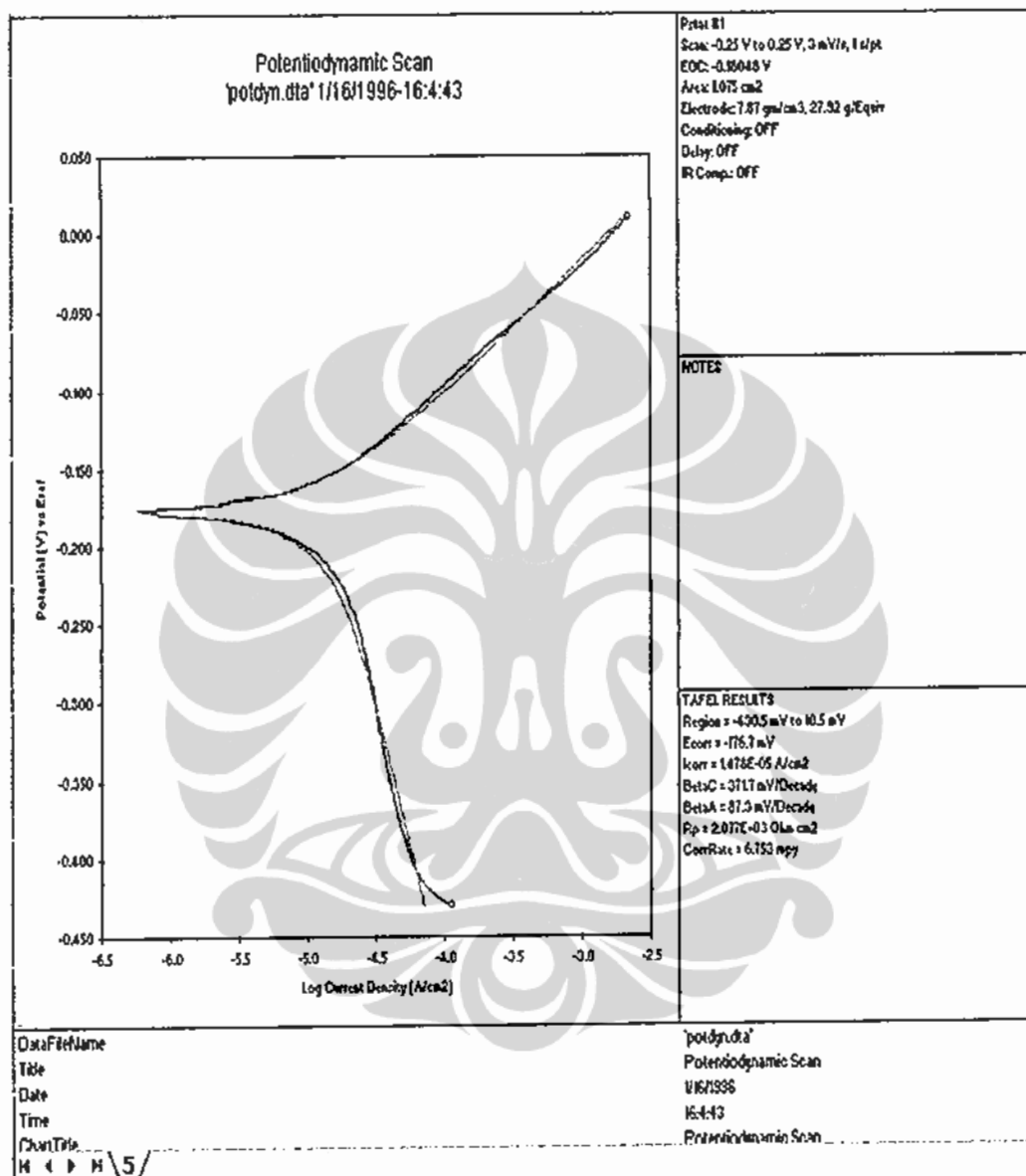


#### 4. Kuva Polarisasi Benda Uji D (0-1100-950°C; deformasi 35%)

