



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH DERAJAT DEFORMASI PADA PROSES CANAI
HANGAT TERHADAP KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO,
DAN LAJU KOROSI BAJA KARBON RENDAH**

SKRIPSI

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

**Nofardiansyah Rizky Dwi Nugraha
06060675126**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Nofardiansyah Rizky Dwi Nugrah

NPM : 0606075126

Tanda Tangan :

Tanggal : 25 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Nofardiansyah Rizky Dwi Nugraha
NPM : 0606075126
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Derajat Deformasi pada Proses Canai
Hangat terhadap Kekerasan, Struktur Mikro, dan Laju Korosi Baja Karbon
Rendah

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Rini Riastuti M.Sc ()

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

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

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 13 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Departemen Metalurgi Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Rini Riastuti M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Prof. Dr. Bondan T Sofyan, M.Si selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan saran, masukan, dan nasehat untuk mengarahkan saya selama masa perkuliahan di DMM FTUI ;
3. Pihak PT. Bakrie Pipe Industries, yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh material sampel yang saya perlukan;
4. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
5. Rekan-rekan Warm Rolling : Amri, Aldhi, Bintang, Ronal , dan Dudiet atas kerja samanya selama ini;
6. Rekan-rekan Metalurgi dan Material angkatan 2006 atas kebersamaannya selama ini; dan
7. Keluarga besar DTMM yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 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 : Nofardiansyah Rizky Dwi Nugraha

NPM : 0606075126

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Departemen : Teknik Metalurgi dan Material

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

STUDI PENGARUH DERAJAT DEFORMASI PADA PROSES CANAI HANGAT TERHADAP KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO, DAN LAJU KOROSI BAJA KARBON RENDAH

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan 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 : 25 Juni 2010

Yang menyatakan

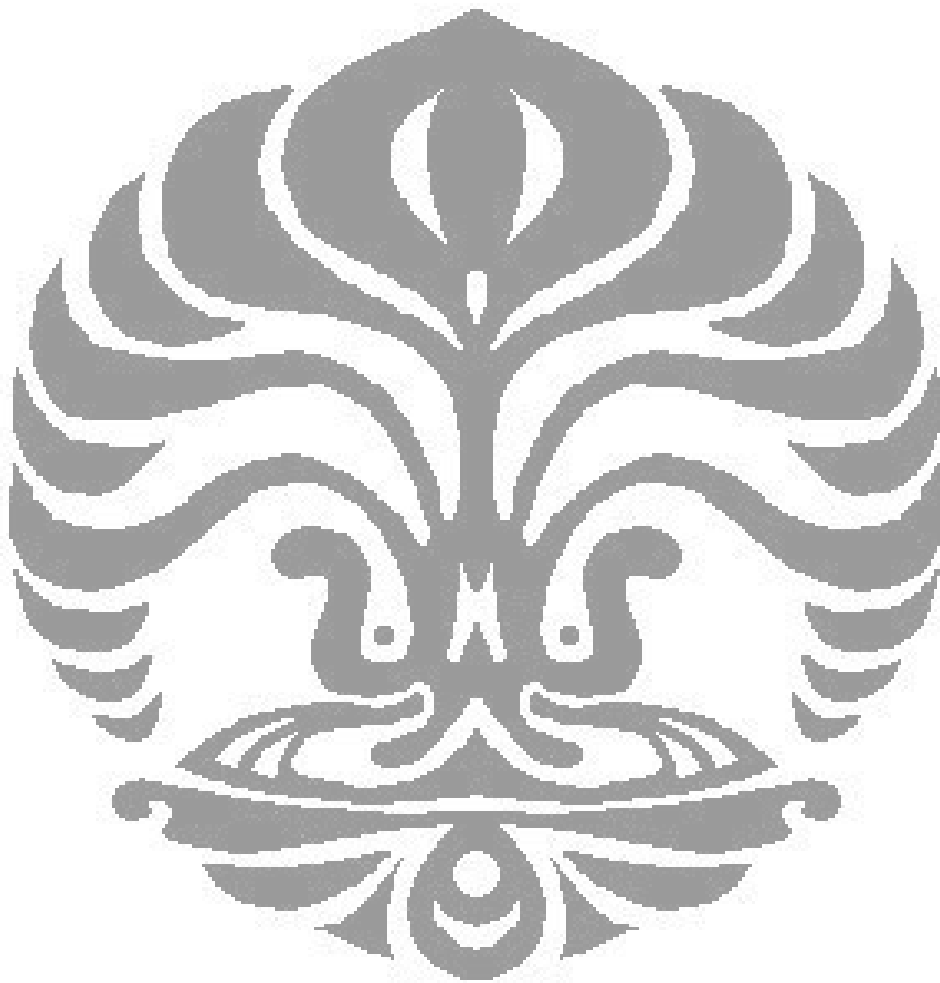
(Nofardiansyah Rizky Dwi Nugraha)

Nama	: Nofardiansyah Rizky Dwi Nugraha
Program Studi	: Teknik Metalurgi dan Material
PENGARUH DERAJAT DEFORMASI PADA PROSES CANAI HANGAT TERHADAP KEKERASAN, STRUKTUR MIKRO, DAN LAJU KOROSI BAJA KARBON RENDAH	
ABSTRAK	
<p>Baja karbon merupakan material rekayasa yang paling banyak digunakan. Pengembangan metoda penguatan sifat mekanik baja digali untuk memperoleh sifat fisik baja yang lebih baik dengan proses yang tidak terlalu mahal dan hasil pengembangan dapat digunakan dalam beragam aplikasi. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh derajat deformasi terhadap struktur mikro, nilai kekeasan, serta laju korosi. Sampel baja yang digunakan adalah AISI 1013 dengan proses austenisasi pada temperature 1100 °C ditahan selama 20 menit, pendinginan cepat dengan air es, <i>tempering</i> pada temperature 650 °C ditahan selama 5 jam, canai hangat dengan derajat deformasi 50%, 70%, 25%-25%, dan 35%-35% pada temperature 600 °C kemudian <i>annealing</i> pada temperature 390 °C ditahan selama 30 menit. Pengujian yang dilakukan setelah mengalami perlakuan tersebut adalah pengujian nilai kekerasan Vickers, pengamatan struktur mikro, dan pengujian laju korosi dengan metode polarisasi. Hasil yang diperoleh adalah struktur mikro yang terbentuk adalah <i>acicular ferrite</i> dan pearlite. Sementara semakin besar derajat deformasi maka akan cenderung meningkatkan nilai kekerasan dan laju korosi.</p>	
Kata Kunci : baja karbon rendah, canai hangat, <i>annealing</i> , <i>tempering</i> , struktur mikro, kekerasan, laju korosi	

Name	: Nofardiansyah Rizky Dwi Nugraha
Department	: Metallurgy and Materials Engineering
EFFECT OF DEFORMATION DEGREE IN WARM ROLLING PROCESS TO HARDNESS, MICRO STRUCTURE, AND CORROSION RATE OF LOW CARBON STEEL	
ABSTRACT	
<p>Carbon steel is the material most widely used engineering. Development of mechanical properties of steel reinforcement methods explored to obtain the physical properties of steel are better with a less expensive process and results of development can be used in various applications. This research was conducted to study the effect of deformation degree on the microstructure, hardness value, as well as the corrosion rate. Steel sample used was AISI 1013 with the process of austenite at temperatures of 1100°C detained for 20 minutes, quenching with ice water, tempering at temperatures of 650°C detained for five hours, warm rolled with a deformation degree 50%, 70%, 25% -25 %, and 35% -35% at temperatures of 600 oC and then annealed at temperatures of 390°C for 30 minutes on hold. Tests conducted after a treatment is the value of Vickers hardness test, microstructure observation, and testing for corrosion rate by the polarization method. The results obtained are formed microstructure is <i>acicular ferrite</i> and pearlite. While the greater the degree of deformation it will tend to increase the</p>	

value of hardness and corrosion rate.

Keywords: low carbon steel, warm rolling, annealing, tempering, microstructure, hardness, corrosion rate.



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	2
1.3.1 Material	2
1.3.2 Parameter Penelitian.....	2
1.4 Tempat Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baja Karbon.....	5
2.1.1 Klasifikasi Baja Karbon	5
2.2 Perlakuan Panas	7
2.2.1 <i>Quenching</i>	6
2.2.2 <i>Tempering</i>	7
2.2.3 <i>Annealing</i>	8
2.3 Struktur Mikro	11
2.3.1 <i>Ferrite</i>	11
2.3.2 <i>Pearlite</i>	12
2.4 Pengaruh Deformasi Plastis terhadap Struktur Mikro.....	13
2.5 Mekanisme Penguatan dengan Penghalusan Butir	14
2.6 Proses <i>Recovery</i> , Rekrystalisasi, dan Pertumbuhan Butir.....	16
2.6.1 <i>Recovery</i>	16
2.6.2 Rekrystalisasi	18
2.6.3 Pertumbuhan Butir	20
2.7 Pengerjaan Hangat	21
2.8 Kekerasan pada Material	22
2.9 Korosi pada Material	23
2.9.1 Definisi Korosi	23
2.9.2 Mekanisme Korosi dalam Lingkungan <i>Aqueous</i>	23
2.9.2.1 Reaksi Elektrokimia Korosi	23
2.9.3 Korosi pada Air Laut	24

2.9.3.1 Kandungan Oksigen	25
2.9.3.2 Temperatur	27
2.9.3.3 Salinitas	27
2.9.3.4 Kecepatan	28
2.9.4 Pengukuran Laju Korosi	28
2.9.4.1 Metode Polarisasi dengan Analisa <i>Taffel</i>	28
2.9.5 Pengaruh Derajat Deformasi terhadap Korosi	29
2.9.6 Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Korosi	30
BAB 3 METODE PENELITIAN	32
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	32
3.2 Alat Dan Bahan	33
3.2.1 Alat	33
3.2.2 Bahan.....	34
3.3 Prosedur Penelitian.....	34
3.3.1 Pemilihan Material	34
3.3.2 Preparasi Sampel	34
3.3.3 Proses Pemanasan	34
3.3.4 Proses Canai Hangat	38
3.3.5 Pendinginan	38
3.3.6 Uji Kekerasan	38
3.3.7 Preparasi, Pengujian Metalografi, dan Pengamatan Struktur Mikro.....	39
3.3.8 Pengamatan Struktur Mikro	40
3.3.9 Uji Ketahanan Korosi	40
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Hasil Pengujian Komposisi	41
4.2 Hasil Pengukuran Ketebalan Sampel	42
4.3 Hasil Pengujian Kekerasan	43
4.3.1 Hubungan Kekerasan terhadap Derajat Deformasi	44
4.3.2 Hubungan Kekerasan terhadap Metode Deformasi	46
4.4 Hasil Pengamatan Struktur Mikro	47
4.5 Hasil Pengujian Laju Korosi	56
4.5.1 Hubungan Derajat Deformasi terhadap Laju Korosi	56
4.5.2 Hubungan Metode Deformasi terhadap Laju Korosi	58
4.5.3 Hubungan Kekerasan terhadap Laju Korosi	59
BAB 5 KESIMPULAN	63
DAFTAR REFERENSI.....	65
LAMPIRAN	67

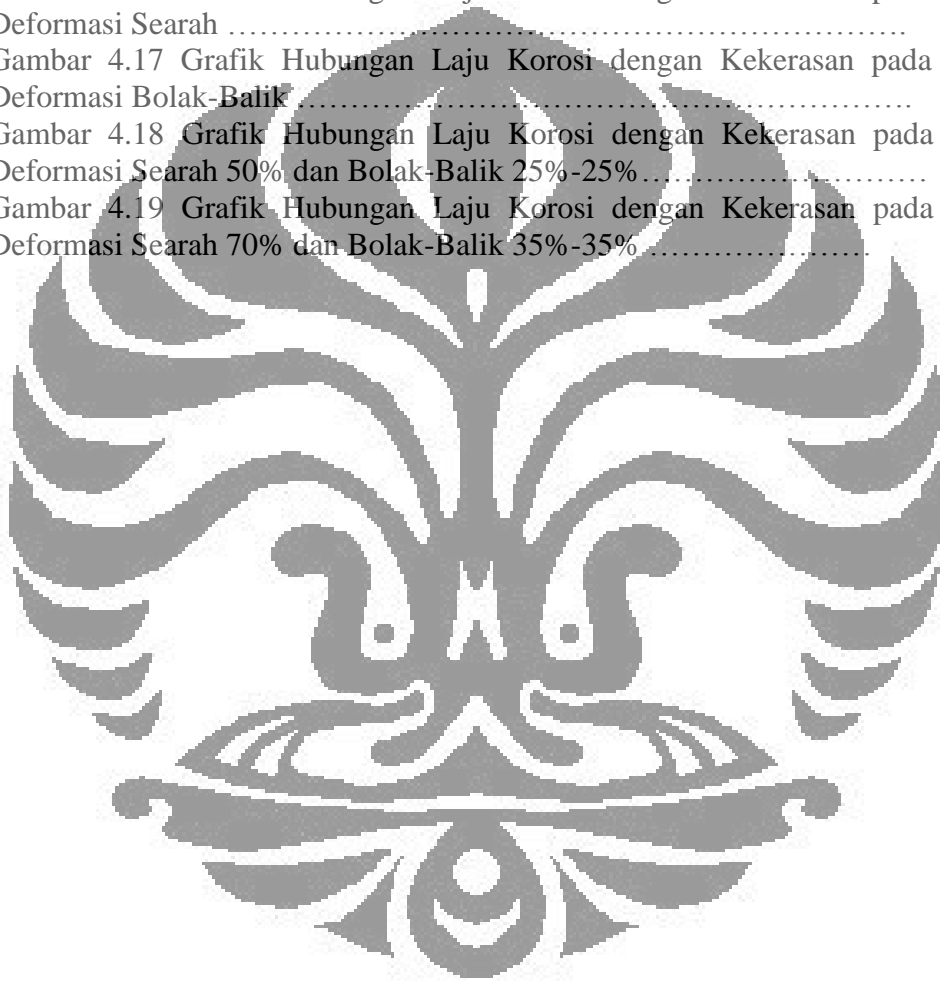
DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Komposisi Sampel	2
Tabel 2.1 Pengaruh media <i>quench</i>	7
Tabel 2.2 Kekerasan Baja Karbon setelah <i>Temper</i>	8
Tabel 2.3 Temperatur Kritis pada Baja	10
Tabel 2.4 Kandungan dalam Air Laut	24
Tabel 2.5 Faktor yang Mempengaruhi Laju Korosi pada Air Laut	25
Tabel 3.1 Komposisi Sampel	34
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja	41
Tabel 4.2 Tabel Pengukuran Ketebalan Sampel	42
Tabel 4.3 Tabel Pengujian Kekerasan	43
Tabel 4.4 Temperatur dan Hasil dari <i>Temperering</i>	55
Tabel 4.5 Tabel Pengujian Laju Korosi terhadap Deformasi	56
Tabel 4.6 Tabel Pengujian Laju Korosi terhadap Kekerasan	59

DAFTAR GAMBAR

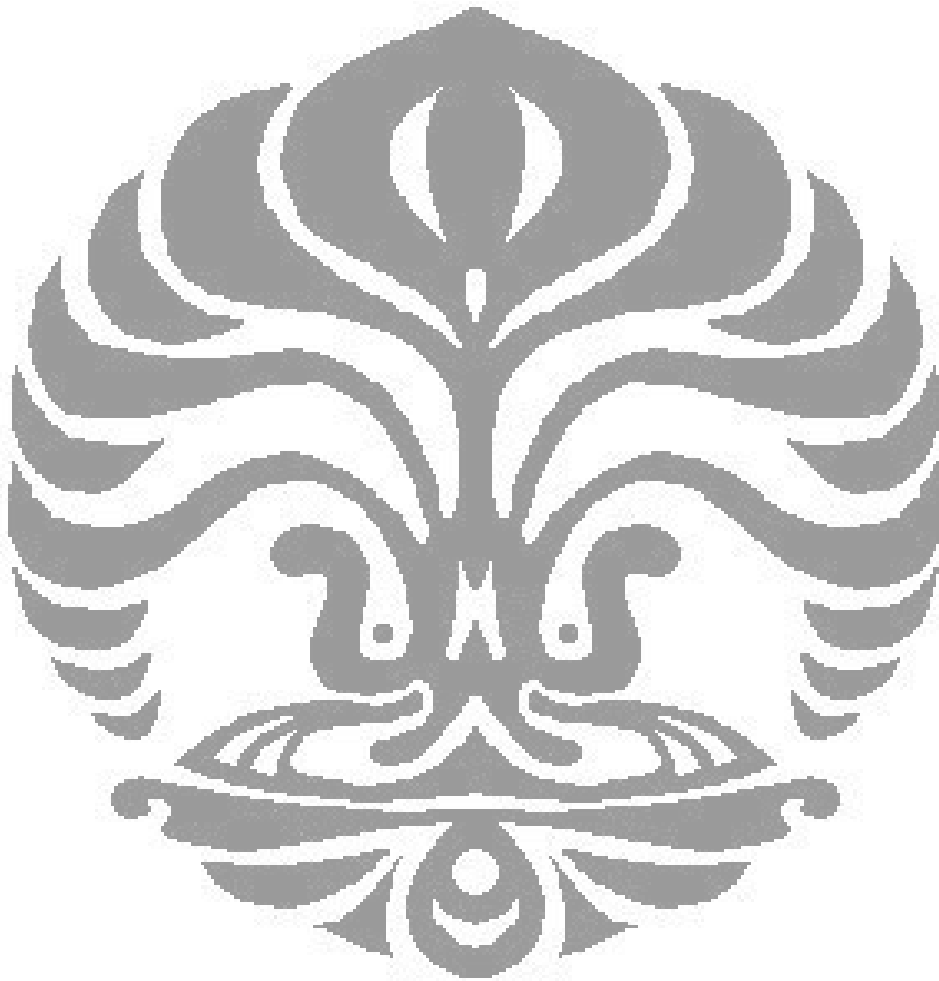
Gambar 2.1 Transformasi Fasa pada Baja Karbon	6
Gambar 2.2 Struktur Mikro Ferrite – pearlite pada Proses <i>Annealing</i> .	9
Gambar 2.3 Diagram Fasa Fe-C.....	9
Gambar 2.4 Struktur Mikro Accicular Ferrite dan Pearlite pada Baja Karbon UNS G10200 Etsa Picral 4 % 500 X	12
Gambar 2.5 Diagram TTT Baja 1013.....	13
Gambar 2.6 Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi	14
Gambar 2.7 Pengaruh Besar Butir terhadap Nilai Kekuatan	16
Gambar 2.8 Skematis Proses <i>Recovery</i> , Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir.....	17
Gambar 2.9 Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik...	20
Gambar 2.10 Korosi yang Diakibatkan oleh Oksigen yang Terdepolarisasi di Permukaan Katoda	26
Gambar 2.11 Pengaruh Oksigen Terlarut terhadap Laju Korosi	26
Gambar 2.12 Pengaruh Kedalaman terhadap Laju Korosi	27
Gambar 2.13 Pengaruh Temperatur terhadap Kadar Oksigen	27
Gambar 2.14 Ilustrasi Pergerakan Oksigen di Permukaan Logam	28
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 3.2 Ilustrasi Sampel dan Pemasangan Termokopel	35
Gambar 3.3 Skema Perlakuan pada Sampel A.....	36
Gambar 3.4 Skema Perlakuan pada Sampel B	36
Gambar 3.5 Skema Perlakuan pada Sampel C	37
Gambar 3.6 Skema Perlakuan pada Sampel D	37
Gambar 3.7 Skema Perlakuan pada Sampel E	38
Gambar 4.1 Grafik Hubungan Nilai Kekerasan dengan Derajat Deformasi Metode Deformasi Searah	41
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Nilai Kekerasan dengan Derajat Deformasi Metode Deformasi Bolak-Balik	41
Gambar 4.3 Grafik Hubungan Nilai Kekerasan dengan Metode Deformasi Sampel Deformasi Searah 50% dan Bolak-Balik 25%-25%	46
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Nilai Kekerasan dengan Metode Deformasi Sampel Deformasi Searah 70% dan Bolak-Balik 35%-35%	46
Gambar 4.5 Foto Struktur Mikro Penampang Samping, Perbesaran 500 X, Etsa Nital 3 %	48
Gambar 4.6 Foto Struktur Mikro Penampang Samping, Perbesaran 500 X, Etsa Picral 30 %	49
Gambar 4.7 Foto Struktur Mikro Penampang Atas, Perbesaran 500 X, Etsa Nital 3 %	50
Gambar 4.8 Foto Struktur Mikro Hasil penelitian C.H. Lee, et al	51
Gambar 4.9 Nilai Kekerasan pada Baja Karbon	53

Gambar 4.10 Diagram TTT Baja AISI 1013.....	54
Gambar 4.11 Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Derajat Deformasi Metode Searah	56
Gambar 4.12 Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Derajat Deformasi Metode Bolak-Balik	57
Gambar 4.13 Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Metode Deformasi Sampel Deformasi Searah 50% dan Bolak-Balik 25%-25%	58
Gambar 4.14 Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Metode Deformasi Sampel Deformasi Searah 70% dan Bolak-Balik 35%-35%	58
Gambar 4.15 Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan	59
Gambar 4.16 Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan pada Metode Deformasi Searah	60
Gambar 4.17 Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan pada Metode Deformasi Bolak-Balik	60
Gambar 4.18 Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan pada Sampel Deformasi Searah 50% dan Bolak-Balik 25%-25%.....	61
Gambar 4.19 Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan pada Sampel Deformasi Searah 70% dan Bolak-Balik 35%-35%	61



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA	67
LAMPIRAN 2. AKUISISI DATA PADA SAAT CANAI HANGAT ..	69
LAMPIRAN 3. HASIL PENGUJIAN POLARISASI	73



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja karbon merupakan material rekayasa yang paling banyak digunakan, diperkirakan penggunaannya mencapai 85% total produksi tahunan di seluruh dunia⁽¹⁾. 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.^(1,2)

Pengembangan metoda penguatan sifat mekanik baja digali untuk memperoleh sifat fisik baja yang lebih baik dengan proses yang tidak terlalu mahal dan hasil pengembangan dapat digunakan dalam beragam aplikasi.

Pengerjaan hangat 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.^(3,4)

Pada baja karbon rendah sifat mekanik bergantung pada mikrostrukturnya. Beberapa metode yang digunakan industri untuk memperhalus struktur butir yaitu: modifikasi komposisi kimia, *normalizing*, deformasi plastis melalui pengerolan terkendali, pendinginan cepat, dan pengerjaan hangat. Namun hasil dari proses pendinginan cepat tersebut biasanya memiliki karakteristik keras dan getas. Oleh karena itu diperlukan proses tempering untuk menghilangkan tegangan sisa akibat pendinginan cepat dan meningkatkan ketangguhan. Sementara perlakuan *annealing* dilakukan untuk pelunakan, menghilangkan tegangan sisa, dan meningkatkan keuletan.⁽⁵⁾

Deformasi plastis sering diklasifikasikan sebagai perlakuan yang selalu dilakukan pada pengerjaan panas atau pengerjaan dingin terhadap logam. Yang

Universitas Indonesia

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.

Berdasarkan pemaparan diatas maka penelitian ini akan membahas Pengaruh Derajat Deformasi pada Proses Canai Hangat terhadap Kekerasan, Struktur Mikro, dan Laju Korosi Baja Karbon Rendah

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk :

1. Mempelajari pengaruh derajat deformasi terhadap struktur mikro baja karbon rendah.
2. Mempelajari pengaruh derajat deformasi terhadap kekerasan baja karbon rendah.
3. Mempelajari pengaruh derajat deformasi ketahanan korosi baja karbon rendah.
4. Mempelajari pengaruh nilai kekerasan terhadap ketahanan korosi baja karbon rendah.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

1.3.1 Material

Penelitian menggunakan material AISI 1013 dengan komposisi :

Tabel 1. 1. Komposisi Sampel

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
01	0.120	0.198	< 0.003	0.008	0.636	< 0.005	< 0.003
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	< 0.005	< 0.002	0.018	< 0.002	0.016	0.037	98.913

1.3.2 Parameter Penelitian

Parameter yang divariabelkan

- **Besar Deformasi**
Deformasi dilakukan dengan besaran searah 50% dan 70% serta bolak-balik 25%-25% dan 35%-35%.
- **Metode Deformasi**
Deformasi dilakukan dengan dua metode yaitu metode searah dan bolak-balik.

1.4 Tempat Penelitian

Penelitian terhadap proses perlakuan panas dan pengerjaan hangat dilakukan di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material. Penelitian nilai kekerasan sampel dilakukan di Laboratorium DT Departemen Metalurgi dan Material. Preparasi sampel dan pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material. Sedangkan penelitian ketahanan korosi dilakukan di Laboratorium Korosi dan Perlindungan Logam Departemen Metalurgi dan Material.

1.5 Sistematika Penulisan

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

Bab 1 Pendahuluan

Membahas mengenai latar belakang dari penelitian yang dilakukan, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, tempat penelitian, dan sistematika penulisan laporan.

Bab 2 Dasar Teori

Dalam bab ini akan dijelaskan dasar teori mengenai material baja karbon, perlakuan panas, struktur mikro, pengaruh deformasi plastis terhadap struktur mikro, mekanisme penguatan dengan penghalusan butir, proses *recovery*, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir, pengerjaan hangat, kekerasan pada material, dan korosi pada material.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Bab ini memberikan penjelasan mengenai diagram alir penelitian, alat dan bahan, serta prosedur penelitian

Bab 4 Hasil Pengujian dan Pembahasan

Akan dibahas mengenai pengolahan data yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan berupa Foto struktur mikro, pengukuran kekerasan dan pengukuran ketahanan korosi. Bab ini juga akan membahas mengenai analisa dari hasil pengujian dan membandingkannya dengan literatur sehingga didapatkan suatu analisis yang dapat menggambarkan Pengaruh Pendinginan Cepat di Awal pada Proses Canai Hangat terhadap Kekerasan, Struktur Mikro, dan Ketahanan Korosi Baja Karbon Rendah

Bab 5 Kesimpulan

Membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Karbon

Baja karbon merupakan logam paduan yang merupakan kombinasi dari besi dan karbon dan paduan elemen lain yang jumlahnya tidak terlalu banyak untuk dapat mempengaruhi sifatnya ⁽¹⁾. Komposisi baja karbon biasanya mengandung tidak lebih dari 1,0% karbon (C) serta sejumlah kecil paduan seperti mangan (Mn) dengan kadar maksimal 1,65%, silikon (Si) dengan kadar maksimal 0,6% dan tembaga (Cu) dengan kadar maksimal 0,6%. Baja dengan kadar karbon yang rendah memiliki sifat yang sama dengan besi, lunak dan mudah dibentuk. Meningkatnya kandungan karbon menjadikan logam lebih keras dan kuat namun keuletannya berkurang dan lebih sulit untuk di las.

Standar seperti AISI (American Iron and Steel Institute) atau SAE (Society of American Engineers) memberikan 4 angka untuk membedakan tipe-tipe dari baja (3 untuk baja tahan karat). Contohnya, AISI/SAE 1012, 10 merupakan tipe baja karbon biasa (non-resulfurisasi) sedangkan 12 untuk kadar karbonnya 0,12%. Kelompok baja karbon biasa ini memiliki sifat mekanik yang sangat bergantung pada komposisi karbonnya.

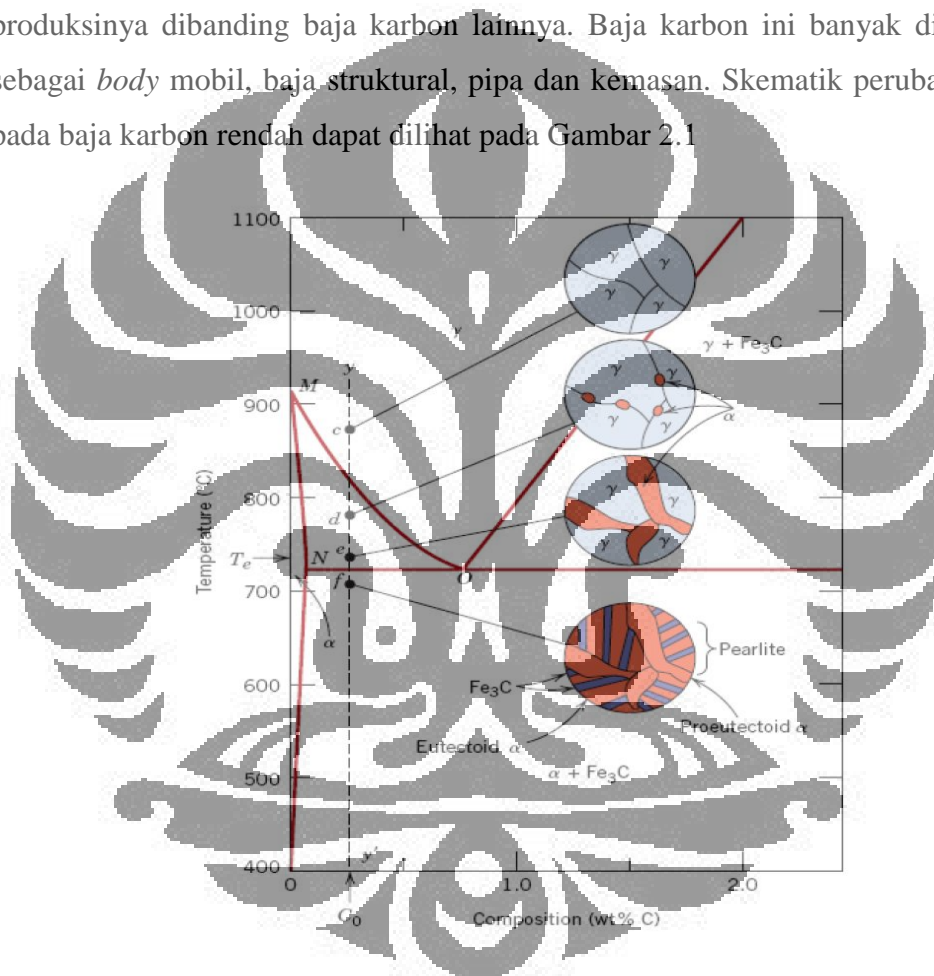
Baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian menurut kadar karbon yang dikandungnya, yaitu baja karbon rendah dengan kadar karbon kurang dari 0,3 %, baja karbon sedang mengandung 0,3 - 0,6 % karbon, dan baja karbon tinggi mengandung 0,6 - 1,0 % karbon.

2.1.1. Klasifikasi Baja Karbon ⁽⁶⁾

Baja karbon biasa berdasarkan kadar karbonnya dibagi menjadi tiga yaitu, baja karbon rendah, baja karbon menengah dan baja karbon tinggi.

1. Baja Karbon Rendah (*Low-Carbon Steels*)

Baja karbon tipe ini memiliki kadar karbon kurang dari 0,25%. Baja karbon ini tidak responsif terhadap *heat treatment* yang tujuannya untuk mendapatkan martensit, proses penguatan didapatkan melalui proses pengerjaan dingin/*cold work*. Struktur mikro terdiri dari fasa ferit dan perlit, karena itu baja karbon rendah relatif lunak dan lemah namun keuletan dan ketangguhannya sangat baik. Baja karbon rendah ini memiliki *machinability* dan *weldability* yang sangat baik, namun baja karbon rendah ini merupakan yang paling mahal biaya produksinya dibanding baja karbon lainnya. Baja karbon ini banyak digunakan sebagai *body* mobil, baja struktural, pipa dan kemasan. Skematik perubahan fasa pada baja karbon rendah dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Transformasi Fasa pada Baja Karbon ⁽⁷⁾

2. Baja Karbon Menengah (*Medium-Carbon Steels*)

Baja karbon menengah memiliki kadar karbon sekitar 0,25% sampai 0,60%. Baja ini mampu untuk dilakukan *heat treatment* dengan austenisasi, quenching yang kemudian diikuti dengan temper untuk meningkat sifat mekaniknya. Baja karbon ini umumnya digunakan setelah melalui kondisi temper,

yang struktur mikronya adalah martensit temper. Baja karbon menengah ini memiliki kemampukerasan/*hardenability* yang rendah, untuk mendapatkan hasil heat treatment yang baik maka bendanya harus cukup tipis dan ditambah dengan proses pendinginan yang sangat cepat. Penambahan unsur seperti kromium, nikel, vanadium dan molybdenum akan meningkatkan kemampukerasan dari baja ini, namun akan sedikit mengkorbankan keuletan dan ketangguhannya. Aplikasi baja ini banyak digunakan sebagai *gear*, *crankshaft*, *chain link*, dan komponen lainnya yang membutuhkan kombinasi antara kekuatan tinggi, ketangguhan dan ketahanan aus yang baik.

3. Baja Karbon Tinggi (*High-Carbon Steels*)

Baja karbon tinggi memiliki kadar karbon antara 0,6% sampai 1,4%. Baja karbon ini adalah yang paling keras dan kuat di antara kedua lainnya. Umumnya digunakan dalam kondisi hardened dan tempered sebagai material tahan aus. Baja karbon tinggi yang memiliki kandungan seperti unsur kromium, vanadium, dan wolfram akan membentuk karbida yang sangat keras (Cr_{23}C_6 , V_4C_3 dan WC)

2.2 Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas merupakan suatu tahapan proses yang penting pada pengerjaan logam yang bertujuan untuk mendapatkan atau memperbaiki sifat-sifat mekanis seperti kekerasan, ketangguhan, dan sebagainya.

Proses pemanasan yang dilakukan adalah dengan cara menaikkan temperatur logam diatas temperatur kritis (A_1) yaitu temperatur dimana mulai terjadinya transformasi struktur dari fasa ferit (α) menjadi fasa austenit (γ). Kemudian logam ditahan pada temperatur tersebut untuk waktu tertentu dan dilanjutkan dengan dengan pendinginan dengan kecepatan dan media tertentu.

Perlakuan panas yang banyak dilakukan pada baja karbon adalah proses pengerasan (*hardening*) dan dilanjutkan dengan penemperan, dimana hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan ketangguhan meskipun menurunkan kekerasannya.

2.2.1 *Quenching*

Quenching adalah proses pendinginan cepat suatu komponen logam dari temperatur austenisasi ke temperatur dimana fasa yang kita inginkan dapat terbentuk, pada baja umumnya adalah struktur mikro martensit. *Quenching* dikatakan berhasil jika kita telah mampu mendapatkan struktur mikro, kekerasan, kekuatan maupun ketangguhan yang kita inginkan dengan tetap meminimalisasi tegangan sisa, distorsi dan kemungkinan terjadinya retak/*cracking*.⁽⁶⁾

Pemilihan media quench yang tepat tergantung pada kemampukerasan/*hardenability* material, ketebalan dan geometri benda, serta kecepatan pendinginan untuk mendapatkan struktur mikro yang diinginkan. Media quench atau *quenchant* yang biasa digunakan antara lain:

- Air
- Oli
- Lelehan garam
- Lelehan logam
- Larutan polimer

Kemampukerasan adalah kemampuan material untuk mengalami pengerasan dengan membentuk martensit. Baja karbon rendah memiliki kemampukerasan yang rendah karena kelarutan karbonnya yang rendah. Sebaliknya pada baja karbon menengah dan tinggi akan mudah membentuk martensit karena kelarutan karbonnya cukup tinggi untuk memudahkan terbentuknya martensit.

Selama proses *quenching*, bentuk maupun ketebalan akan mempengaruhi kecepatan pendinginan dari benda. Hal ini terjadi karena energi panas di dalam komponen akan terlebih dahulu mengalir ke permukaan benda sebelum nantinya dibuang ke media quench. Inilah yang menyebabkan kecepatan pendinginan antara di dalam dan di permukaan benda berbeda tergantung dari ketebalan dan geometri bentuknya⁽⁵⁾.

Penggunaan media quench yang tepat juga ikut berpengaruh pada kecepatan pendinginan. Semakin tinggi kecepatan pendinginan maka semakin dalam juga efek dari pengerasan/pembentukan martensit. Pengaruh media quench

dengan dapat diketahui menggunakan *grossman quench severity factor*, H, pada Tabel 2.1 di bawah. Semakin tinggi nilai H, maka semakin tinggi pula kecepatan pendinginan pada komponen.

Tabel 2.1 Pengaruh media *quench* ⁽⁵⁾

Circulation or Agitation	Grossman Quench Severity Factor, H			
	Brine Water	Water	Oil and Salt	Air
None	2	0,9-1,0	0,25-0,30	0,02
Mild	2-2,2	1,0-1,1	0,30-0,35	...
Moderate	...	1,2-1,3	0,35-0,40	.
Good	...	1,4-1,5	0,4-0,5	.
Strong	...	1,6-2,0	0,5-0,8	.
Violent	5	4	0,8-1,1	.

Media *quench* air walaupun mudah digunakan namun pada aplikasi baja karbon menengah dan tinggi sangat rentan terjadi retak dan melengkung/*warping*. Media *quench* yang paling banyak digunakan adalah oli dan lelehan garam karena sangat baik dalam mentransfer panas secara konveksi. Lelehan garam lebih banyak digunakan pada metode perlakuan panas seperti austemper dan martempering.

2.1.2 Tempering

Tempering adalah proses pemanasan yang dilakukan setelah proses pengerasan di temperatur kritis dan diikuti dengan pendinginan normal. Tujuan utamanya ada untuk meningkatkan keuletan, ketangguhan, dan meningkatkan ukuran butir dari struktur matriksnya. Tempering pada baja juga bertujuan untuk mengurangi tegangan akibat *quenching* dan untuk memperbaiki stabilitas dimensi benda. Beberapa faktor yang berpengaruh dalam proses tempering antara lain:

- Temperatur temper
- Waktu temper
- Kecepatan pendinginan setelah temper
- Komposisi baja (karbon, paduan, inklusi)

Baja yang mengalami *quench* akan memiliki struktur mikro berupa martensit yang sangat keras, ini terjadi karena atom karbon terjebak di dalam kisi besi (Fe) yang menimbulkan adanya tegangan di dalam kristal bcc (*body-centered*

cubic) menjadi kristal bct (*body-centered tetragonal*). Selama proses pemanasan kembali, atom karbon akan berdifusi menjadi sementit (Fe_3C) atau karbida paduan di dalam matrik ferit yang akan secara perlahan menurunkan nilai tegangan. Perubahan ini biasanya akan menyebabkan turunnya nilai kekerasan, *yield strength*, *tensile strength*, namun *ductility* dan ketangguhannya akan naik. Pada proses temper dapat terjadi kegetasan atau *embrittlement* yang disebabkan oleh beberapa unsur pengotor seperti fosfor. *Embrittlement* ini biasanya terjadi pada karbon baja tinggi yang memudahkan fosfor untuk bersegregasi ke batas butir austenit prior sehingga menyebabkan kegetasan.

Nilai kekerasan hasil temper beberapa baja karbon akan ditampilkan di Tabel 2.2 di bawah ini. Temperatur dan waktu merupakan variabel yang sangat penting di dalam temper. Menurunkan temperatur dan memperlama waktu temper akan memiliki efek yang hampir sama dengan menaikkan temperatur dan mempercepat waktu temper. Namun, perubahan minor pada temperatur akan lebih besar efeknya daripada perubahan minor pada waktu.