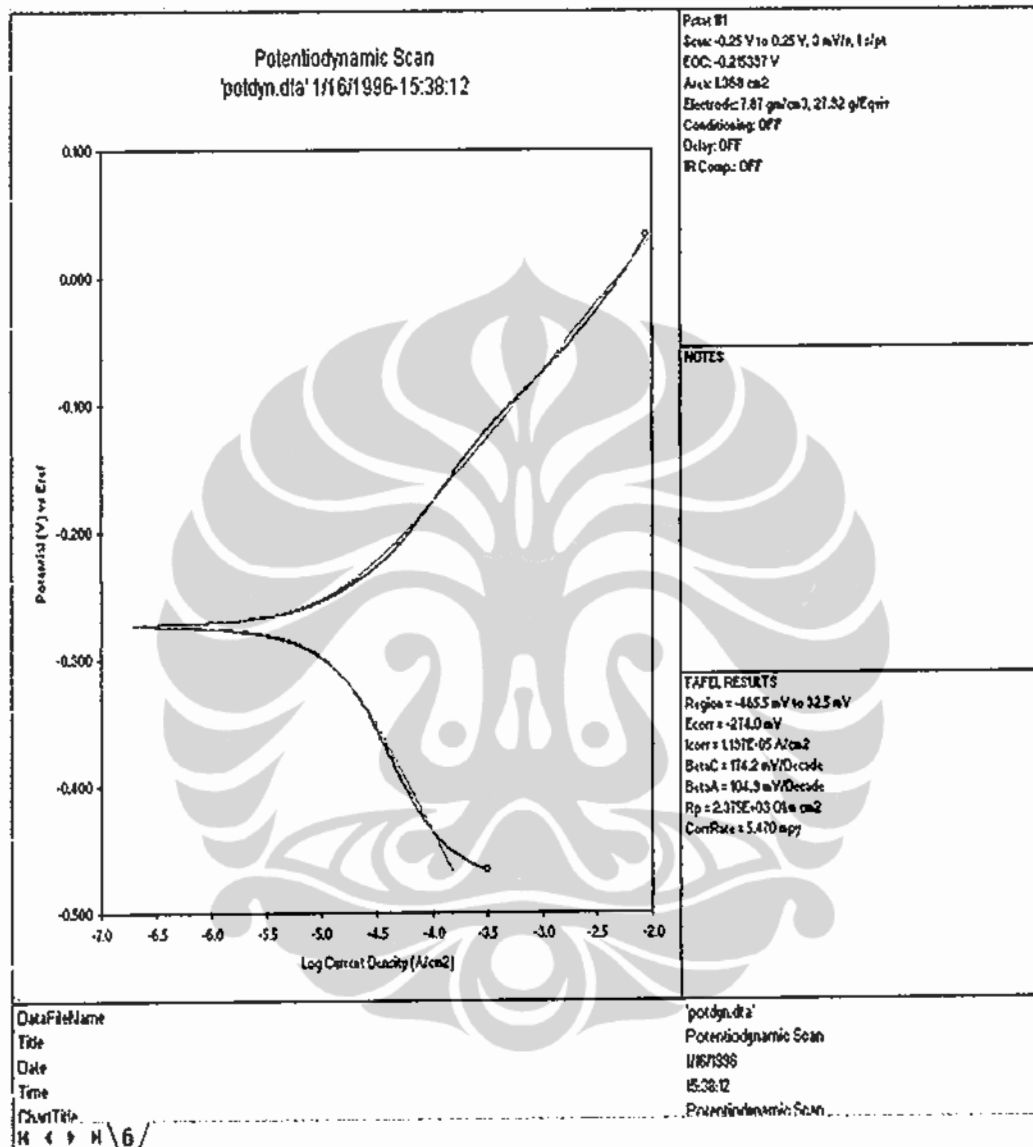




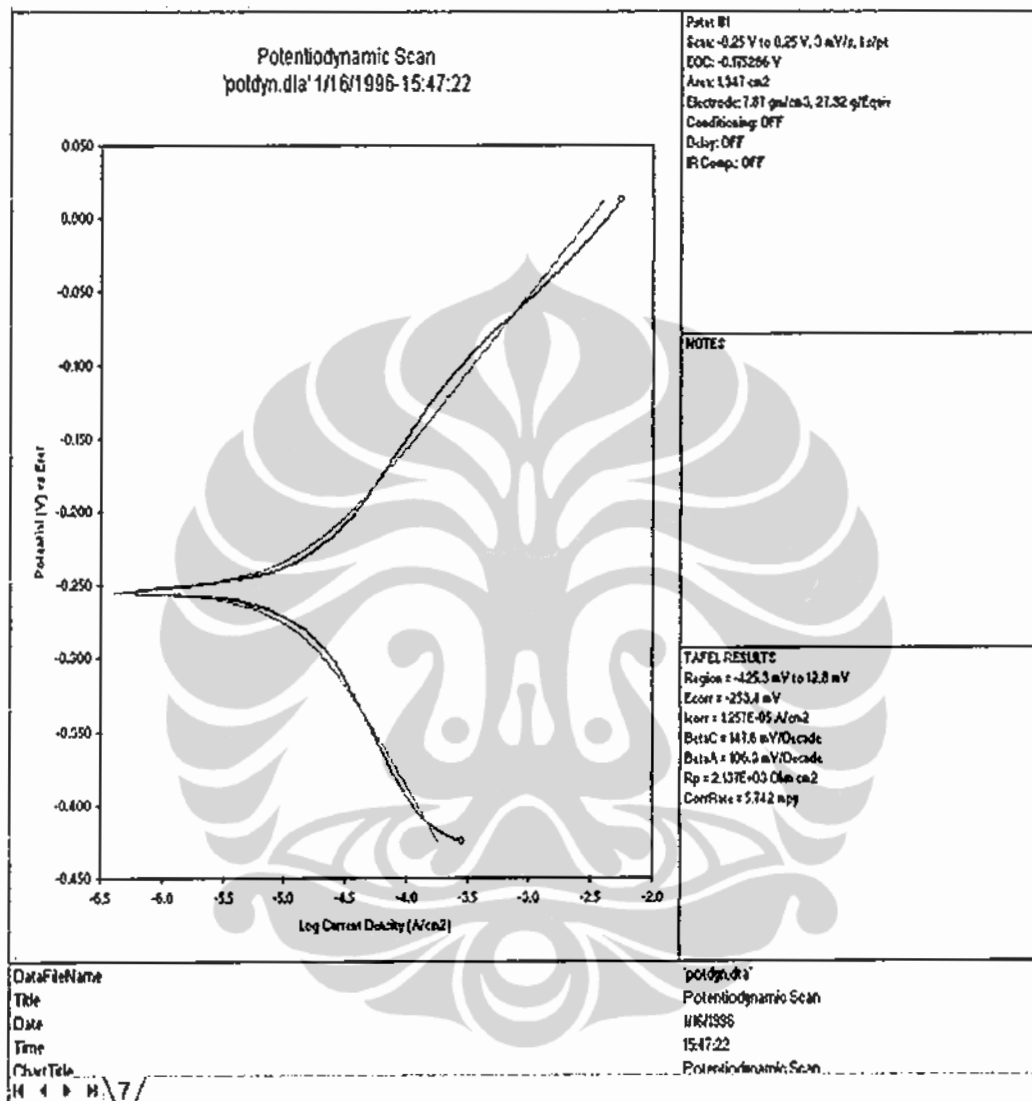
### 5. Kuva Polarisasi Benda Uji E (0-550°C; deformasi 35%)