Tabel 2.2 Kekerasan baja karbon setelah temper⁽⁵⁾

Grade	Carbon content, %	Hardness, HRC, setelah temper 2 jam									Heat treatment
		205 °C	260 °C	315 °C	370 °C	425 °C	480 °C	540 °C	595 °C	650 °C	
1030	0,30	50	45	43	39	31	28	25	22	95 ^a	Water quench dari 830-850 °C
1040	0,40	51	48	46	42	37	30	27	22	94 ^a	
1050	0,50	52	50	46	44	40	37	31	29	22	

(a) hardness, HRB

2.1.3 Annealing

Annealing adalah istilah umum yang menunjukkan suatu perlakuan yang terdiri dari pemanasan dan penahanan pada temperature tertentu diikuti dengan pendinginan pada tingkat yang tepat, terutama untuk pelunakan bahan logam. Secara umum, dalam baja karbon , annealing menghasilkan struktur mikro ferit-perlit.

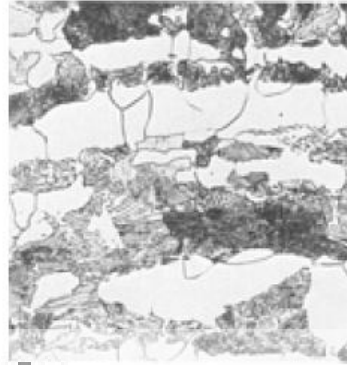
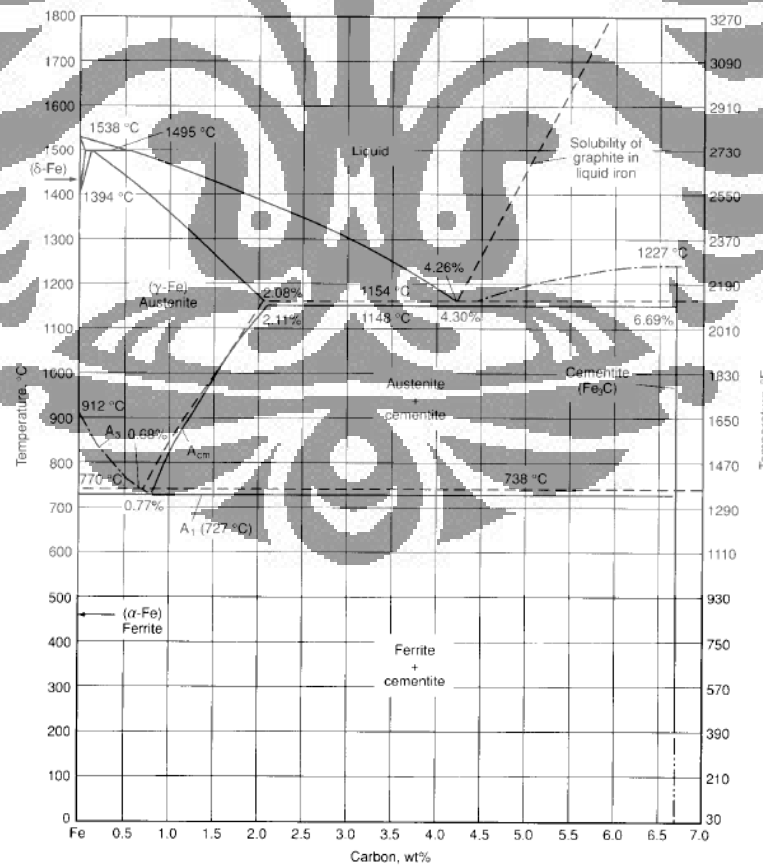


Fig. 1 A fully annealed 1040 steel showing a ferrite-pearlite microstructure. Etched in 4% picral plus 2% nital. 500×

Gambar 2. 2 Struktur Mikro Ferrite – pearlite pada Proses *Annealing* ⁽⁵⁾

Annealing dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik seperti keuletan dan stabilitas dimensi namun menurunkan kekerasan. Selain itu *Annealing* juga dapat mengurangi tegangan sisa.



Gambar 2.3. Diagram Fasa Fe-C ⁽⁵⁾

Prinsip diagram fasa biner metalurgi besi-karbon dapat digunakan untuk lebih memahami proses anil. Dalam mendefinisikan berbagai jenis anil, suhu transformasi atau suhu kritis biasanya digunakan. Temperatur kritis dipertimbangkan dalam membahas *Annealing* pada baja. Untuk baja tertentu, suhu kritis tergantung pada apakah baja sedang dipanaskan atau didinginkan. Temperatur kritis untuk memulai dan menyelesaikan transformasi untuk austenit selama pemanasan dilambangkan masing-masing, oleh AC1 dan AC3 untuk baja hypoeutectoid dan oleh AC1 dan Acem untuk baja hypereutectoid. Suhu ini lebih tinggi daripada Temperatur kritis yang sesuai untuk memulai dan menyelesaikan transformasi dari austenit pada saat pendinginan, yang dilambangkan, masing-masing, oleh Ar3 dan Ar1 untuk baja hypoeutectoid dan oleh Arcm dan Ar1 untuk baja hypereutectoid. (-C "" dan "r" dalam simbol yang berasal dari yang *chauffage* kata bahasa Prancis untuk pemanasan dan pendinginan *refroidissement*.

Persamaan berikut ini akan memberikan perkiraan temperatur kritis untuk baja *hypoeutectoid*:⁽⁵⁾

$$AC1(^{\circ}C)723 = -20,7(Mn\%) - 16,9(Ni\%) + 29,1(Si\%) - 16,9(Cr\%) \dots\dots(2.1)$$

$$\text{Standar deviasi} = \pm 11,5^{\circ}C$$

$$AC3(^{\circ}C)910 = -203\%C - 15,2(\%Ni) + 44,7(Si\%) + 104(V\%) + 31,5(Mo\%) \dots\dots(2.2)$$

$$\text{Standar deviasi} = \pm 16,7^{\circ}C$$

Tabel 2.3. Temperatur Kritis pada Baja⁽⁵⁾

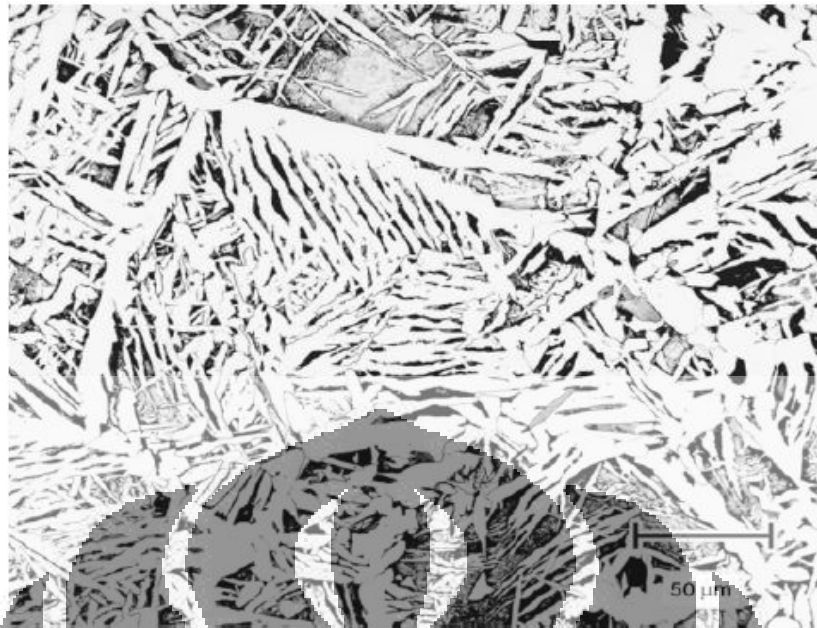
Table 1 Approximate critical temperatures for selected carbon and low-alloy steels

Steel	Critical temperatures on heating at 28 °C/h (50 °F/h)				Critical temperatures on cooling at 28 °C/h (50 °F/h)			
	A _{c1}		A _{c3}		A _{r3}		A _{r1}	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
1010	725	1335	875	1610	850	1560	680	1260
1020	725	1335	845	1555	815	1500	680	1260
1030	725	1340	815	1495	790	1450	675	1250
1040	725	1340	795	1460	755	1395	670	1240
1050	725	1340	770	1415	740	1365	680	1260
1060	725	1340	745	1375	725	1340	685	1265
1070	725	1340	730	1350	710	1310	690	1275
1080	730	1345	735	1355	700	1290	695	1280
1340	715	1320	775	1430	720	1330	620	1150
3140	735	1355	765	1410	720	1330	560	1220
4021	735	1340	805	1485	760	1400	570	1240

2.3 Struktur Mikro

2.3.1 Ferrite

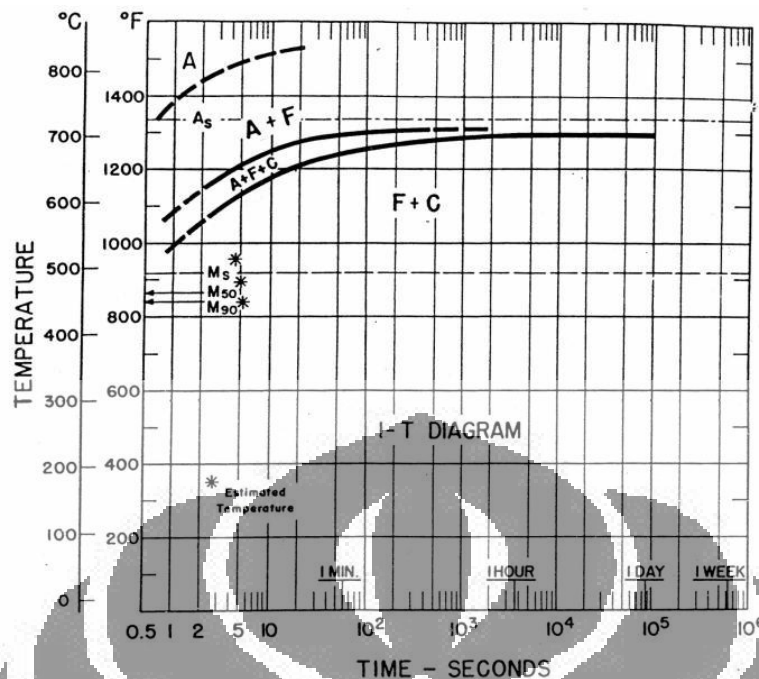
Ferrite adalah unsur utama dalam baja karbon rendah. Ferrite pada dasarnya adalah besi murni dan berisi C kurang dari 0,005% pada suhu kamar. Namun, dapat mengandung elemen paduan seperti mangan dan silikon. Pada baja karbon rendah, yang paling sering ferit muncul sebagai sebuah morfologi sama-sumbu (dimensi yang sama dalam segala arah). Morfologi ini juga disebut poligonal ferit. Ferrite juga dapat muncul dalam morfologi memanjang dan berisi arah deformasi (garis-garis gelap di butir) dari proses pengerjaan dingin. Ketika baja ini dianil, butir ferit *recrystallize* menjadi butir baru, sama-sumbu. Bentuk lain dari ferit adalah ferit *acicular*, terbentuk ketika baja dipanaskan ke dua fasa, ferit dan austenit.



Gambar 2.4. Struktur Mikro Accicular Ferrite dan Pearlite pada Baja Karbon UNS G10200 Etsa Picral 4 % 500 X ⁽⁹⁾

2.3.2 Pearlite

Pearlite merupakan struktur mikro akibat transformasi eutektoid pada baja dari austenit (γ) yang menghasilkan fasa ferit (α) dalam bentuk koloni-koloni lamelar dan sementit (Fe_3C). Ferit dan sementit di dalam perlit akan terbentuk di temperatur A_1 atau sekitar 727°C . Fasa perlit terjadi ketika baja didinginkan secara normal atau lambat sampai mengenai hidung perlit (ferit + sementit). Perlit akan bernukleasi dan tumbuh di batas butir austenit. Mekanisme pengaturan ulang atom besi dari struktur kristal fcc austenit menuju struktur bcc ferit pada *austenite-ferrite interface*. Sementara itu atom karbon karena kelarutannya rendah akan masuk ke dalam austenit sisa yang tidak bertransformasi menjadi sementit di dalam ferit. Di bawah ini Gambar 2.5 adalah transformasi isothermal dari baja 1013 dengan 0,12 % karbon.



Gambar 2.5. Diagram TTT Baja 1013 [6].

2.4 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro

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 dari salah satu Kristal yang disebut dislokasi. (8) 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.

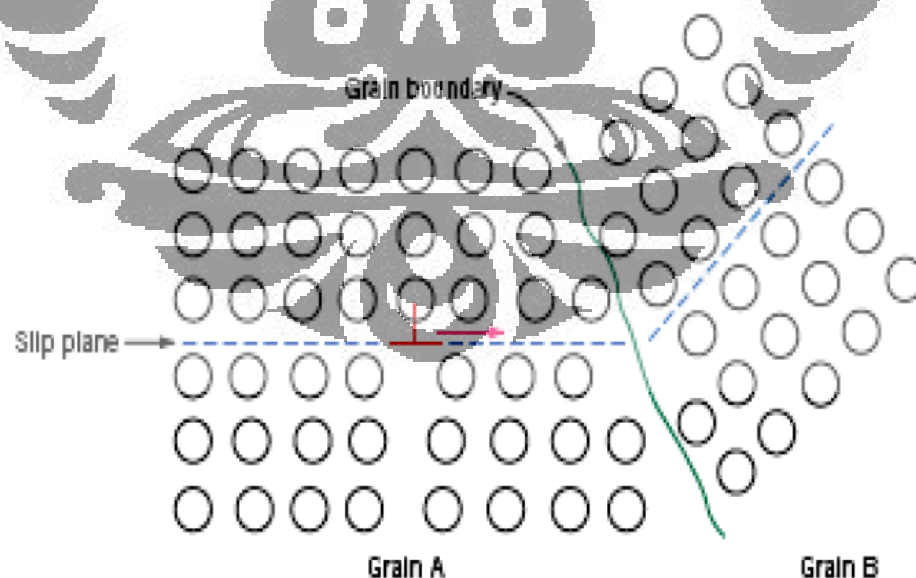
Kevariasian dislokasi memberikan peningkatan terhadap kevariasian *large-scale deformations*, termasuk *slip* dan *twinning*. Bidang kristalografi dimana garis dislokasi melintang dikenal dengan bidang *slip*. Garis-garis slip nampak seperti jejak pada bidang *slip*, yang mana dapat dilihat pada permukaan baja. (8) 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 searak 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.⁽⁷⁾ Untuk orientasi kristalografi yang acak pada sejumlah butir, arah dari *slip* akan berbeda dari butir yang satu dengan butir yang lain. Pergerakan dislokasi yang terjadi pada *slip system* memiliki orientasi masing-masing. Deformasi plastis sebaiknya terjadi pada produksi bidang slip dan pemanjangan butir sepanjang arah dimana spesimen mengalami pemanjangan.⁽⁷⁾

2.5 Mekanisme Penguatan Dengan Penghalusan Butir

Sifat mekanis dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran dari butir atau diameter butir rata-rata dalam logam polikristal. Pada umumnya butir yang bersebelahan biasanya memiliki orientasi (kisi dan *lattice*) yang berbeda. Hal ini berarti oleh karena perbedaan orientasi tersebut maka akan timbul adanya batas butir. Saat deformasi plastis, slip atau pergerakan dislokasi berada dalam butir, misalnya dari butir A ke butir B dalam Gambar 2.6



Gambar 2.6. Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi⁽⁷⁾

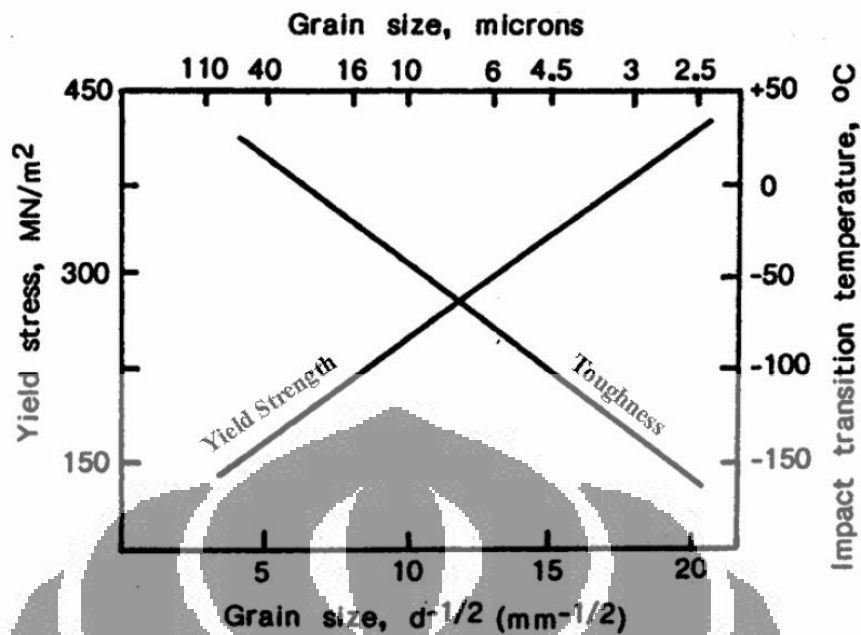
Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan:

1. Ketidaksamaan *arrangement* atom dalam area batas butir akan menghasilkan berubahnya slip plane dari butir satu ke butir lainnya.
2. Karena dua butir tersebut memiliki orientasi yang berbeda, dislokasi yang menuju butir B harus merubah arah pergerakannya (karena perbedaan orientasi tersebut mengakibatkan tingkat energi yang berbeda pula). Hal ini semakin sulit ketika misorientasi kristalografinya meningkat

Untuk mengetahui pengaruh ukuran butir dari teori diatas kita buktikan dengan *Hall petch Equation*. dengan d adalah diameter butir rata-rata, dan σ_0 dan k_y adalah konstanta untuk material tertentu. Persamaan 2.4 ini tidak berlaku untuk material polikristal dengan butir yang sangat besar dan dengan butir yang amat sangat halus.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad \dots \quad (2.4)$$

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 tarik σ_y bervariasi dengan ukuran butir.



Gambar 2.7 . Pengaruh Besar Butir terhadap Nilai Kekuatan ⁽¹⁰⁾

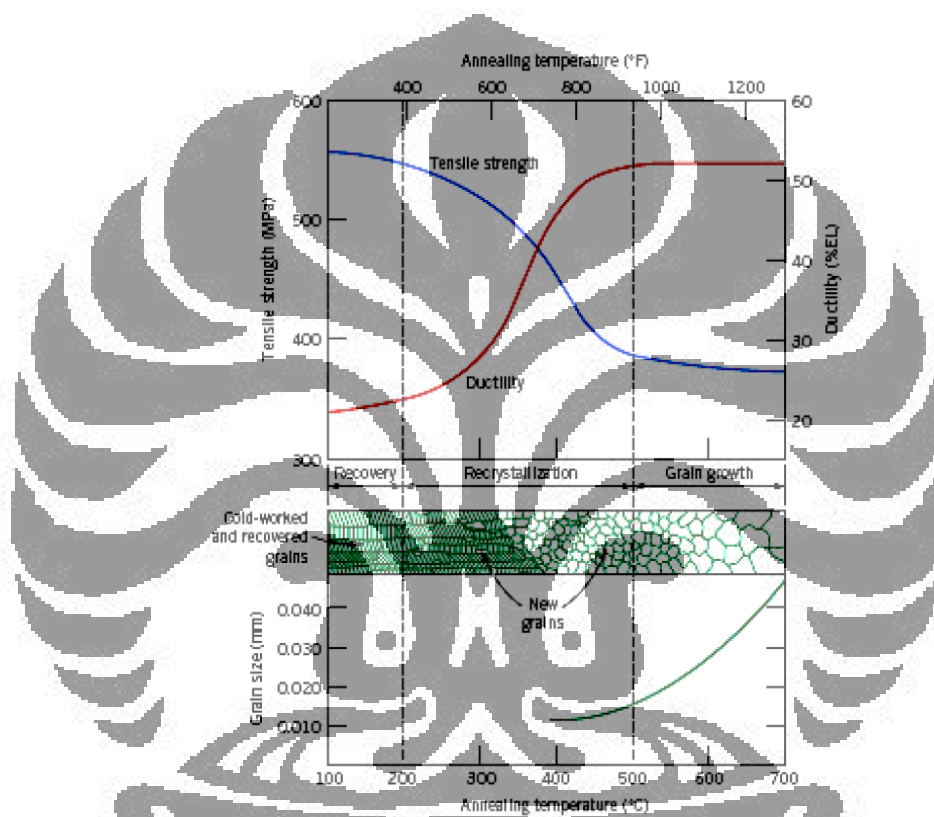
Ukuran butir dapat diatur oleh laju solidifikasi dari fasa cair, dan juga oleh deformasi plastis yang diikuti dengan perlakuan panas yang sesuai. Juga harus diperhatikan bahwa penghalusan butir (grain size reduction) meningkatkan tidak hanya kekuatan namun juga ketangguhan pada hampir kebanyakan paduan.

2.6 Proses *Recovery*, Rekrystalisasi, dan Pertumbuhan Butir

Material polikristalin yang mengalami deformasi plastis menunjukkan terjadinya perubahan pada bentuk butir, pengerasan regangan (strain hardening) dan peningkatan pada kepadatan dislokasi.⁽⁷⁾ Beberapa sisa energy internal disimpan dalam material sebagai energi regangan (strain energy), yang mana berhubungan dengan area tegangan (tensile), tekan (compressive), dan geser (shear) disekeliling dislokasi yang baru terbentuk. Kecenderungan sifat penyimpanan energi internal tersebut dapat dihilangkan setelah tahap pengerjaan dingin dengan perlakuan panas seperti proses anil (annealing). Penghilangan energi tersebut dilakukan dengan dua proses berbeda yang terjadi pada temperature yang dinaikkan yang kemudian diidentifikasi sebagai proses *Recovery* dan rekrystalisasi, yang juga dimungkinkan untuk pertumbuhan butir.

2.6.1 *Recovery*

Recovery adalah proses penghilangan energi internal (internal strain energy) yang tersimpan yang diperoleh selama proses pengerjaan dingin melalui perlakuan panas (heat treatment). Selama proses ini, sifat fisik dan mekanik dari baja pengerjaan dingin akan kembali seperti sebelum dilakukan pengerjaan dingin. ⁽⁸⁾ Proses *recovery* adalah proses pertama yang terjadi setelah deformasi. Pada tahapan ini tidak ada perubahan yang cukup berarti pada sifat mekanis dari material seperti yang terlihat pada Gambar 2.8



Gambar 2. 8. Skematis Proses *Recovery*, Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir ⁽⁷⁾

Perubahan mikrostruktur dari material selama tahapan *recovery* ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar. Untuk benda kerja yang butirnya memipih setelah canai dingin, tidak terlihat perubahan pada butir tersebut. Namun pada tingkatan submikroskopis, terjadi perubahan pada titik cacat dan klusternya, penghilangan dan pengaturan ulang dislokasi, serta pembentukan sub-butir dan pertumbuhannya. Perubahan mikrostruktural ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam dan tahapan *recovery* ini dipergunakan untuk proses stress-relieving. Hilangnya beberapa dislokasi mengakibatkan

berkurangnya kekuatan dari material, tetapi hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan sub-butir, yaitu butir dengan batas butir bersudut kecil. (2 30 misorientasi). Dari kedua efek yang dijelaskan tersebut didapat kekuatan material yang sama setelah dilakukan pengerjaan dingin.

2.6.1 Rekristalisasi

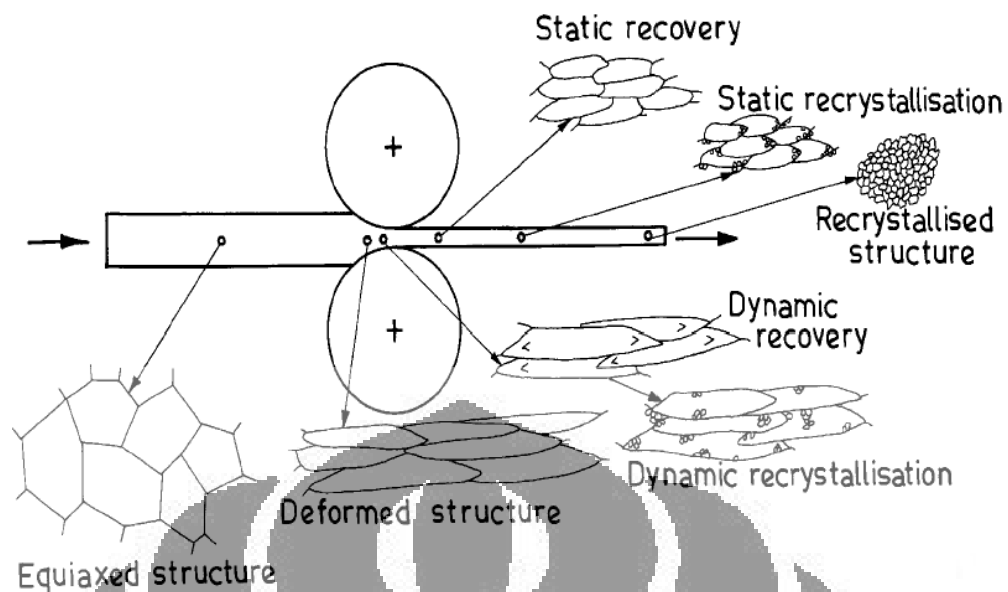
Ketika tahap *recovery* akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi. Rekristalisasi adalah proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Inti dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir dan permukaan untuk nukleasi heterogen adalah cacat mikrostruktur seperti permukaan batas butir dan inklusi. Butir yang baru tumbuh merupakan butir yang bebas regangan (*strain-free*) dan terikat dengan batas butir bersudut besar yang memiliki mobilitas sangat tinggi yang akan menyapu semua jejak dari butir yang terdahulu. Sehingga proses rekristalisasi mengarah kepada pembentukan formasi butir yang bebas energi internal dalam material yang telah mengalami proses pengerjaan dingin.⁽⁷⁾ Ketika semua butir terdahulu yang telah digantikan oleh butir baru yang bebas regangan, maka dapat dikatakan material tersebut telah terekristalisasi dengan sempurna (*fully recrystallized*). Seperti telah dijelaskan bahwa gaya penggerak untuk proses rekristalisasi adalah energi yang tersimpan saat pengerjaan dingin, maka jika pengerjaan dinginya tinggi, semakin kecil energy termal yang digunakan, berarti semakin rendah temperatur dari rekristalisasi. Pada rekristalisasi primer, pembentukan dan pertumbuhan terjadi pada matrik terdeformasi dari butir baru, yang mana bebas distorsi dan secara cukup lebih sempurna dibandingkan matriks setelah terpoligonisasi (Gorelik 1981). Proses perlakuan panas seperti proses anil diperlukan agar rekristalisasi dapat terjadi. Selama rekristalisasi, proses perbaikan sifat mekanik dan fisik telah selesai, kemudian terdapat perubahan pada *preferred orientation* sebelum pertumbuhan butir.

Perubahan orientasi ini terjadi penurunan yang signifikan pada kekuatan tarik dan kekerasan dan peningkatan keuletan yang tinggi pada baja. Faktor yang

paling penting yang mempengaruhi proses rekristalisasi pada logam dan paduannya adalah;

- (1) besaran deformasi / *amount of prior deformation*
- (2) temperature
- (3) waktu
- (4) besar butir awalan / *initial grain size*, dan
- (5) komposisi logam atau alloy (Smith 2004).

Volume terekristalisasi pada material meningkat selama proses anil (annealing) oleh karena dua proses: laju nukleasi dan pertumbuhan nuclei dimana laju tersebut diuraikan menjadi dua parameter yang dikenal: laju nukleasi (rate of nucleation), N , dan laju pertumbuhan (rate of growth), G . Keduanya bergantung pada sejumlah deformasi pada deformasi dingin (cold deformation). Pada deformasi panas (hot deformation), keduanya bergantung pada jumlah dan laju deformasi (Gorelik 1981). Dalam pengerjaan panas, proses rekristalisasi yang terjadi dapat dibagi menjadi dua, yaitu rekristalisasi dinamis dan rekristalisasi statis. Seperti telah dijelaskan bahwa anil panas adalah proses deformasi dan rekristalisasi pada saat yang hampir bersamaan. Proses rekristalisasi yang terjadi saat material sedang dideformasi disebut rekristalisasi dinamis, sedangkan rekristalisasi statis terjadi sesaat setelah material mengalami deformasi. Ilustrasi dari penjelasan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 . Perbandingan Antara Rekristalisasi Dinamik dan Statik ⁽¹¹⁾

Pada rekristalisasi dinamis, saat material mengalami deformasi, terjadi regangan di dalam material, dan apabila regangan tersebut adalah regangan kritis maka akan tersedia cukup energi untuk terbentuk nuklei pada batas butir yang terdeformasi. Proses ini dipengaruhi faktor faktor antara lain regangan, kecepatan regangan dan temperatur, seperti yang telah diteliti oleh Zener- Hollomon. Sama seperti proses rekristalisasi dinamis, pada proses rekristalisasi statis juga terbentuk nuklei, hanya saja pembentukan tersebut terjadi setelah deformasi. Dengan adanya temperatur yang tinggi (diatas temperatur rekristalisasi dari material), maka proses munculnya nuklei pada batas butir dapat terjadi dan proses rekristalisasi dapat berlangsung

2.6.2 Pertumbuhan Butir

Setelah proses rekristalisasi selesai, butir dengan bebas regangan selanjutnya akan tumbuh jika spesimen baja dibiarkan pada temperatur yang tinggi. Pertumbuhan butir ditunjukkan sebagai peningkatan besar butir rata-rata pada material polikristalin. Pertumbuhan butir biasanya merupakan lanjutan setelah proses rekoveri (recovery) dan proses rekristalisasi (recrystallization). Hal ini terjadi disebabkan adanya migrasi pada batas butir. Tidak semua butir dapat membesar. Oleh karena itu, butir yang lebih besar akan tumbuh yang kemudian

Universitas Indonesia

menghabiskan butir yang lebih kecil. ⁽⁷⁾ Penambahan proses anil (extended annealing) pada temperature tinggi dapat menyebabkan beberapa butir tumbuh menjadi butir dengan ukuran yang sangat besar, yang mana dikenal sebagai rekristalisasi sekunder (secondary recrystallization) atau pertumbuhan butir yang abnormal. ⁽⁸⁾

2.7 Pengerjaan Hangat

Pengerjaan Hangat merupakan salah satu metode perlakuan terhadap material logam yang menghasilkan struktur mikro yang sangat halus, pada material logam dan paduannya dengan temperatur kerja di antara pengerjaan panas dan pengerjaan dingin. Selain menghasilkan struktur mikro yang halus, proses tersebut juga akan mengalami pembentukan *subgrain* berukuran *micrometer* dan *sub-micrometer* pada butir yang berukuran lebih besar / kasar. Sebagai hasil pembentukan subgrain ini, sifat mekanis dari material akan meningkat. Deformasi plastis yang terjadi memberikan kontribusi pada pembentukan *grain sub-division* dan *local dynamic recovery* dan pengerjaan hangat akan terjadi proses rekristalisasi berkontribusi pada proses penghalusan butir.

Pengerjaan Hangat, proses pengerjaannya berada pada range temperatur 550°C - 850°C sehingga dapat dijelaskan bahwa metode ini sangatlah menghemat energi. Selain efisiensi energi, metode ini banyak diminati karena memiliki beberapa keuntungan lainnya. Sebagai contoh, jika dibandingkan dengan pengerjaan dingin / *cold working*, metode ini membutuhkan *deformation forces* yang lebih rendah, dapat diaplikasikan pada baja dengan range yang luas, memberikan rasio deformasi yang lebih besar, menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal dan menghasilkan mikrostruktur dengan tegangan sisa yang lebih rendah ^[12] Kemudian jika dibandingkan dengan pengerjaan panas / *hot working*, metode ini menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus dengan sifat mekanis yang tinggi, kualitas permukaan dan pengendalian dimensional yang lebih baik, material yang dibuang akibat proses dekarburisasi atau oksidasi yang lebih rendah ^[13] Juga terdapat studi yang menyatukan bahwa proses *warm working* berhubungan dengan range temperature

Universitas Indonesia

berada diantara *hot working* dan *cold working*, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian mengalami pengerasan tegangan / *strain hardened* dan sebagian mengalami rekristalisasi ^[14].

2.8 Kekerasan pada Material

Kekerasan dari suatu material menyiratkan perlawanan terhadap peformation permanen atau plastik. Ada tiga jenis umum kekerasan pengukuran tergantung pada cara di mana tes ini dilakukan : ⁽¹⁵⁾

- (1) kekerasan awal
- (2) kekerasan indentasi
- (3) kekerasan *rebound* atau dinamis

Dalam pengukuran kekerasan dinamis indentor biasanya jatuh ke permukaan logam. Uji kekerasan Vickers menggunakan berlian persegi-dasar piramida sebagai indentor tersebut. Uji kekerasan Vickers dijelaskan dalam ASTM Standar E92. Angka Kekerasan Piramida Berlian Angka atau kekerasan Vickers (VHN, atau VPH), didefinisikan sebagai beban dibagi dengan luas permukaan indentasi. Dalam prakteknya, daerah ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjangnya diagonal-diagonal. VHN dapat ditentukan dari persamaan berikut ⁽¹⁵⁾.

$$DPH = \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1.854P}{L^2} \dots\dots(2.5)$$

- Dimana : P = Beban (kgf)
- L = Panjang diagonal rata-rata (mm)
- θ = Sudut antara berlian = 136°

2.9 Korosi pada Material.

2.9.1 Definisi Korosi

Korosi adalah suatu proses degradasi material dan penurunan kualitas suatu material akibat pengaruh reaksi kimia dan elektrokimia dengan keadaan lingkungannya. Akibat reaksi ini sangat merugikan bagi industry karena bisa berakibat pada penurunan kualitas produksi, Kegagalan proses satu produksi hingga kerugian dalam hal ekonomi. Reaksi korosi terbagi dalam beberapa jenis dan jenis korosi itu dipengaruhi oleh keadaan lingkungannya seperti korosi *Uniform*, korosi *Pitting*, korosi SCC, korosi temperatur tinggi.

Dalam mekanisme korosi ada 4 komponen penting yang harus ada untuk terjadinya korosi yaitu:

1. Terdapat Anoda sebagai tempat terjadinya oksidasi, yang merupakan proses korosi terjadi
2. Terdapatnya Katoda sebagai daerah dimana terjadi reaksi reduksi dengan menerima elektron hasil proses oksidasi
3. Terdapatnya Elektrolit sebagai tempat electron bergerak, yang menghubungkan antara Katoda dan Anoda.
4. Terdapatnya Arus

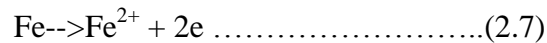
2.9.2 Mekanisme Korosi Dalam Lingkungan Aqueous

2.9.2.1 Reaksi Elektrokimia Korosi

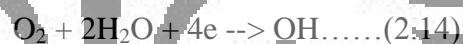
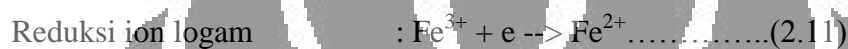
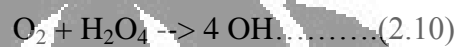
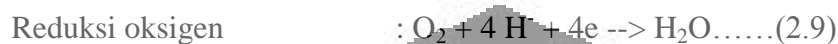
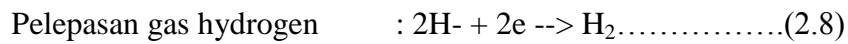
Pada reaksi korosi, reaksi elektrokimia memegang peranan yang sangat penting, karena dengan reaksi ini bisa mengakibatkan adanya proses transfer elektron yang membuat reaksi elektrokimia bisa terjadi. Reaksi elektrokimia meliputi reaksi anodik dan reaksi katodik. Reaksi tersebut digambarkan dibawah ini:



Proses korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n+) dalam pelepasan n electron. Harga dari n bergantung dari sifat logam sebagai contoh besi :



Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi electron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik. Reaksi katodik terletak di daerah katoda. Beberapa jenis reaksi katodik yang terjadi selama proses korosi logam yaitu :



2.9.3 Korosi pada air laut

Air laut merupakan salah satu lingkungan yang tingkat korosifitasnya tinggi. Hal ini karena dalam air laut terdapat berbagai macam ion elektrolit. Seperti ion klorida, natrium (penyusun utama air laut) magnesium, *sulfate*, magnesium, kalsium, karbonat dll. Berikut adalah gambaran kondisi garam-garam elektrolit pada air laut.

Tabel 2.4. Kandungan dalam Air Laut⁽¹⁶⁾

Constituent	G/Kg of Water of		Anions, percent	
	Salinity, 35 ‰	Cations, percent		
Chloride	19.353	Na ⁺ 1.056	Cl ⁻ 1.898	
Sodium	10.76	Mg ⁺⁺ 0.127	SO ₄ ⁻ 0.265	
Sulphate	2.712	Ca ⁺⁺ 0.040	HCO ₃ ⁻ 0.014	
Magnesium	1.294	K ⁺ 0.038	Br ⁻ 0.0065	
Calcium	0.413	Sr ⁺⁺ 0.001	F ⁻ 0.0001	
Potassium	0.387			
Bicarbonate	0.142	Total 1.262	Total 2.184	
Bromide	0.067			
Strontium	0.008			
Boron	0.004			
Fluoride	0.001			

Pada percobaan biasanya digunakan air laut buatan dimana air laut buatan ini memiliki agresifitas yang lebih besar dibandingkan dengan air laut alami. Hal ini karena pada air laut alami masih ada ion Mg^{2+} dan Ca^{2+} . Keberadaan ion ini bisa memperkecil laju korosi akibat kemampuannya dalam membentuk lapisan $CaCO_3$ dan $Mg(OH)_2$ dipermukaan material hasil dari reaksi katodik oksigen dipermukaan logam.

Pada air laut ada beberapa faktor yang bisa mempengaruhi laju korosi diantaranya adalah kandungan oksigen terlarut, kecepatan aliran air, temperatur, dan kandungan klorida. Berikut beberapa contoh faktor yang mempengaruhi laju korosi pada air laut.