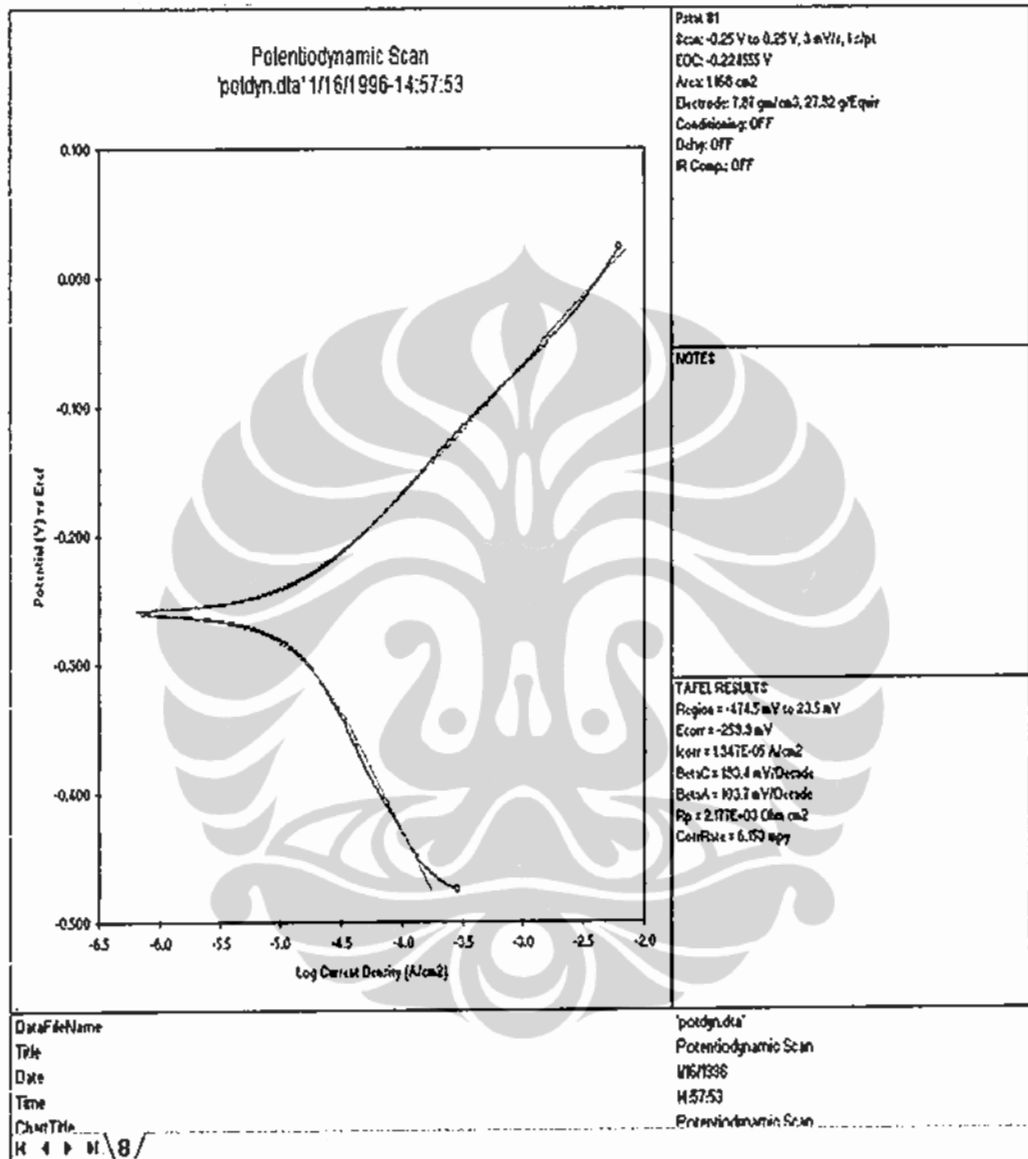
### 6. Kuva Polarisasi Benda Uji F (0-1100-550°C; deformasi 35%)