Tabel 2.5. Faktor yang Mempengaruhi Laju Korosi pada Air Laut

TABLE 3. FACTORS IN SEAWATER ENVIRONMENT^(a)

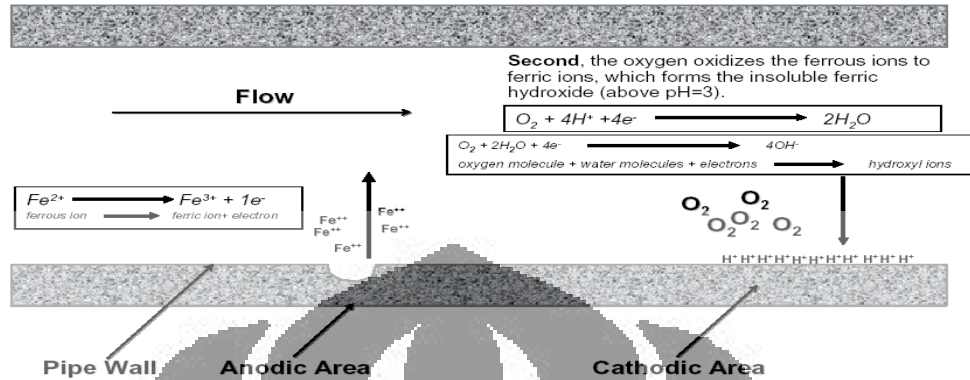
Chemical	Physical	Biological
Dissolved Gases ⁽¹⁾ Oxygen Carbon dioxide	Velocity ⁽³⁾ Air bubbles Suspended silt	Biofouling ⁽⁶⁾ Hard-shell types Types without hard shells Mobile and semimobile types
Chemical Equilibrium ⁽²⁾ Salinity pH Carbonate solubility	Temperature ⁽⁴⁾	Plant Life Oxygen generation Carbon dioxide consumption
	Pressure ⁽⁵⁾	Animal Life Oxygen consumption Carbon dioxide generation

2.9.3.1 Kandungan Oksigen

Pada air laut kandungan oksigen faktor utama yang dapat mempercepat laju korosi. Hal ini adalah sebagai akibat prinsip korosi dimana laju reaksi anodik dipengaruhi oleh laju reaksi katodik. Pada air laut terdapat reaksi katodik dari oksigen, pada reaksi katodik ini oksigen yang ada dalam air laut akan bereaksi dengan hidrogen, reaksi ini membuat difusi oksigen ke permukaan logam menjadi lebih cepat dan membuat oksigen terdepolarisasi di katoda. Menurut reaksi kimia bisa dilihat sebagai berikut

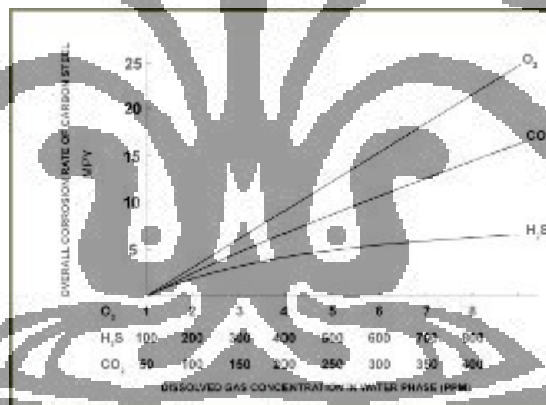


Kemudian oksigen yang ada dipermukaan akan mengikat air (H₂O) membuat oksigen menjadi tereduksi dengan reaksi seperti pada reaksi no (2.15) diatas. Berikut gambaran reaksi korosi akibat keberadaan oksigen dalam larutan.



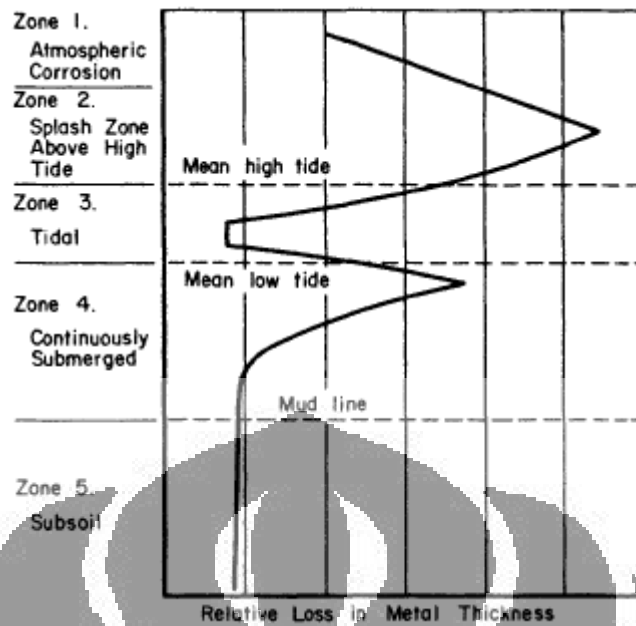
Gambar 2.10. Korosi yang Diakibatkan oleh Oksigen yang Terdepolarisasi di Permukaan Katoda

Kadar oksigen dalam lingkungan air laut bervariasi, semakin tinggi kadar salinitas, maka kandungan oksigen terlarut akan semakin rendah.



Gambar 2.11. Pengaruh Oksigen Terlarut terhadap Laju Korosi

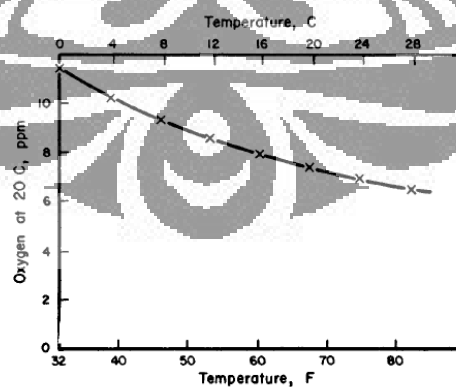
Namun umumnya kandungan oksigen air laut berkisar antara 12 ppm hingga 4 ppm tergantung dari keadaan biota laut dan kedalaman.



Gambar 2.12. Pengaruh Kedalaman terhadap Laju Korosi

2.9.3.2 Temperatur

Dengan adanya peningkatan temperatur berarti adanya energi yang cukup untuk mempercepat laju reaksi kimia. Namun dilain hal terdapat penurunan kadar oksigen pada temperatur yang lebih tinggi. Dan membuat reaksi terbentuknya kerak menjadi lebih tinggi, kedua hal tersebut membuat laju korosi menurun(seawater)



Gambar 2.13. Pengaruh Temperatur terhadap Kadar Oksigen

2.9.3.3 Salinitas

Semakin tinggi kadar elektrolit NaCl maka kecenderungan terjadinya reaksi korosi akan semakin cepat terjadi. Hal itu disebabkan oleh karena konduktivitas larutan semakin tinggi dalam menghantarkan elektron

2.9.3.4 Kecepatan

Adanya pengaruh kecepatan fluida membuat laju korosi semakin meningkat Hal ini disebabkan karena pergerakan oksigen ke permukaan daerah katodik menjadi lebih cepat terjadi dan membuat oksigen lebih mudah terdepolarisasi di permukaan katoda. Ilustrasi dari pergerakan oksigen ke permukaan logam adalah sebagai berikut



Gambar 2.14. Ilustrasi Pergerakan Oksigen di Permukaan Logam

2.9.4 Pengukuran Laju Korosi

2.9.4.1 Metoda Polarisasi dengan Analisa Tafel

Polarisasi adalah suatu metoda pengukuran laju korosi pada keadaan yang menyimpang dari keadaan setimbangnya, unsure yang penting untuk kita ketahui dalam pengukuran laju korosi pada pengukuran polarisasi adalah sesuai dengan persamaan dibawah, yakni ⁽¹⁷⁾ ;

$$CR = \frac{0,129 \times W \times i}{D} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

CR = laju korosi (mpy)

W = berat ekuivalen

i = rapat arus ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

D = berat jenis (gram/cm^3)

2.9.5 Pengaruh Derajat Deformasi terhadap Korosi

Akibat canai hangat, suatu material akan mengalami deformasi, dimana akan timbul *stress cell*. *Stress cell* timbul karena ada bagian yang mengalami tegangan yang berbeda dengan bagian lainnya. Bagian yang mengalami tegangan yang lebih besar akan menjadi anoda dan akan terkorosi lebih hebat. Sebagai contoh batang logam yang ditebuk dan sebuah paku. Pada batang logam yang ditebuk, korosi akan lebih cepat terjadi pada daerah tekukannya karena telah mengalami deformasi berupa tegangan. Sedangkan pada sebuah paku, daerah yang lebih cepat terkorosi adalah bagian kepala dan ujungnya.

Perlakuan canai panas atau deformasi merupakan salah satu cara untuk memodifikasi sifat suatu material. Perlakuan ini selain memodifikasi material secara bentuk fisik juga dapat merubah dalam hal bentuk dan jenis mikrostruktur yang dibentuk. Terkait dengan adanya perubahan morfologi mikrostruktur dapat mempengaruhi beberapa sifat dasar dari material tersebut, salah satunya adalah adanya perubahan terhadap ketahanan korosi. Perubahan mikrostruktur ini mengakibatkan terjadinya perubahan kerapatan dislokasi dan perubahan distorsi dalam atom.

Pemberian deformasi ini mengakibatkan meningkatnya besar tegangan yang dimiliki karena makin rapatnya dislokasi yang merupakan cacat Kristal. Sebagaimana diketahui, bahwa dengan terjadinya peningkatan regangan dan ini akan berakibat pada sifat korosinya, dimana daerah pada suatu material yang memiliki tegangan yang lebih tinggi bersifat akan lebih anodic, sedangkan bagian yang kurang tergangannya akan bersifat katodik, karena adanya perbedaan ini korosi yang terjadi cenderung korosi galvanis.

Sel galvanis mikro juga dapat terjadi akibat adanya perubahan mikrostruktur itu sendiri tanpa melihat adanya perbedaan tegangan antar daerah,

Universitas Indonesia

perbedaan antara daerah butir dan batas butir juga berpengaruh kepada korosi galvanis mikro. Perbedaan antara daerah butir dan batas butir ini terjadi karena adanya perbedaan energi bebas pada kedua daerah tersebut. Dimana energi bebas pada batas butir memiliki nilai yang lebih tinggi daripada pada butir, sehingga apabila batas butir meningkat akibat perlakuan deformasi, maka akan makin tinggi pula energi bebas dan potensial pun akan menjadi negatif, sehingga laju korosi material tersebut akan meningkat. Hal ini juga berlaku sebaliknya^[18]. Sesuai dengan persamaan Gibbs yaitu:

$$\Delta G = -nFE \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana :

- e = electron yg ditransfer pada reaksi korosi
- F = konstanta faraday = 96500 coulomb/mol
- E = potensial (V)

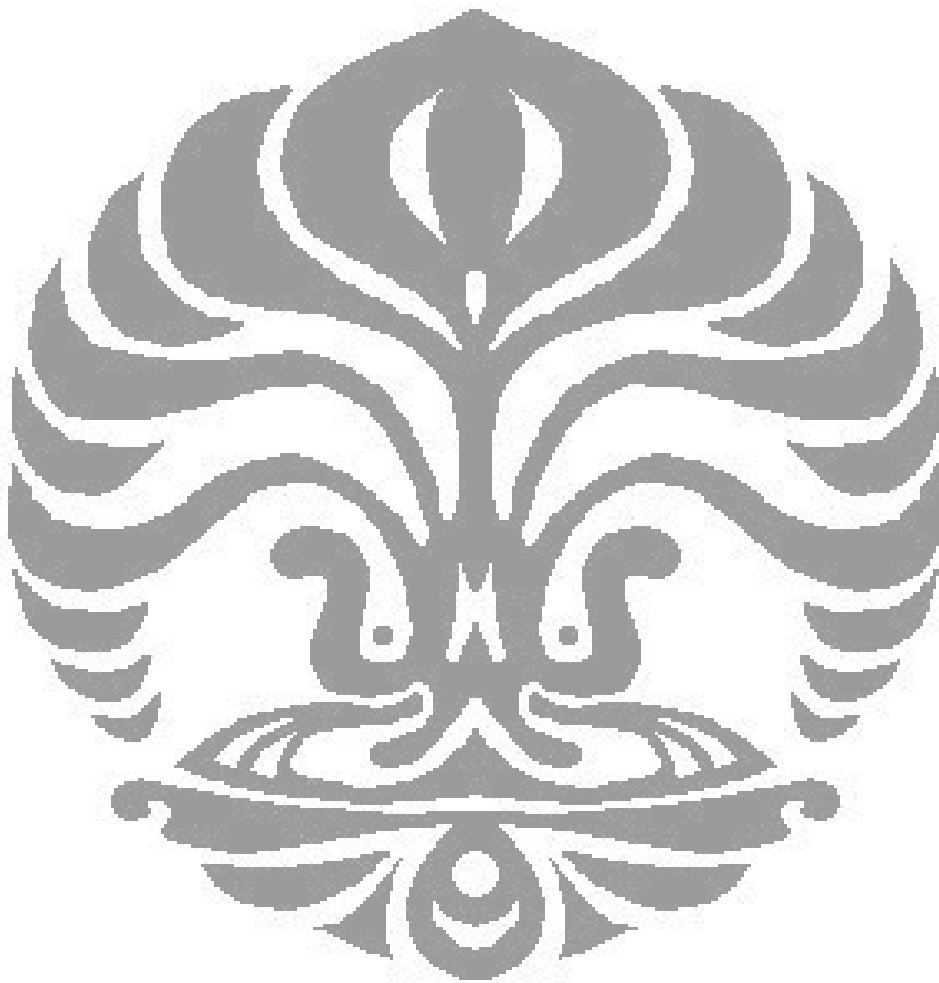
Maka semakin positif energi bebas maka reaksi akan berjalan tidak spontan, dan kebalikkannya semakin negatif energi bebas maka reaksi akan berjalan spontan.

2.9.6 Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Korosi

Banyak sifat mekanis material ditingkatkan dengan berbagai macam perlakuan panas. Tetapi, beberapa sifat seperti kekerasan dan kekuatan sering dicapai dengan terkompensasinya ketahanan korosinya. Sebagai contoh, kekerasan dan kekuatan baja martensitic berbanding terbalik dengan ketahanan korosi yang lebih rendah dibanding baja feritic ataupun austenitic. Kekuatan tinggi yang dicapai untuk baja penguatan endapan adalah melalui pembentukan endapan kedua selama pemanasan larutan dan proses *aging*. Telah disebutkan diatas, endapan dengan sifat elektrokimia sangat jelas berbeda dari matriks yang memiliki efek yang parah terhadap korosi.^[18] Proses seperti pengerjaan dingin, dimana material secara plastis berubah menjadi bentuk yang diinginkan, mengarah pada pembentukan butir yang memanjang dan sangat berbeda dan

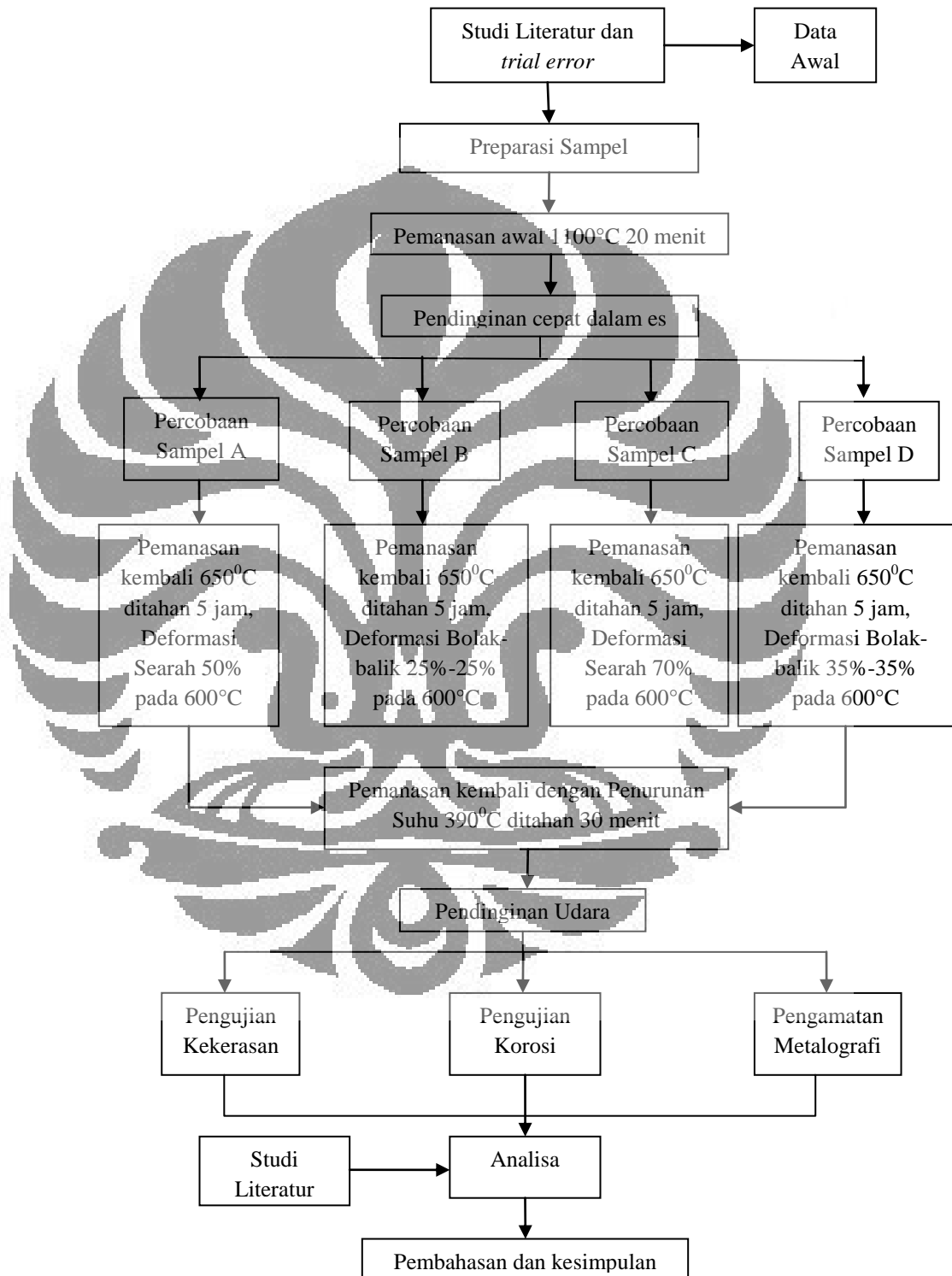
Universitas Indonesia

penurunan pada ketahanan korosi. Pengerjaan dingin juga dapat mengakibatkan tegangan sisa yang dapat membuat material rentan terhadap *stress corrosion cracking*. Sebuah kemajuan dalam ketahanan korosi dapat dicapai dengan melakukan *annealing* pada temperatur dimana rekristalisasi butir terjadi. Anneal sebagian dapat menyebabkan terjadinya *stress relief* tanpa efek besar pada keseluruhan kekuatan material.



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian

Universitas Indonesia

3.2 Alat Dan Bahan

3.2.1 Alat

1. Mesin rol dengan kapasitas 20 ton
2. Mesin pemanas / *oven carbolite*
3. Mesin bor
4. *Software Work Bench for PC*
5. Termokopel
6. Mesin Komputer Pengukur Temperatur
7. Jangka sorong
8. Mesin amplas
9. Mesin poles
10. Mikroskop optik
11. *Beaker Glass*
12. *Multi tester*
13. Pipet
14. Mesin CMS
15. Mesin uji kekerasan Vickers
16. Ember
17. Air dan Es
18. Printer
19. Jangka sorong
20. Palu
21. Tang
22. Elektoda SCE
23. Anoda Karbon Inert
24. Larutan NaCl 3,5 %
25. Resin
26. *Hardener*
27. Kertas amplas *grid* #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500
28. Titanium Oksida
29. Kain poles / beludru

30. Zat etsa kimia Nital 3 %, picral 30%, alkohol 96 %

3.2.2 Bahan

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah material Baja Karbon Rendah AISI 1013 dengan dimensi 70 x 30 x 6 (mm) dan komposisi:

Tabel 3. 1. Komposisi Sampel

Kode Sampel Sample Code	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
01	0.120	0.198	< 0.003	0.008	0.636	< 0.005	< 0.003
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	< 0.005	< 0.002	0.018	< 0.002	0.016	0.037	98.913

Sampel tersebut dilakukan perlakuan panas kemudian dilakukan proses canai pada temperatur hangat dengan variasi besar dan metode deformasi canai. Setelah itu dilakukan pengujian kekerasan, pengamatan struktur mikro, dan pengujian ketahanan korosi.

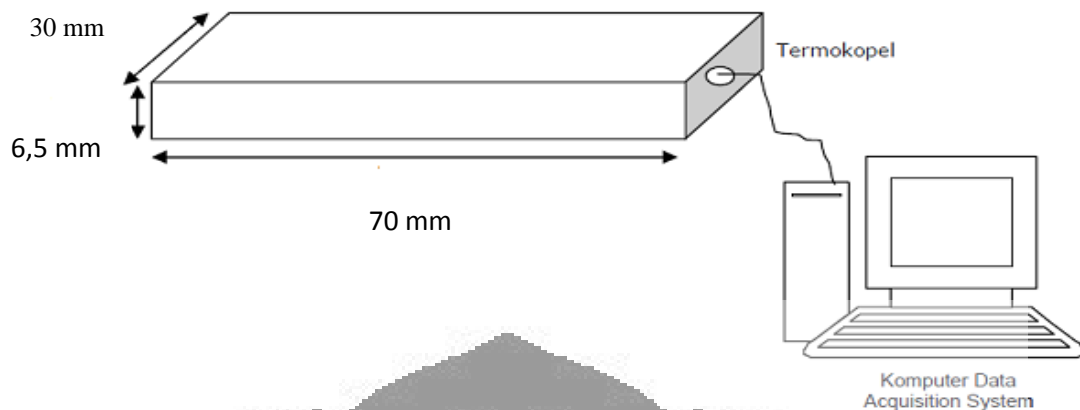
3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1. Pemilihan Material

Berdasarkan relevansi antara studi literatur maka material yang akan digunakan sebagai sampel uji adalah baja AISI 1013 yang merupakan baja karbon rendah.

3.3.2. Preparasi Sampel

Sampel yang digunakan pada penelitian ini dipotong sehingga berbentuk balok. Sampel diberi lubang untuk meletakkan kawat termokopel sebagai alat pengukur temperatur benda uji. Pengukuran temperatur menggunakan data *acquisition system* yang dihubungkan dengan komputer. Kedalaman lubang adalah 10 mm dengan diameter 2,5 mm yang disesuaikan diameter termokopel. Ilustrasi sampel dan pemasangan termokopel dapat dilihat pada Gambar 3.2.

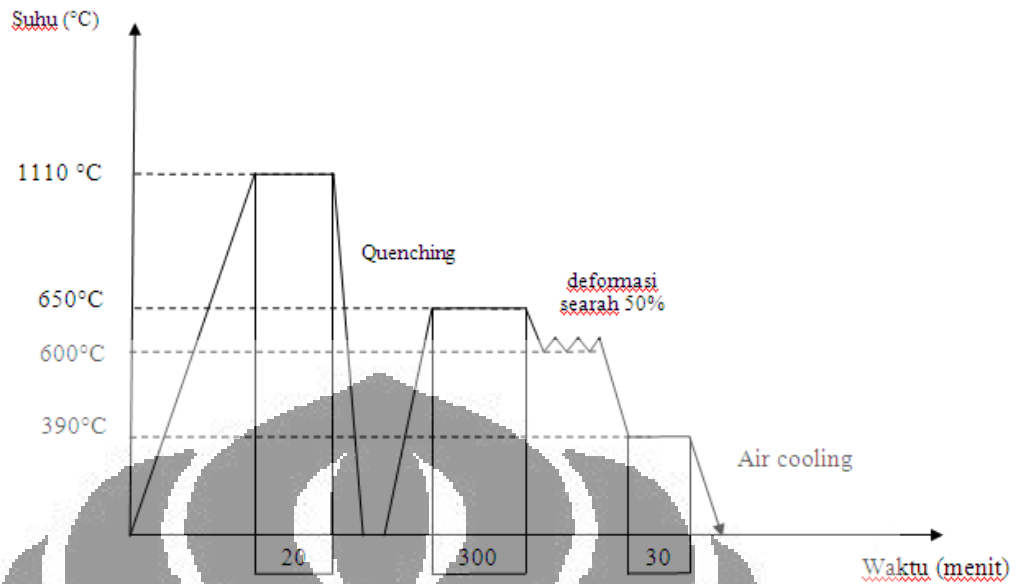


Gambar 3.2. Ilustrasi Sampel dan Pemasangan Termokopel

3.3.3 Proses Pemanasan

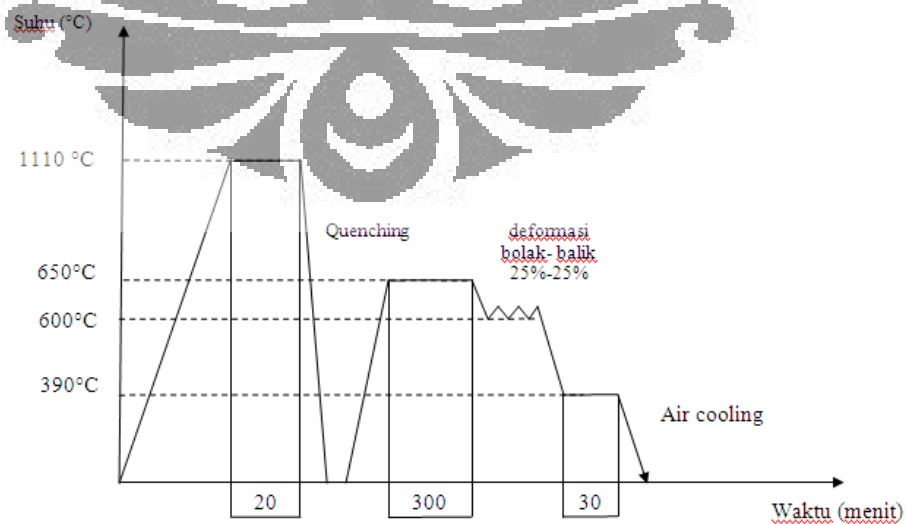
Seluruh sampel yang akan diukur disiapkan untuk berbagai pengujian masing-masing dimasukkan ke dalam dapur perapian dengan temperatur 1100 °C selama 20 menit supaya temperatur sampel homogen. Sampel tersebut langsung didinginkan cepat ke dalam air es. Selanjutnya sampel dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 650 °C selama 5 jam dan dicanai pada temperatur 600 °C dengan deformasi searah 50% dan 70% serta bolak-balik 25%-25% dan 35%-35%. Kemudian sampel dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 390 °C selama 30 menit dan didinginkan pada temperatur ruang. Berikut rincian perlakuan panas yang diaplikasi pada masing-masing sampel:

1. Sampel A dipanaskan pada temperatur 1100°C selama 20 menit, kemudian di dinginkan cepat ke dalam es. Sampel tersebut dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 650 °C selama 5 jam dan dicanai pada temperatur 600 °C dengan deformasi searah 50%. Kemudian sampel dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 390°C selama 30 menit dan didinginkan pada temperatur ruang. Perlakuan panas dan proses canai hangat sampel A dapat dilihat pada bagan di bawah ini :



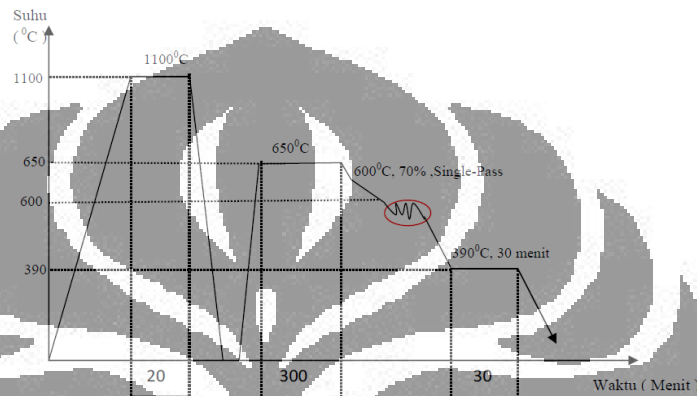
Gambar 3.3. Skema Perlakuan pada Sampel A

2. Sampel B dipanaskan pada temperatur 1100°C selama 20 menit, kemudian di dinginkan cepat ke dalam es. Sampel tersebut dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 650°C selama 5 jam dan dicanai pada temperatur 600 °C dengan deformasi bolak-balik 25%-25%. Kemudian sampel dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 390°C selama 30 menit dan didinginkan pada temperatur ruang. Perlakuan panas dan proses canai hangat sampel B dapat dilihat pada bagan di bawah ini :



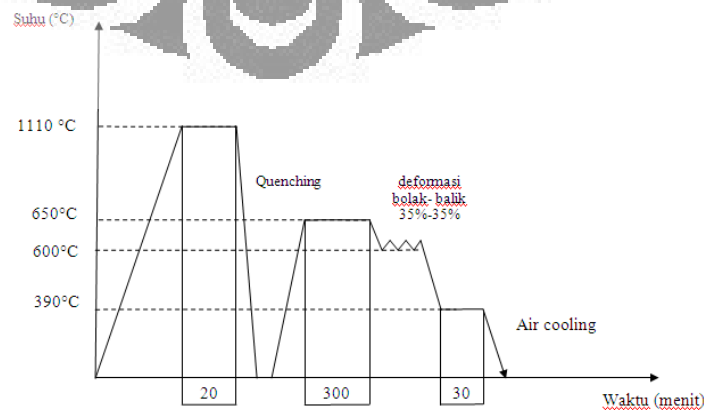
Gambar 3.4. Skema Perlakuan pada Sampel B

3. Sampel C dipanaskan pada temperatur 1100°C selama 20 menit, kemudian di dinginkan cepat ke dalam es. Sampel tersebut dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 650°C selama 5 jam dan dicanai pada temperatur 600°C dengan deformasi searah 70% . Kemudian sampel dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 390°C selama 30 menit dan didinginkan pada temperatur ruang. Perlakuan panas dan proses canai hangat sampel C dapat dilihat pada bagan di bawah ini :



Gambar 3.5. Skema Perlakuan pada Sampel C

4. Sampel D dipanaskan pada temperatur 1100°C selama 20 menit, kemudian di dinginkan cepat ke dalam es. Sampel tersebut dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 650°C selama 5 jam dan dicanai pada temperatur 600°C dengan deformasi bolak-balik $35\%-35\%$. Kemudian sampel dimasukkan kembali ke dalam dapur perapian dengan temperatur 390°C selama 30 menit dan didinginkan pada temperatur ruang. Perlakuan panas dan proses canai hangat sampel B dapat dilihat pada bagan di bawah ini:

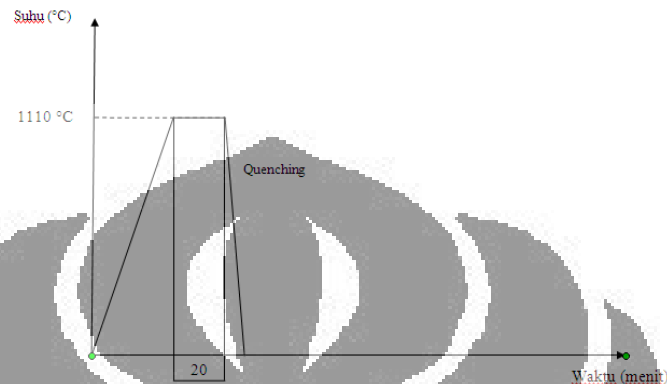


Gambar 3.6. Skema Perlakuan pada Sampel D

5. Sampel E

Sampel tidak diberi perlakuan sama sekali karena sampel tersebut akan menjadi tolak ukur bagi proses selanjutnya.

6. Sampel F dipanaskan pada temperatur 1100°C selama 20 menit, kemudian di dinginkan cepat ke dalam es.



Gambar 3.7. Skema Perlakuan pada Sampel F

3.3.4 Proses Canai Hangat

Canai hangat dilakukan dengan deformasi searah 50% dan 70% serta bolak-balik 25%-25% dan 35%-35%. Pencanaian dilakukan dengan menggunakan mesin canai merk ONO dengan kapasitas beban maksimum 20 tonF yang berada di Laboratorium Metalurgi Mekanik Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Proses canai ini dilakukan satu persatu setiap benda uji.

3.3.5 Pendinginan

Proses pendinginan akhir pada seluruh sampel dilakukan dengan temperatur udara.

3.3.6 Uji Kekerasan⁽²¹⁾

Kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan beban indentasi atau penetrasi (penekanan). Umumnya pengujian kekerasan menggunakan tiga macam metode pengujian kekerasan, yakni:

Universitas Indonesia

(a) Brinell (HB / BHN); (b) Rockwell (HR / RHN); (c) Vickers (HV / VHN).

Pemilihan masing-masing skala (metode pengujian) tergantung pada permukaan material, jenis dan dimensi material, jenis data yang diinginkan dan ketersediaan alat uji. Untuk mengetahui nilai kekerasan benda kerja, digunakan metode *Vickers* sesuai dengan ASTM E 92. Angka Kekerasan Piramida Berlian Angka atau kekerasan Vickers (VHN, atau VPH), didefinisikan sebagai beban dibagi dengan luas permukaan indentasi. Dalam prakteknya, daerah ini dihitung dari pengukuran mikroskopik dari panjangnya diagonal-diagonal. VHN dapat ditentukan dengan persamaan 2.5.

3.3.7 Preparasi, Pengujian Metalografi dan Pengamatan Mikrostruktur

Sampel mengalami proses pemotongan untuk pengujian metalografi agar mudah dalam pengamatan. Lalu sampel dilakukan proses *mounting* agar mudah dalam proses pengamplasan dan pemolesan. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang dimulai dari amplas kasar hingga amplas halus untuk mendapatkan permukaan benda uji yang halus dan merata di seluruh permukaan. Ukuran kekasaran dari kertas amplas yang digunakan yaitu: #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam *mesh*). Proses pengamplasan dilakukan dengan merubah arah pengamplasan setiap pergantian tingkat kekasaran kertas amplas, sehingga bisa dipastikan sisa pengamplasan sebelumnya telah hilang dan didapat permukaan yang halus dari benda uji. Setelah itu benda uji dipoles untuk mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Proses pemolesan dilakukan dengan menggunakan kain poles dan bahan poles berupa *Titanium Oxide*.

Proses selanjutnya yaitu etsa yang bertujuan untuk memunculkan jejak batas butir dalam struktur akhir dari benda uji. Zat etsa dan waktu etsa yang tepat sangat berpengaruh untuk mendapatkan struktur mikro yang baik. Proses etsa yang dilakukan merupakan etsa kimia larutan natal 3 % dan picral 30%.

Keseluruhan proses dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST di Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

3.3.8 Pengamatan Struktur Mikro

Setelah didapat foto mikro dari benda uji, kemudian dilakukan pengamatan struktur mikro. Pengamatan dilakukan untuk melihat fasa apa saja yang terjadi dan seperti apa bentuk struktur mikronya pada hasil proses pemanasan ini. Pengamatan struktur mikro ini menggunakan etsa nital 3 % dan picral 30%.

3.3.9 Uji Ketahanan Korosi⁽⁸⁾

Pengukuran uji ketahanan korosi menggunakan metode polarisasi dan diperoleh laju korosi. Penghitungan ini merujuk ke standar ASTM G 102. Polarisasi adalah suatu metoda pengukuran laju korosi pada keadaan yang menyimpang dari keadaan setimbangnya, unsure yang penting untuk kita ketahui dalam pengukuran laju korosi pada pengukuran polarisasi adalah sesuai dengan persamaan 2.16.

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Komposisi

Komposisi kimia material diperlihatkan pada Tabel 4.1 di bawah.

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja

Unsur	Persentase (%)	
	Hasil pengujian	Standar (AISI/SAE) ⁽⁸⁾
C	0,120	0.11–0.16
Mn	0,636	0.50–0.80
Si	0,198	-
P	0,008	0.040 max
S	<0,003	0.050 max
Mo	<0,0050	-
Cr	<0,003	-
Al	0,037	-
Ni	< 0,0050	-
Cu	0,018	-

Hasil komposisi kimia yang didapatkan sesuai dengan standar AISI/SAE untuk komposisi kimia baja karbon 1013. Berdasarkan pada hasil pengujian komposisi kimia di atas dapat digunakan untuk menghitung temperatur *martensite start* (M_s) menggunakan persamaan :⁽⁵⁾

$$M_s (^{\circ}C) = 512 - 453C - 16,9Ni + 15Cr - 9,5Mo + 217(C)^2 - 71,5(C)(Mn) - 67,6 (C)(Cr) \dots \dots \dots (4.1)$$

Temperatur Ms ini dapat digunakan sebagai sebagai dasar menentukan pada temperatur berapa martensit mulai terbentuk. Menurut rumus tersebut didapatkan hasil temperatur Ms berada pada temperatur 455,196584 °C. Dengan temperatur Ms sekitar 455°C ini maka *quenching* secara teori telah berhasil mendapatkan martensit. Sedikitnya kandungan unsur paduan seperti molydenum, nikel dan vanadium tidak akan menurunkan temperatur Ms secara drastis.

4.2 Hasil Pengukuran Ketebalan Sampel

Deformasi yang akan terjadi pada sampel terlebih dahulu dihitung melalui persamaan sebagai berikut: ⁽¹⁵⁾

$$\% \text{ Deformation} = \ln \frac{h_0}{h_f} \quad (4.2)$$

% *Deformation* = Derajat Deformasi

h_0 = Ketebalan Awal (mm)

h_f = Ketebalan Akhir (mm)

Pengukuran terhadap ketebalan akhir masing-masing sampel dilakukan setelah setiap proses proses kontinu yaitu : austenisasi 1100 °C ditahan selama 20 menit, *quenching* dengan air es, *tempering* pada temperature 650 °C ditahan selama 5 jam, canai hangat pada temperature 600 °C, dan *annealing* pada temperature 390 °C ditahan selama 30 menit. Pengukuran ketebalan dilakukan dengan menggunakan jangka sorong.

Tabel 4. 2. Tabel Pengukuran Ketebalan Sampel

No	Sampel	Temperatur Akhir Canai	Tebal Awal (mm)	Metode Deformasi	Derajat Deformasi	Tebal Akhir (mm)	Deformasi Aktual
1	A	600°C	6.5	Searah	50%	4.75	0.3136576
2	B	600°C	6.5	Bolak-Balik	25%-25%	4.45	0.3788981

3	C	600°C	6.5	Searah	70%	4.05	0.4730853
4	D	600°C	6.5	Bolak-Balik	35%-35%	4.3	0.4131872
5	E	-	6.5	-	-	6.5	-
6	F	-	6.5	-	-	6.5	-

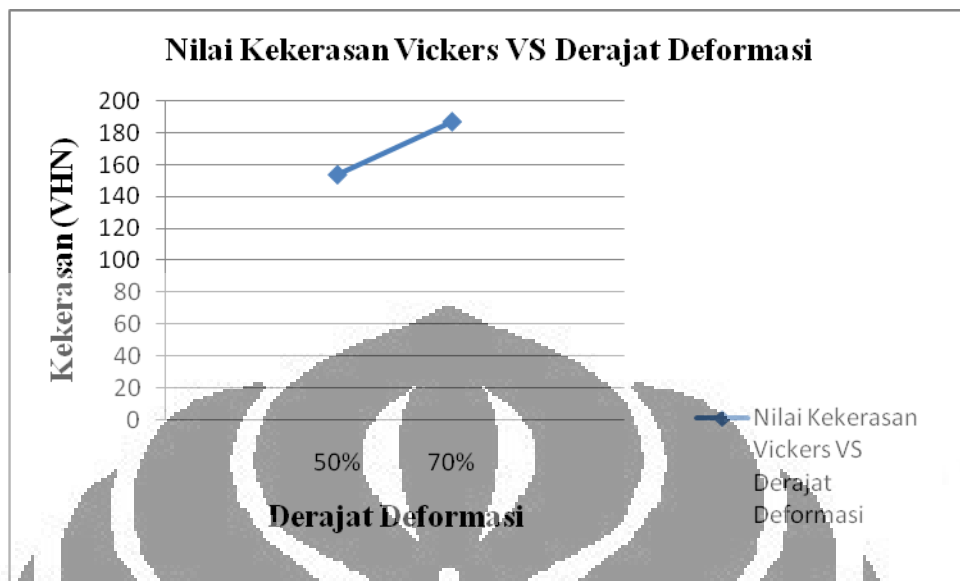
4.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada seluruh sampel sebelum dan setelah mengalami proses proses kontinu yaitu : austenisasi 1100 °C ditahan selama 20 menit, *quenching* dengan air es, *tempering* pada temperature 650 °C ditahan selama 5 jam, pemanai hangat pada temperature 600 °C, dan *annealing* pada temperature 390 °C ditahan selama 30 menit. Metode pengujian nilai kekerasan yang digunakan adalah metode Vickers. Hasil pengujian nilai kekerasan secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.3.