### 7. Kuva Polarisasi Benda Uji G (0-1100-600°C; deformasi 35%)

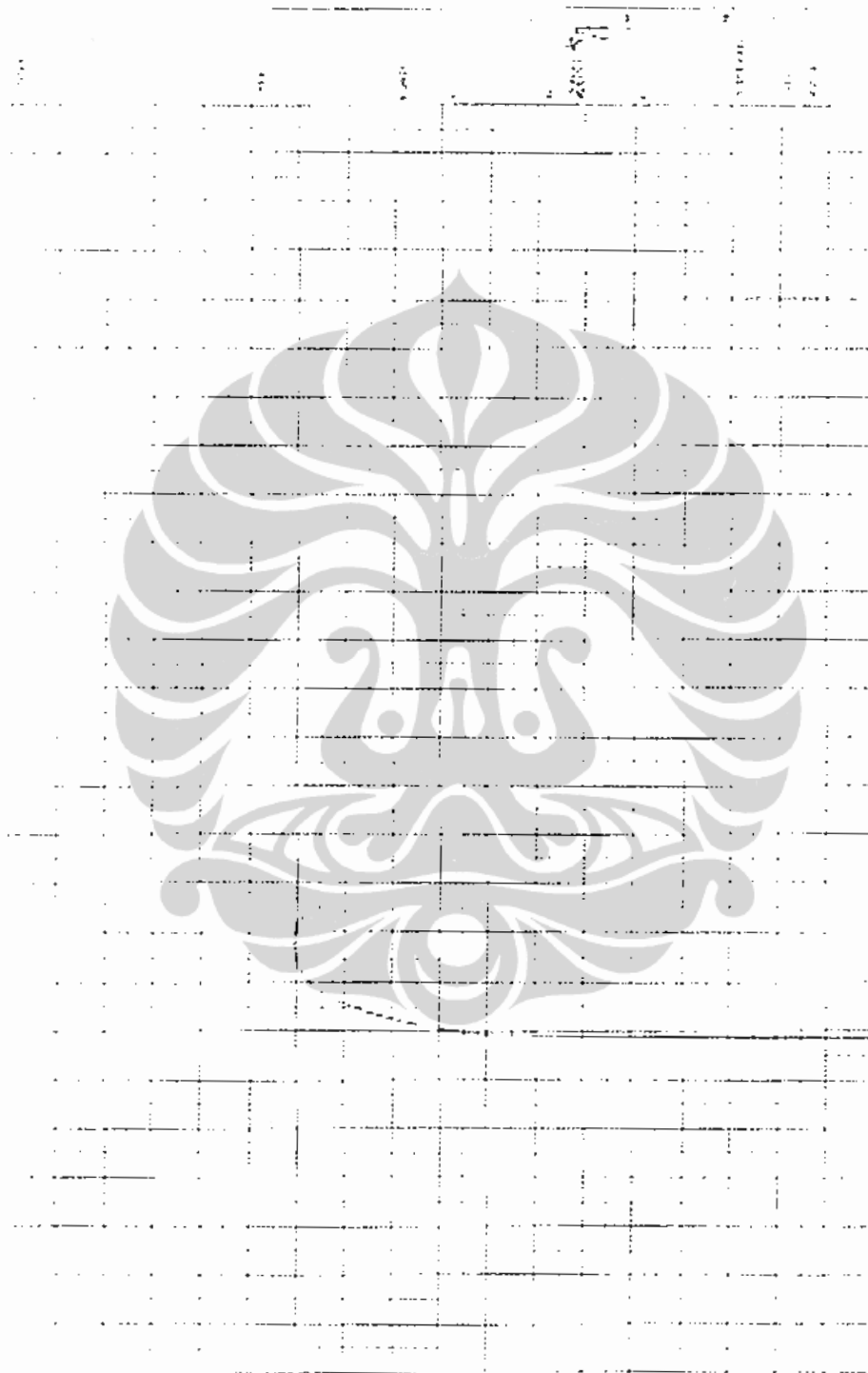


### 8. Kuva Polarisasi Benda Uji H (0-1100-650°C; deformasi 35%)

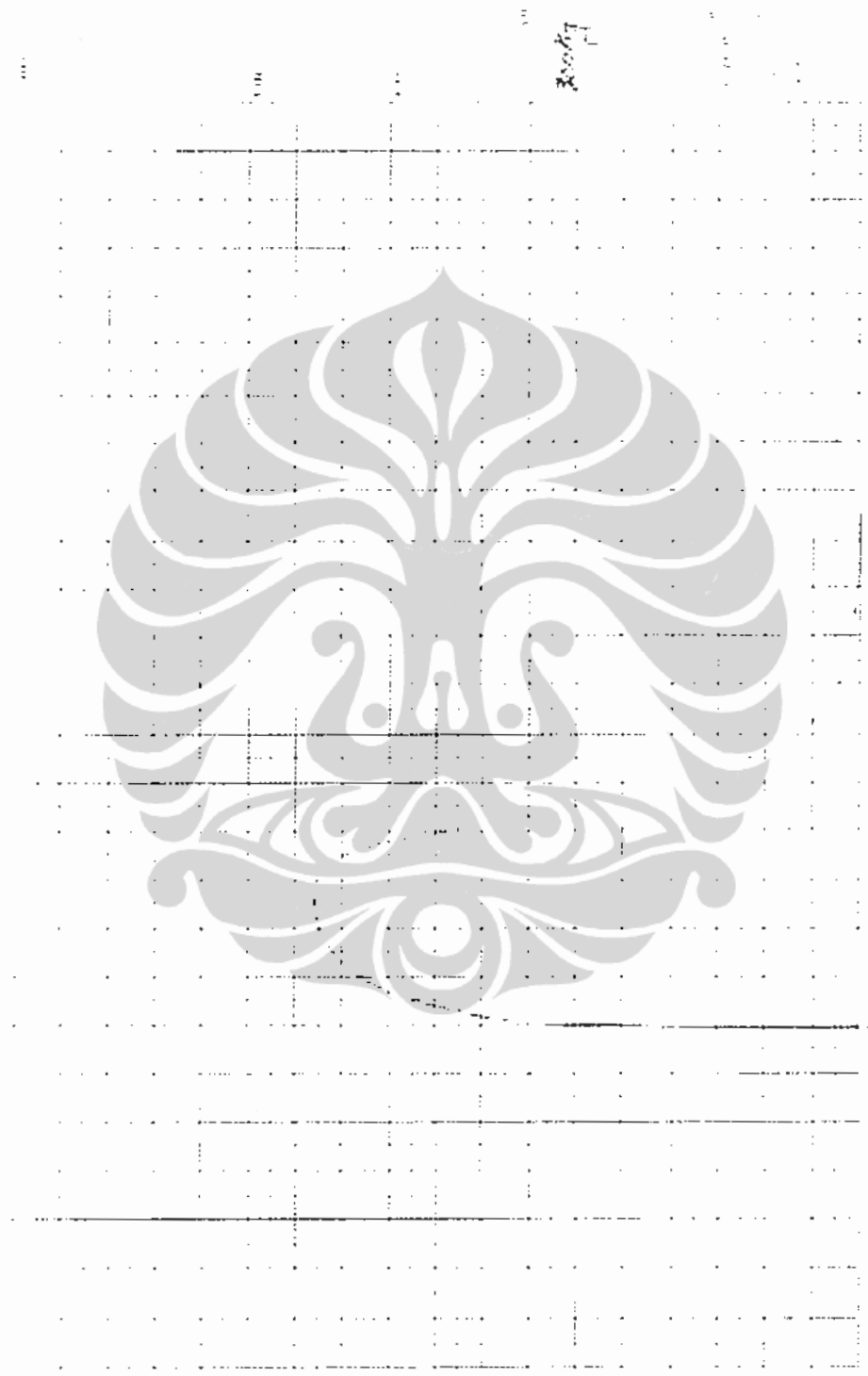




### 1. Kurva Uji Tarik Spesimen A (*Bulk Sample*)

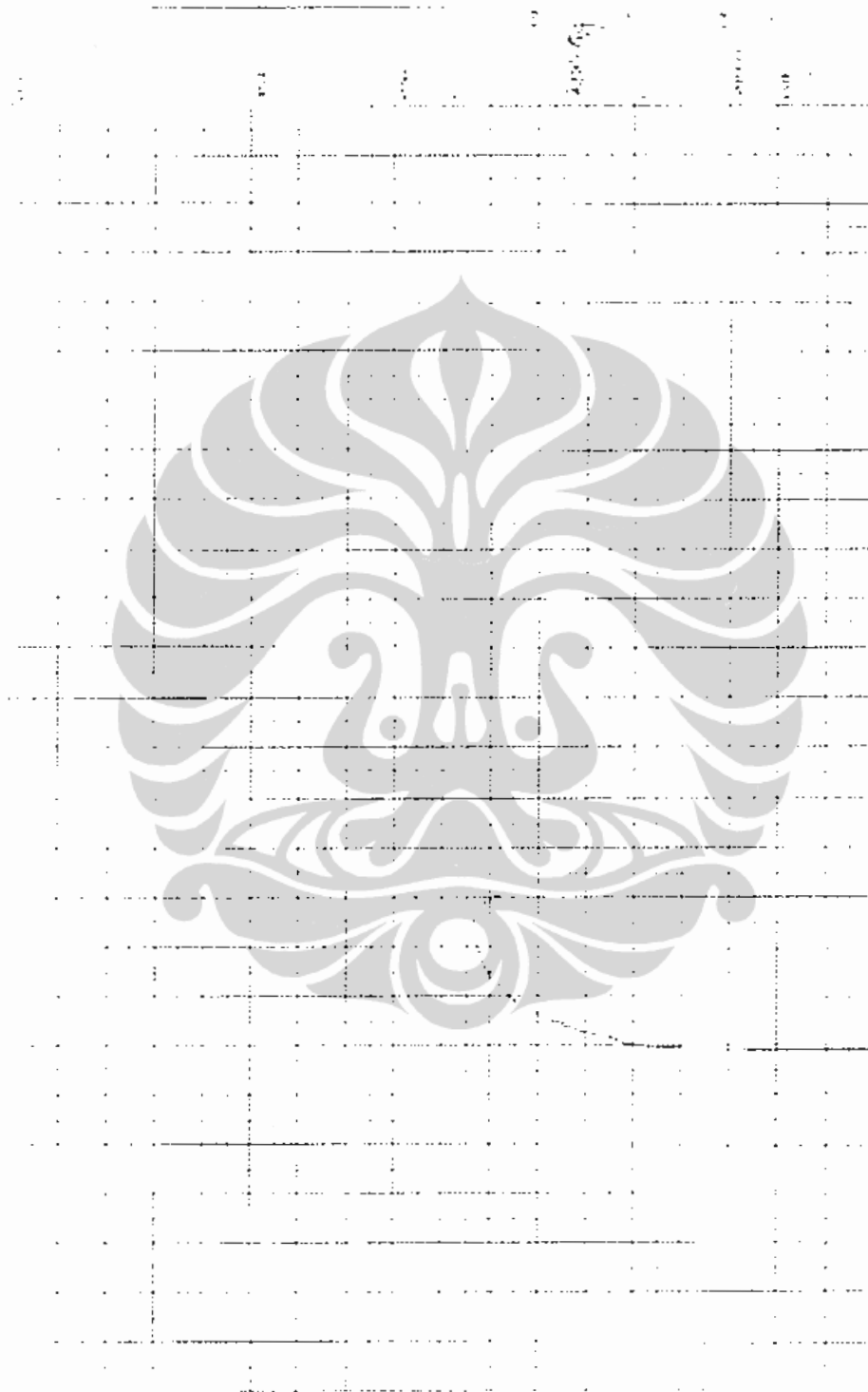