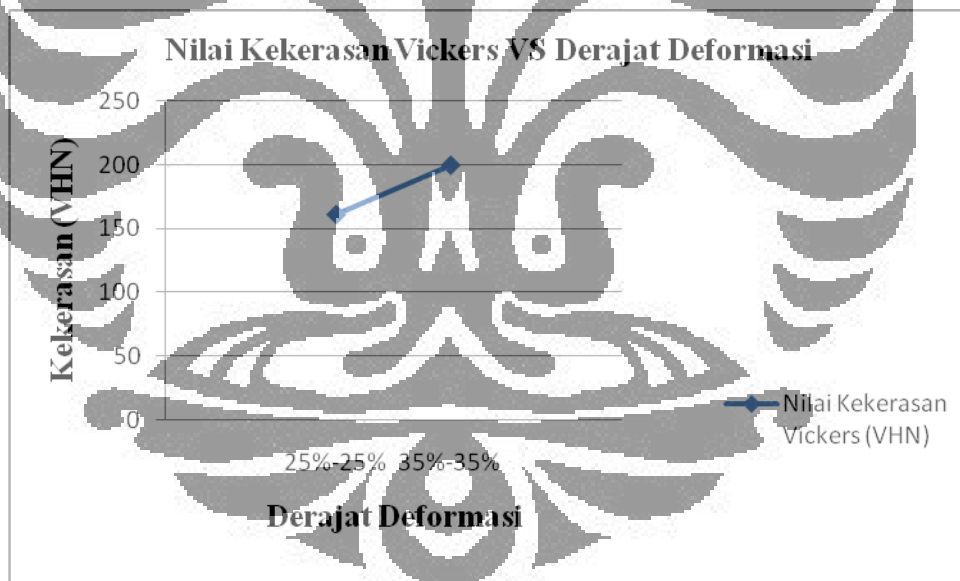
Tabel 4.3. Tabel Pengujian Kekerasan

No	Sampel	Metode Deformasi	Derajat Deformasi	Nilai Kekerasan Vickers (VHN)
1	A	Searah	50%	154
2	B	Bolak-Balik	25%-25%	161
3	C	Searah	70%	187
4	D	Bolak-Balik	35%-35%	199
5	E	-	-	202
6	F	-	-	205

4.3.1 Hubungan Kekerasan terhadap Derajat Deformasi



Gambar 4.1. Grafik Hubungan Nilai Kekerasan dengan Derajat Deformasi Metode Search



Gambar 4.2. Grafik Hubungan Nilai Kekerasan dengan Derajat Deformasi Metode Bolak-Balik

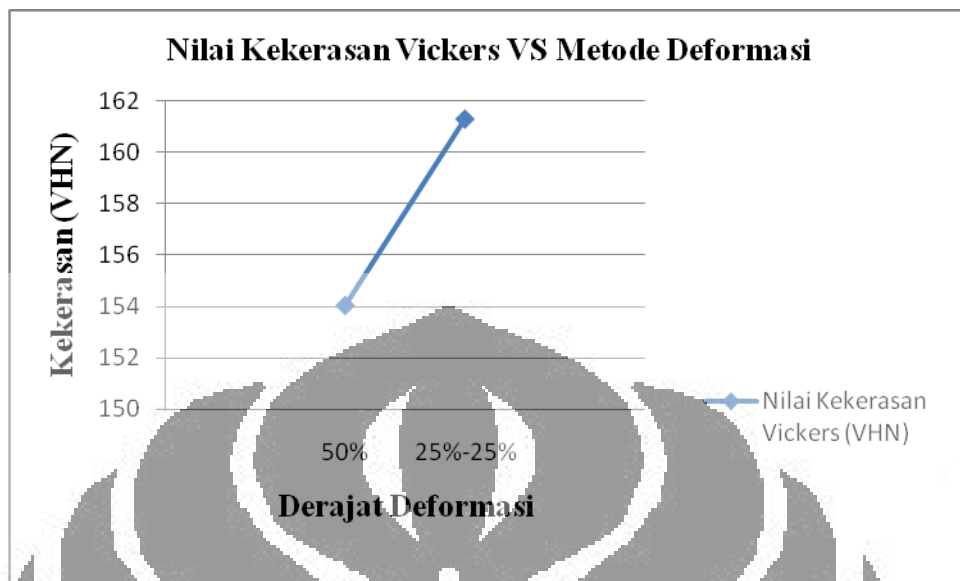
Gambar 4.1 dan 4.2 mengilustrasikan nilai kekerasan yang didapat dari pengujian pada sampel yang telah mengalami proses austenisasi pada temperature 1100 °C ditahan selama 20 menit, *quenching* dengan air es, *tempering* pada temperature 650 °C ditahan selama 5 jam, canai hangat pada temperature 600 °C, dan *annealing* pada temperature 390 °C ditahan selama 30 menit serta sampel

awal. Hasil pengujian kekerasan tersebut menunjukkan hasil sebagai berikut; sampel A dengan deformasi searah 50% menghasilkan kekerasan 154 VHN, sampel C dengan deformasi searah 70% menghasilkan kekerasan 187 VHN, sampel B dengan deformasi bolak-balik 25%-25% menghasilkan kekerasan 161 VHN, dan sampel D dengan deformasi bolak-balik 35%-35% menghasilkan kekerasan 199 VHN.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, terlihat bahwa seiring dengan peningkatan derajat deformasi maka nilai kekerasan dari sampel mengalami kenaikan. Peningkatan derajat deformasi akan menyebabkan nilai kekerasan dari sampel mengalami kenaikan.⁽¹⁵⁾

Perlakuan panas *tempering* setelah pendinginan cepat, dan *annealing* setelah canai hangat pada dasarnya adalah memberikan energi termal yang akan menggetarkan atom-atom sehingga terjadi difusi atom antara butir yang satu ke butir yang lainnya. Difusi atom tersebut terjadi melalui batas butir dari butir yang kecil menuju yang besar. Batas butir ini merupakan penghalang yang akan menghambat pergerakan dislokasi. Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan akan semakin tinggi.⁽¹⁵⁾ Selain itu, butir yang dihasilkan setelah proses canai hangat memiliki tegangan sisa yang tinggi pada batas butirnya. Tegangan sisa inilah yang akan menghambat pergerakan dislokasi sehingga material memiliki nilai kekerasan yang tinggi.

4.3.2 Hubungan Kekerasan terhadap Metode Deformasi



Gambar 4.3. Grafik Hubungan Nilai Kekerasan dengan Metode Deformasi Sampel Deformasi Searah 50% dan Bolak-Balik 25%-25%



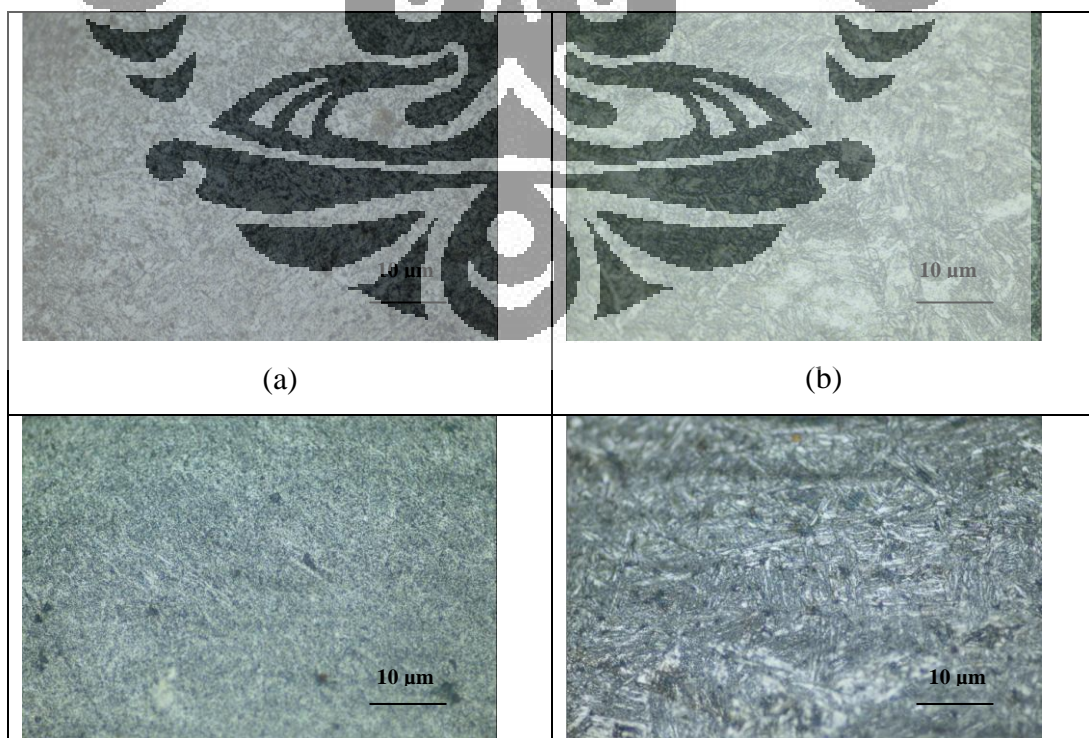
Gambar 4.4. Grafik Hubungan Nilai Kekerasan dengan Metode Deformasi Sampel Deformasi Searah 70% dan Bolak-Balik 35%-35%

Gambar 4.3 dan 4.4 mengilustrasikan hubungan nilai kekerasan dengan metode deformasi. Gambar 4.3 memperlihatkan sampel A dengan deformasi searah 50% menghasilkan kekerasan 154 VHN dan sampel B dengan deformasi

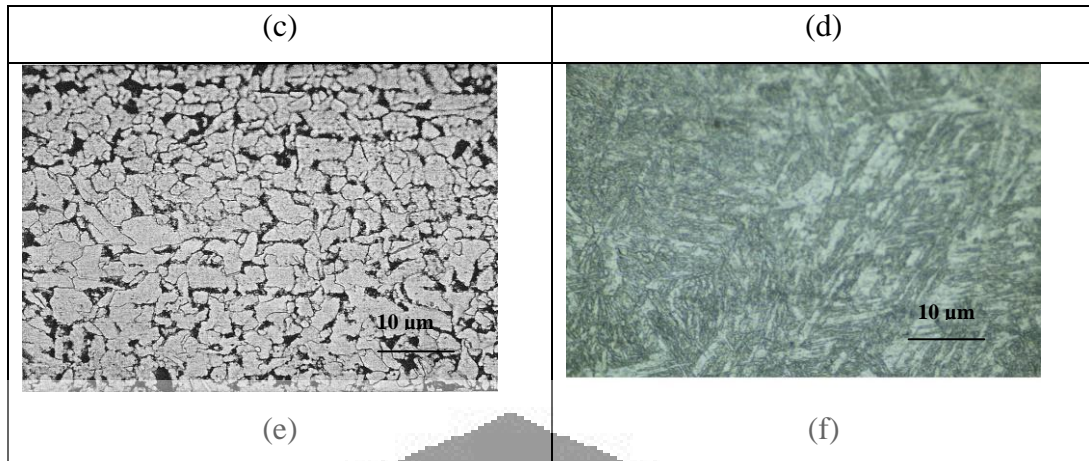
bolak-balik 25%-25% menghasilkan kekerasan 161 VHN. Sementara sampel C dengan deformasi searah 70% menghasilkan kekerasan 187 VHN dan sampel D dengan deformasi bolak-balik 35%-35% menghasilkan kekerasan 206 VHN. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa sampel dengan metode deformasi bolak-balik memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan metode deformasi searah. Namun perbedaan nilai kekerasan tersebut tidak terlalu signifikan.

4.4 Hasil Pengamatan Struktur Mikro

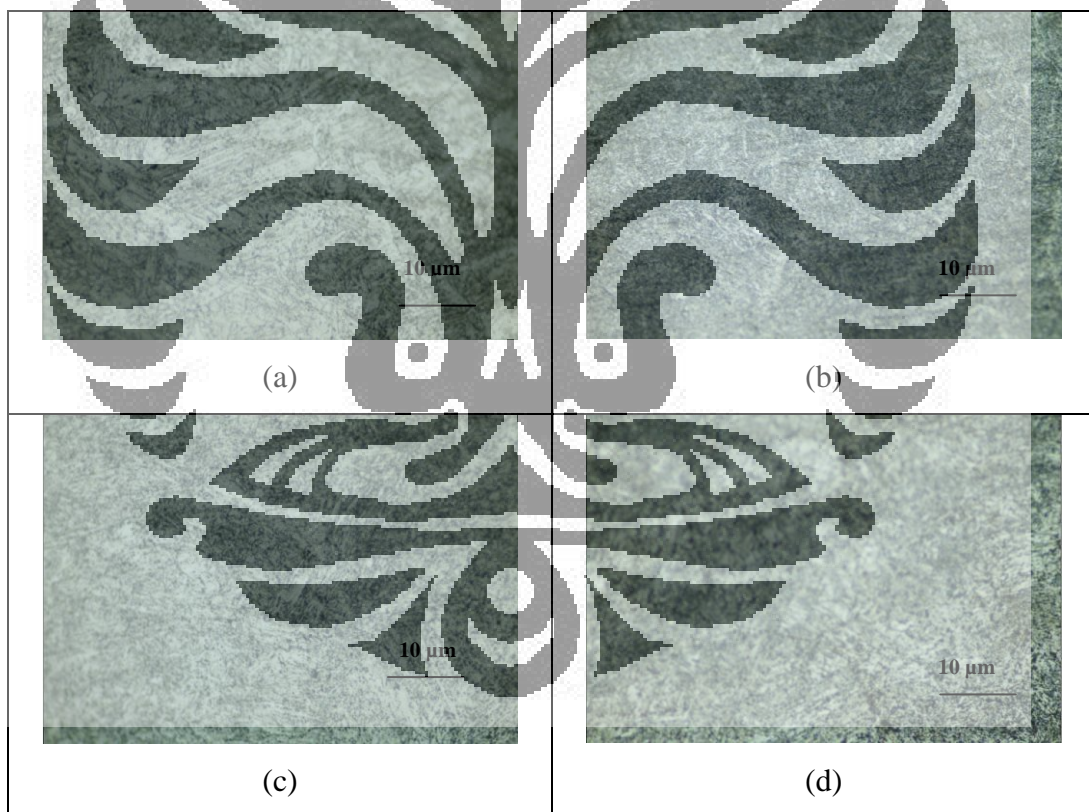
Struktur mikro suatu material sangat mempengaruhi sifat material tersebut. Dalam suatu struktur mikro material ada fasa yang terbentuk. Pada baja karbon rendah fasa yang biasanya terbentuk yaitu fasa ferit (α) dan fasa perlit. Pada seluruh pengamatan struktur mikro ini akan digunakan dua larutan etsa yang berbeda yaitu nital konsentrasi 3% dengan picral konsentrasi 30%. Hasil penelitian dari pengujian struktur mikro yang meliputi struktur dan perubahan bentuk setelah proses perlakuan panas dan canai hangat dapat dilihat secara lengkap pada pembahasan berikut.

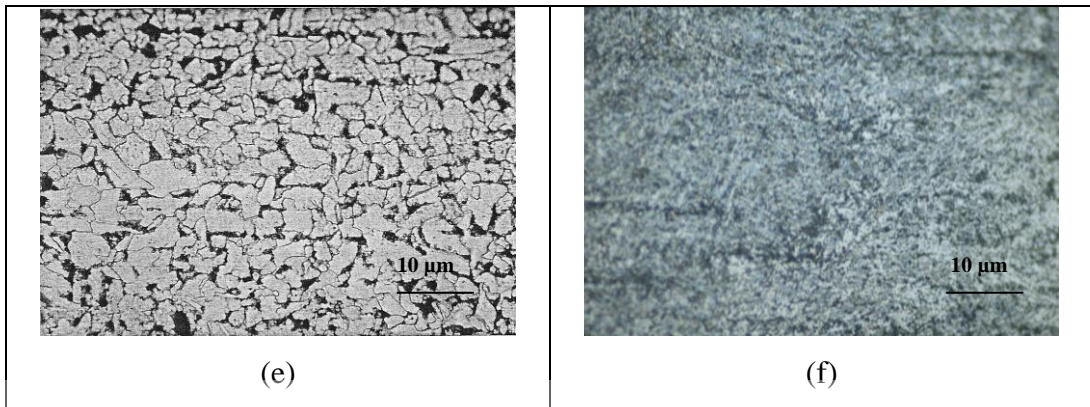


Universitas Indonesia

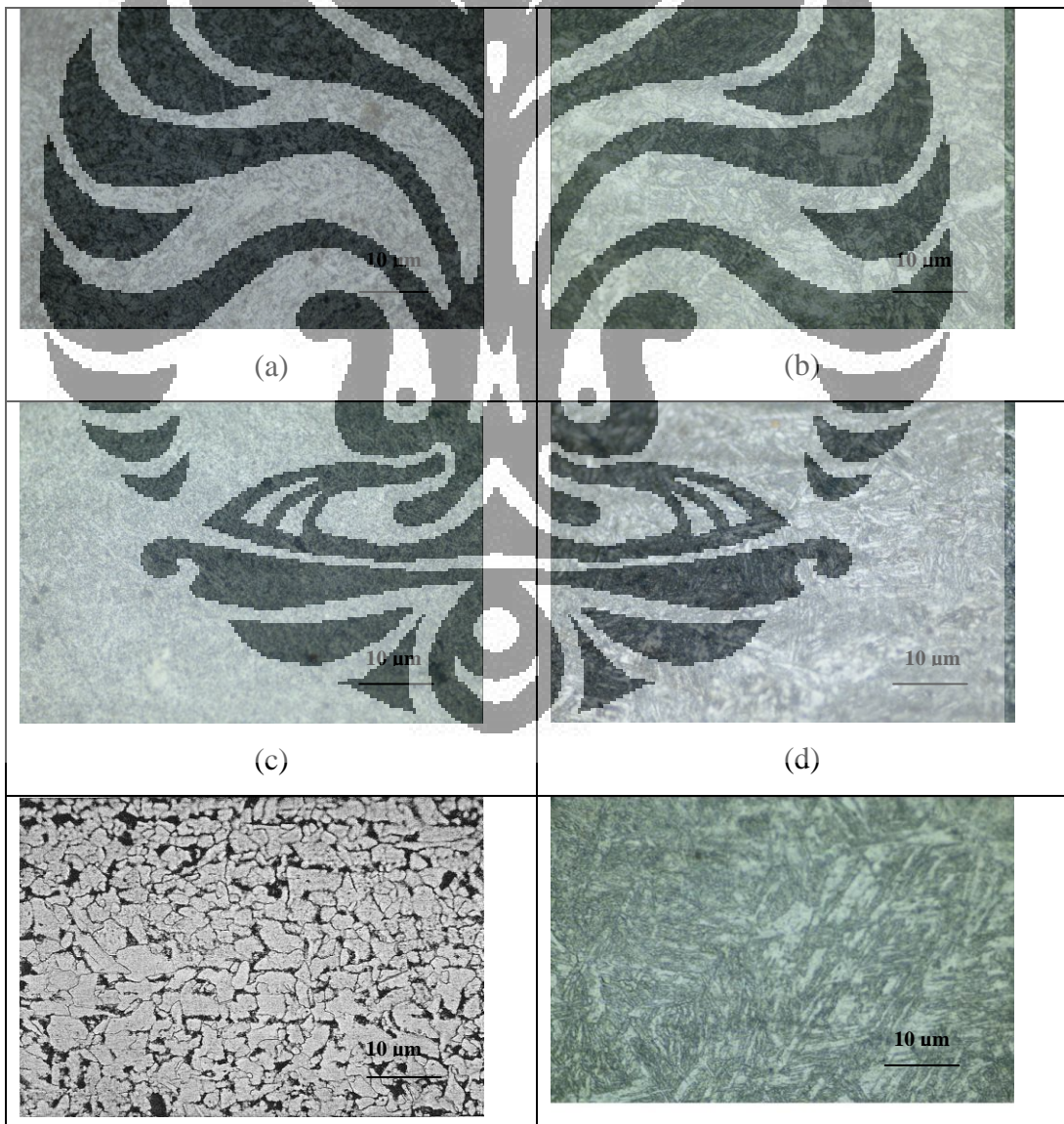


Gambar 4.5. Foto Struktur Mikro Penampang Samping, Perbesaran 500 X, Etsa Nital 3 %
 (a). Sampel A deformasi searah 50 %, (b). Sampel B deformasi bolak-balik 25%-25%, (c). Sampel C deformasi searah 70 %, (d). Sampel D deformasi bolak-balik 35%-35%, (e). Sampel E Awal, (f). Sampel F setelah *quenching*