## 2. Kurva Uji Tarik Spesimen B (0-1100°C)



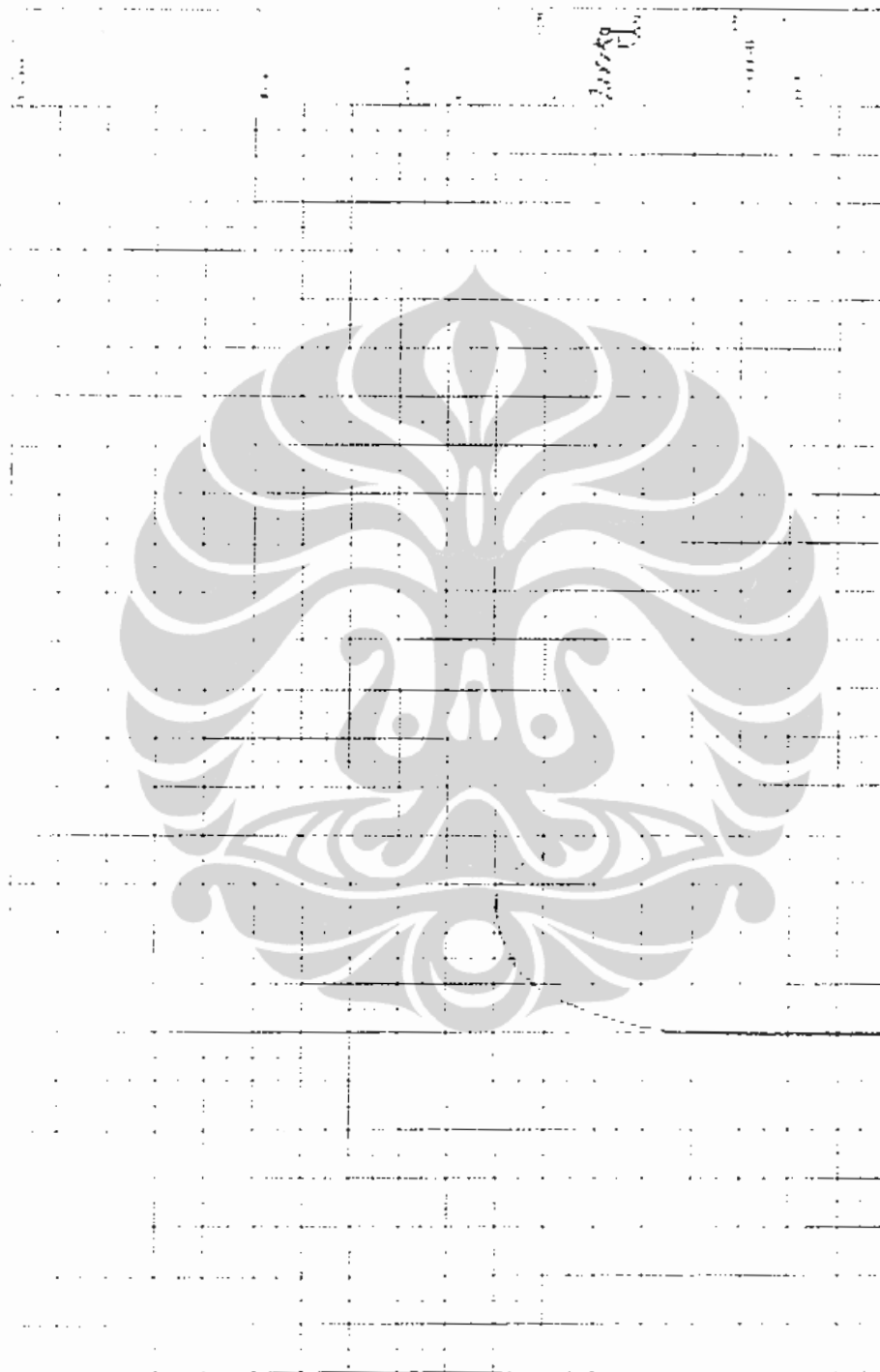
DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

### 3. Kurva Uji Tarik Spesimen C (0-1100-950°C; deformasi 30%)

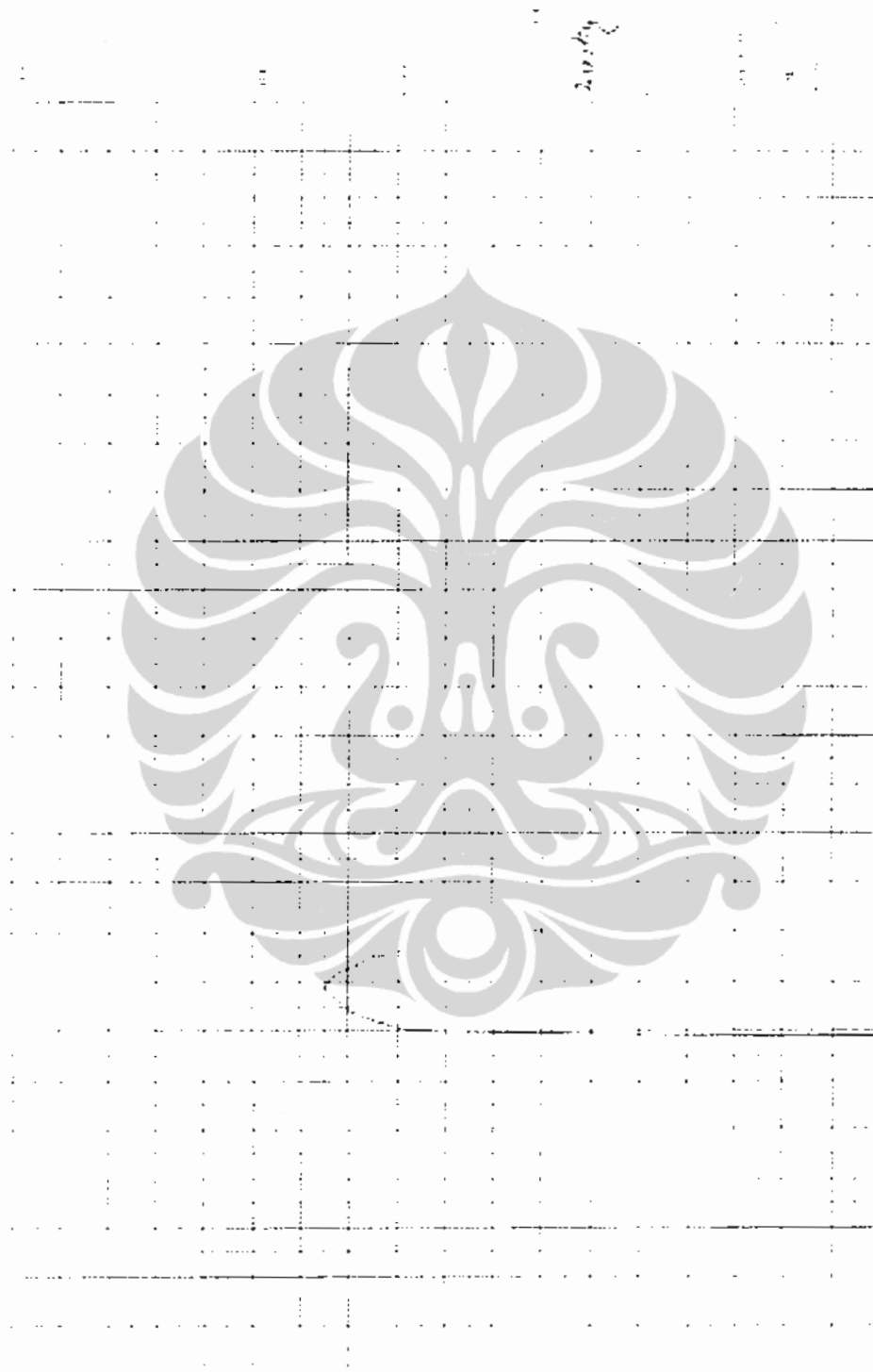




#### 4. Kurva Uji Tarik Spesimen D (0-1100-950°C; deformasi 35%)

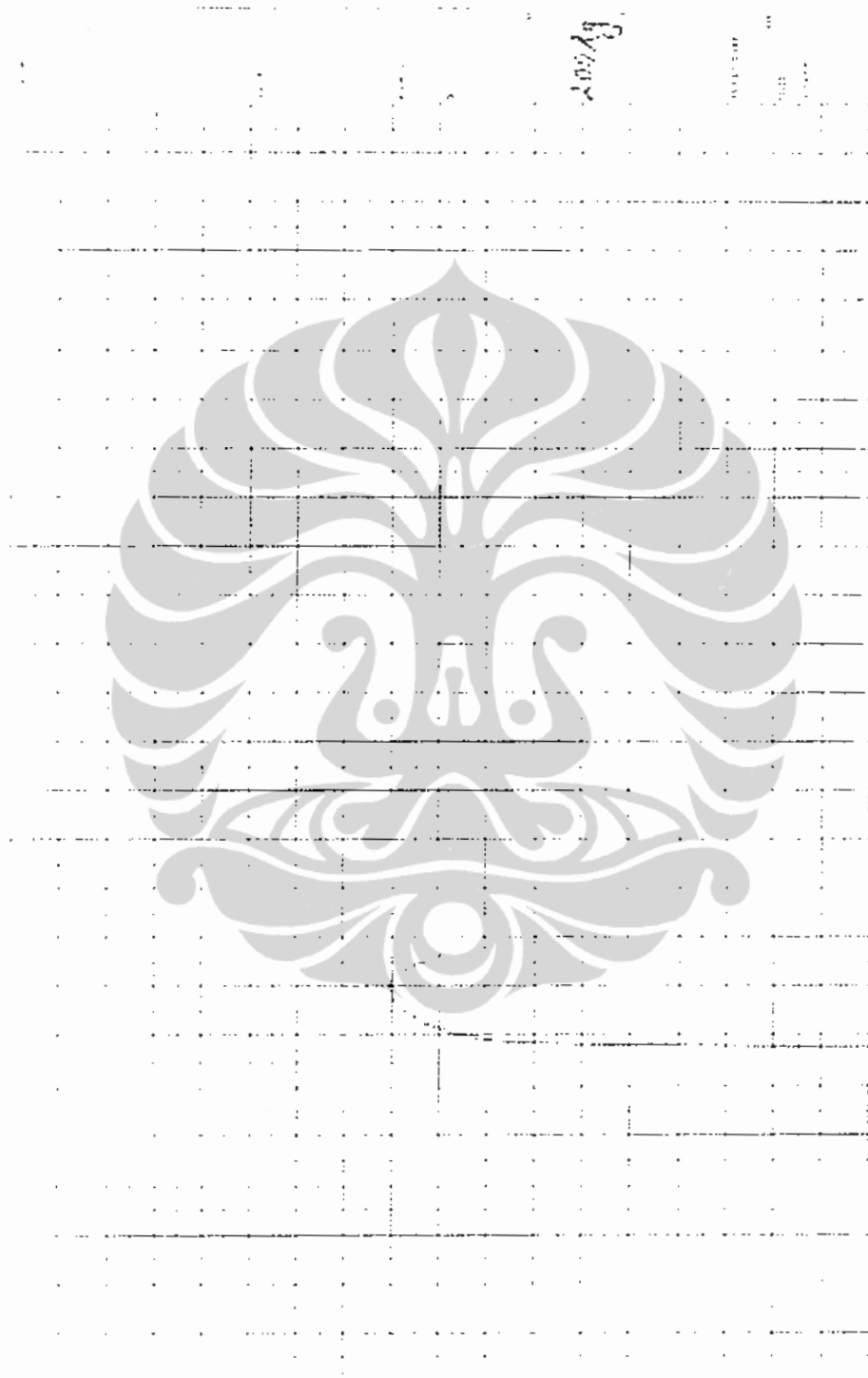


**5. Kurva Uji Tarik Spesimen E (0-550°C; deformasi 35%)**

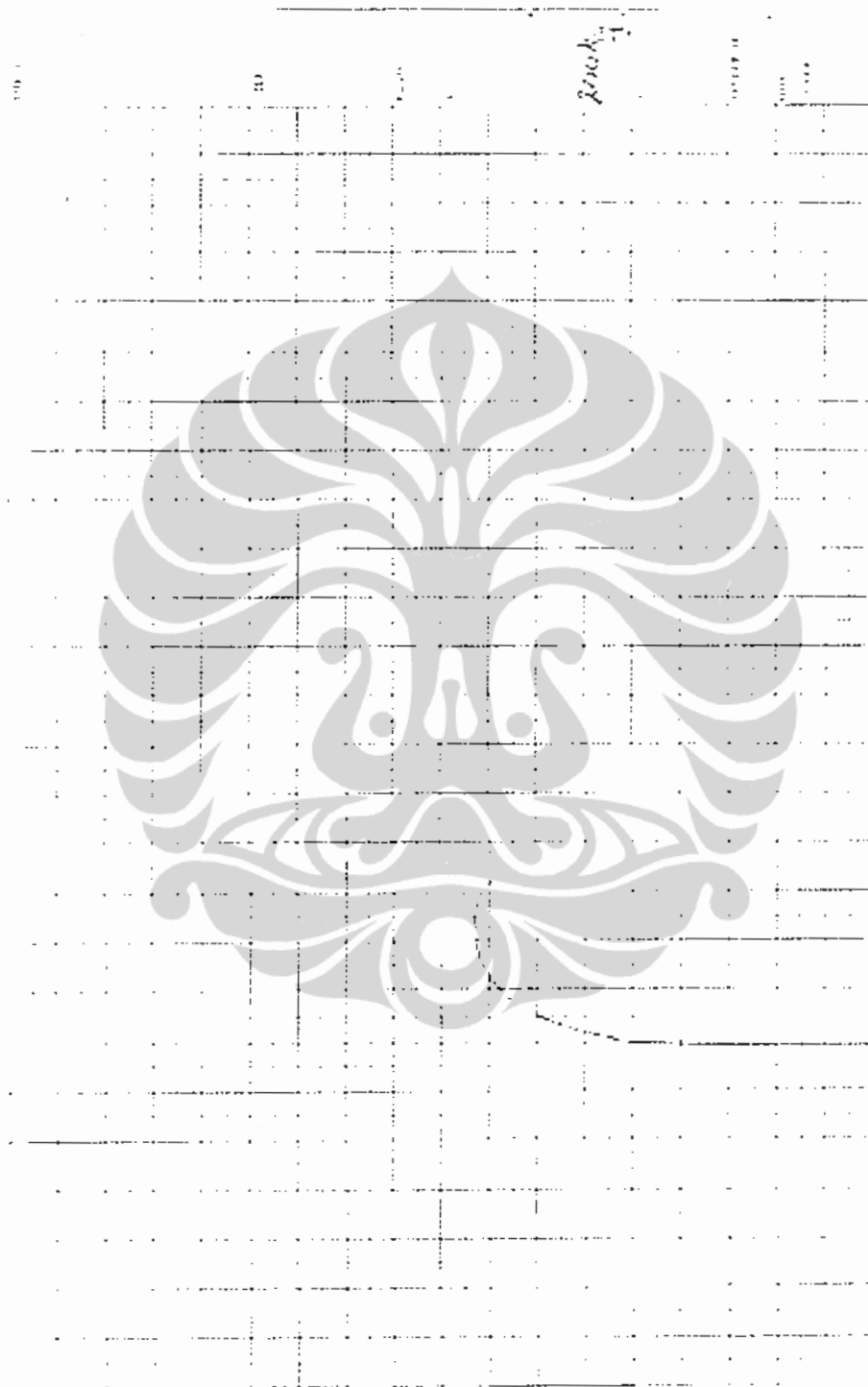


DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS  
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

### 6. Kurva Uji Tarik Spesimen F (0-1100-550°C; deformasi 35%)



### 7. Kurva Uji Tarik Spesimen G (0-1100-600°C; deformasi 35%)



### 8. Kurva Uji Tarik Spesimen H (0-1100-650°C; deformasi 35%)