Gambar 4.6. Foto Struktur Mikro Penampang Samping, Perbesaran 500 X, Etsa Picral 30 %
 (a). Sampel A deformasi searah 50 %, (b). Sampel B deformasi bolak-balik 25%-25%, (c). Sampel C deformasi searah 70 %, (d). Sampel D deformasi bolak-balik 35%-35%, (e). Sampel E Awal, (f). Sampel F setelah *quenching*



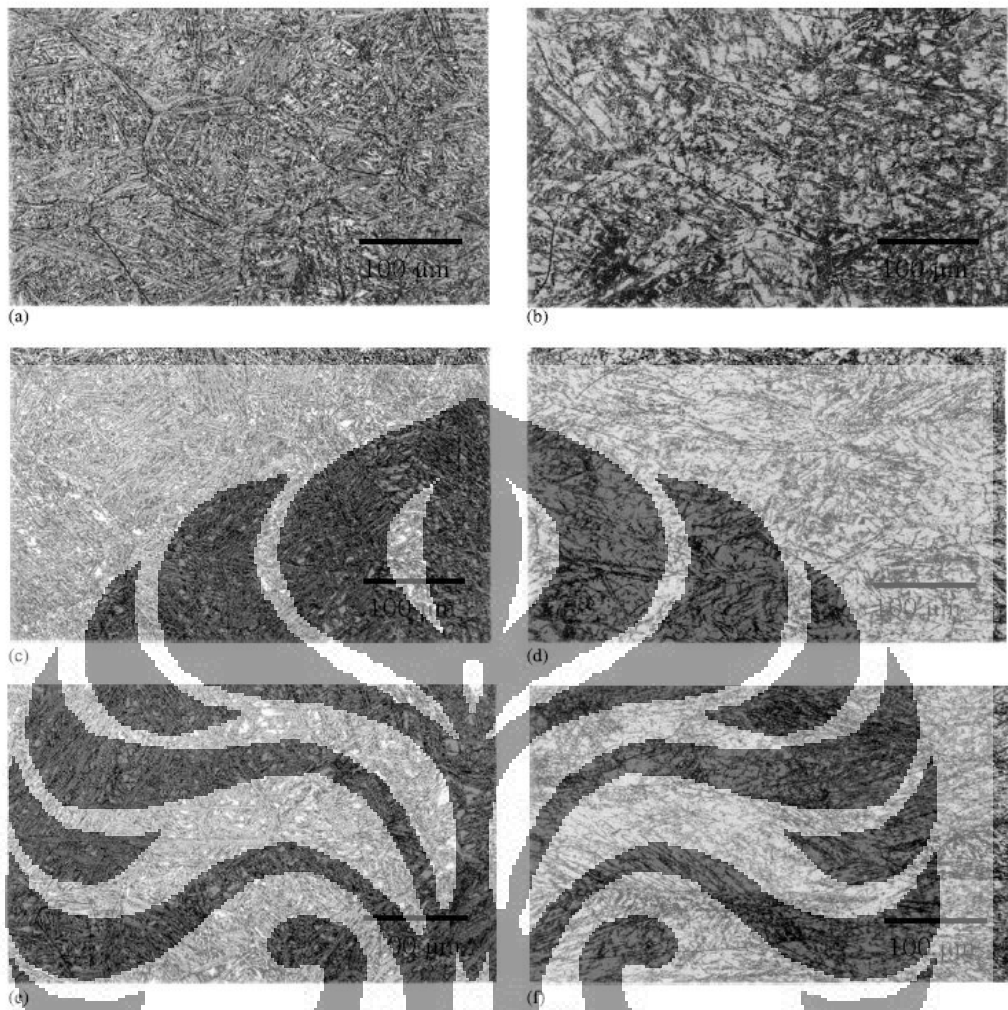
(e)	(f)
-----	-----

Gambar 4.7. Foto Struktur Mikro Penampang Atas, Perbesaran 500 X, Etsa Nital 3 %

(a). Sampel A deformasi searah 50 %, (b). Sampel B deformasi bolak-balik 25%-25%, (c). Sampel C deformasi searah 70 %, (d). Sampel D deformasi bolak-balik 35%-35%, (e). Sampel E Awal, (f). Sampel F setelah *quenching*

Pengamatan struktur mikro sampel A dengan deformasi searah 50 %, B deformasi bolak-balik 25%-25%, C deformasi searah 70 %, dan D deformasi bolak-balik 35%-35% yang telah mengalami proses austenisasi pada temperature 1100 °C ditahan selama 20 menit, *quenching* dengan air es, *tempering* pada temperature 650 °C ditahan selama 5 jam, canai hangat pada temperature 600 °C, dan *annealing* pada temperature 390 °C ditahan selama 30 menit, memperlihatkan adanya fasa ferrite dan pearlite dengan menggunakan etsa nital. Nital merupakan etsa yang digunakan untuk melihat butir dari ferit. Gambar 4.5 mengilustrasikan struktur mikro dari sampel A dengan deformasi searah 50 %, sampel B dengan deformasi bolak-balik 25%-25%, sampel C dengan deformasi searah 70 %, dan sampel D dengan deformasi bolak-balik 35%-35% menggunakan etsa nital menunjukkan bentuk yang memanjang, dan tajam-tajam. Bentuk yang memanjang, dan tajam-tajam ini diprediksi merupakan karakteristik dari *acicular ferrite*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh C.H. Lee, et al.⁽¹⁹⁾

Sementara itu gambar 4.6 mengilustrasikan struktur mikro menggunakan etsa picral 30 %. Penggunaan etsa picral 30% biasanya hanya digunakan untuk melihat fasa perlit, bainit, sementit dan beberapa karbida lainnya. Picral bekerja dengan menyerang *interphase* di sekitar karbida, untuk itu picral digunakan apabila di dalam material itu terdapat karbida. Penggunaan etsa picral 30 % ini tidak memberikan perbedaan yang terlalu signifikan pada hasil pengamatan struktur mikro dibandingkan dengan etsa nital 3%.



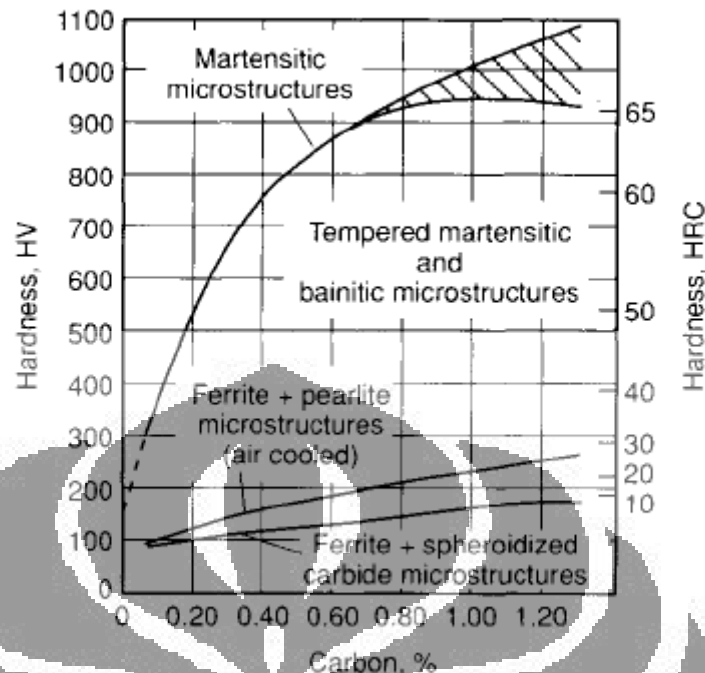
Gambar 4.8. Foto Struktur Mikro Hasil penelitian C.H. Lee, et al.⁽¹⁹⁾

Gambar 4.8 mengilustrasikan foto struktur mikro hasil penelitian dari C.H. Lee, et al. C.H. Lee, et al melakukan penelitian dengan material baja paduan Fe-Mn-Si-C. Perlakuan yang dilakukan adalah : proses autenisasi pada temperature 1250 °C ditahan selama 20 menit lalu dilakukan penurunan temperature hingga 650 °C ditahan selama 5 jam , selanjutnya dilakukan canai hangat pada temperature 600 °C dengan derajat deformasi 0-45 % , kemudian dipanaskan kembali pada temperature 390 °C serta 360 °C selama 30 menit dan terakhir didinginkan pada temperature udara. Pada foto tersebut terlihat bahwa struktur mikro memiliki bentuk yang memanjang dan tajam-tajam. Bentuk struktur tersebut menurut penelitian C.H. Lee, et al.⁽¹⁹⁾ merupakan acicular ferrite. Bentuk struktur ini identik dengan bentuk struktur pada gambar 4.5 dan 4.6.

Bentuk butir pada sampel awal E tanpa perlakuan yang awalnya bulat menjadi panjang dan tajam-tajam pada sampel A, B, C, dan D. Hal tersebut terjadi karena setelah dilakukan austenisasi pada seluruh sampel A, B, C, dan D dengan temperature 1100 °C ditahan 20 menit, langsung dilakukan pendinginan cepat dengan air es. Lalu sampel dipanaskan kembali dengan proses tempering pada temperature 650 °C selama 5 jam untuk menghilangkan autenite sisa, mengurangi tegangan sisa, dan meningkatkan ketangguhan. Kemudian sampel dicanai hangat pada temperature 600 °C dengan derajat deformasi searah 50% dan 70% serta bolak-balik 25%-25% dan 35%-35%. Derajat deformasi yang tinggi tersebut menjadikan sampel tipis dan memiliki butir yang sangat pipih.

Butir yang pipih dan panjang tersebut memiliki tegangan sisa (residual stress) yang timbul saat proses canai. Tegangan sisa pada butir pipih tersebut 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 akan menurun. Jika material dengan kondisi butir pipih dan panjang dilakukan proses pengubahan bentuk maka akan cenderung terjadi retak atau kegagalan pada material karena tegangan sisa dari proses canai dingin atau pengerjaan dingin masih sangat tinggi. Tegangan sisa yang tinggi tersebut dapat dikurangi, atau dihilangkan dengan melakukan perlakuan panas kembali seperti *annealing* pada temperature 390 °C selama 30 menit.

Material dengan butir yang pipih memiliki sifat mampu bentuk yang buruk dikarenakan tegangan sisa yang terdapat pada material masih sangat tinggi.



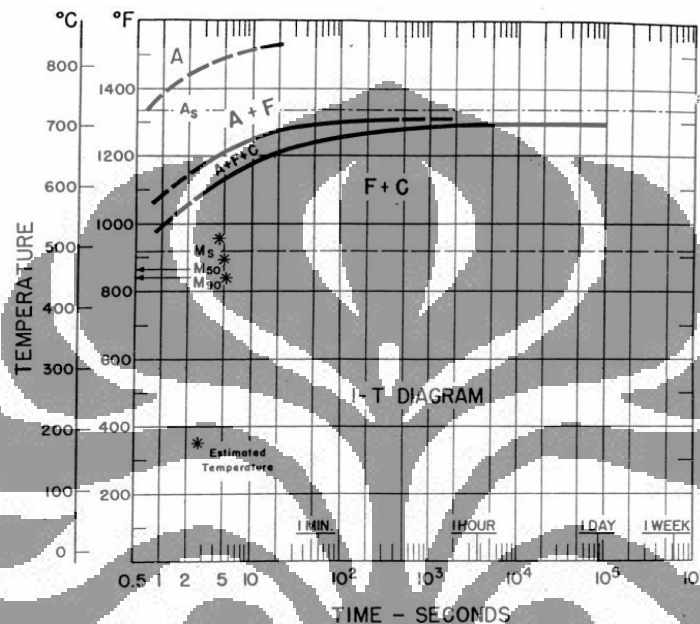
Gambar 4.9. Nilai Kekerasan pada Baja Karbon⁽⁸⁾

Sampel A, B, C, dan D yang dilakukan proses autenitasi pada temperature 1100 °C kemudian dilakukan *quenching* dengan air es akan memiliki struktur martensite. Struktur martensite ini memiliki kekerasan yang sangat tinggi namun sangat getas dan ketangguhan yang rendah. Kekerasan pada baja dengan berbagai nilai kandungan karbon dapat dilihat pada gambar 4.9.

Oleh karena itu baja yang di *quench* akan menjalani proses temper untuk mendapatkan ketangguhan dan keuletan yang baik. Karena tingginya kadar karbon jenuh di dalam martensit membuat fasa ini menjadi metastabil. Nilai tegangan sisa yang tinggi, kerapatan dislokasi dan *ratio lath/plate* per satuan volum yang juga tinggi, serta banyaknya austenit sisa inilah yang membuat martensit menjadi fasa yang tidak stabil. Selama proses temper martensit akan berubah dari struktur kristal bct menjadi struktur kristal bcc besi (ferit) dan endapan karbida/sementit (Fe_3C). ferit maupun sementit akan menjadi lebih kasar/besar jika waktu dan temperatur temper dinaikkan.

Data pengujian kekerasan pada tabel 4.3 menunjukkan bahwa sampel A dengan derajat deformasi searah 50 % memiliki nilai kekerasan 154 VHN, B dengan derajat deformasi bolak-balik 25 %-25 % memiliki nilai kekerasan 161

VHN, C dengan derajat deformasi searah 70 % memiliki nilai kekerasan 187 VHN, dan D dengan derajat deformasi bolak-balik 35 %-35 % memiliki nilai kekerasan 199 VHN. Jika dibandingkan dengan gambar 4.9 struktur yang terbentuk dengan range nilai kekerasan tersebut adalah ferrite, pearlite, dan karbida. Hal ini memperkuat prediksi struktur akhir yang terbentuk pada sampel tersebut adalah ferrite dan pearlite.



Gambar 4.10. Diagram TTT Baja AISI 1013 ⁽⁸⁾

Pada sampel A, B, C, dan D, setelah proses autenisasi pada temperature 1100 °C selama 20 menit, seluruh sampel langsung dilakukan pendinginan cepat ke dalam air es. Hal ini menyebabkan terbentuknya martensite pada sampel tersebut karena proses pendinginan cepat telah melewati garis M_s pada diagram TTT seperti yang terlihat pada gambar 4.10. Namun kadar martensite yang terbentuk tidak banyak karena rendahnya kadar karbon dari sampel yaitu hanya 0,12%.

Selanjutnya sampel A, B, C, dan D dipanaskan kembali sampai temperature 650 °C selama 5 jam dengan proses tempering untuk mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan. Selain itu proses ini juga dilakukan agar struktur martensite dapat bertransformasi menjadi ferrite dan pearlite kembali.

Tabel 4.4. Temperatur dan Hasil dari *Tempering*⁽⁸⁾

Temperature range		Reaction and symbol (if designated)	Comments
°C	°F		
-40 to 100	-40 to 212	Clustering of two to four carbon atoms on octahedral sites of martensite (A1); segregation of carbon atoms to dislocations and boundaries	Clustering is associated with diffuse spikes around fundamental electron diffraction spots of martensite
20 to 100	70 to 212	Modulated clusters of carbon atoms on (102) martensite planes (A2)	Identified by satellite spots around electron diffraction spots of martensite
60 to 80	140 to 175	Long period ordered phase with ordered carbon atoms (A3)	Identified by superstructure spots in electron diffraction patterns
100 to 200	212 to 390	Precipitation of transition carbide as aligned 2 nm (0.08 μm .) diam particles (T1)	Recent work identifies carbides as η (orthorhombic, Fe_2C); earlier studies identified the carbides as ϵ (hexagonal, $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$).
200 to 350	390 to 660	Transformation of retained austenite to ferrite and cementite (T2)	Associated with tempered-martensite embrittlement in low- and medium-carbon steels
250 to 700	480 to 1290	Formation of ferrite and cementite; eventual development of well-spheroidized carbides in a matrix of equiaxed ferrite grains (T3)	This stage now appears to be initiated by χ -carbide formation in high-carbon Fe-C alloys.
500 to 700	930 to 1290	Formation of alloy carbides in chromium-molybdenum-, vanadium- and tungsten-containing steels. The mix and composition of the carbides may change significantly with time (T4).	The alloy carbides produce secondary hardening and pronounced retardation of softening during tempering or long-time service exposure around 500 °C (930 °F).
350 to 550	660 to 1020	Segregation and cosegregation of impurity and substitutional alloying elements	Responsible for temper embrittlement

Dalam tempering suatu martensit terdapat tiga (3) tahap yang mewakili setiap perubahan struktur.⁽⁸⁾ **Pertama** adalah pemanasan yang terjadi di temperatur 100-250°C, disini akan terjadi pembentuk karbida-karbida transisi dan penurunan kadar karbon di dalam martensit sampai 0.25%. Tahap **kedua** (200-300°C), terjadi pembentuk ferit dan sementit dari austenit sisa yang berada di dalam lath atau plate dari martensit. Tahap **ketiga** terjadi pada temperatur 250-350°C, karbida transisi dan karbon yang berada di dalam martensit akan berubah menjadi sebagian besar ferit dan sementit. Pada tahap ketiga ini juga terjadi pengkasaran karbida dan pembentukan *spheroidal* karbida di dalam butir ferit. Hal ini biasanya tidak diinginkan jika terjadi dalam jumlah banyak karena akan menimbulkan efek *softening*. Endapan karbida dalam hal ini dapat berbentuk sementit maupun inklusi seperti MnS. Beberapa karbida pada martensit temper ini memiliki bentuk seperti bola kecil atau *spheroidal*. Bentuk *spheroidal* ini dapat terjadi jika pemilihan waktu dan temperatur temper yang kurang tepat. *Spheroidal*

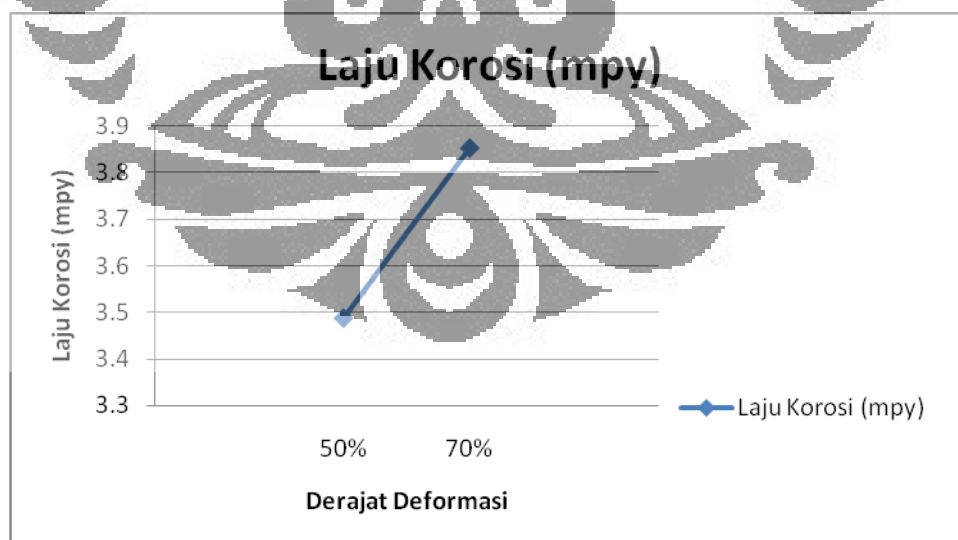
karbida ini dihindari karena akan berpengaruh ke sifat mekanis dan ketahanan terhadap serangan hidrogen di batas butir.

4.5 Hasil Pengujian Laju Korosi

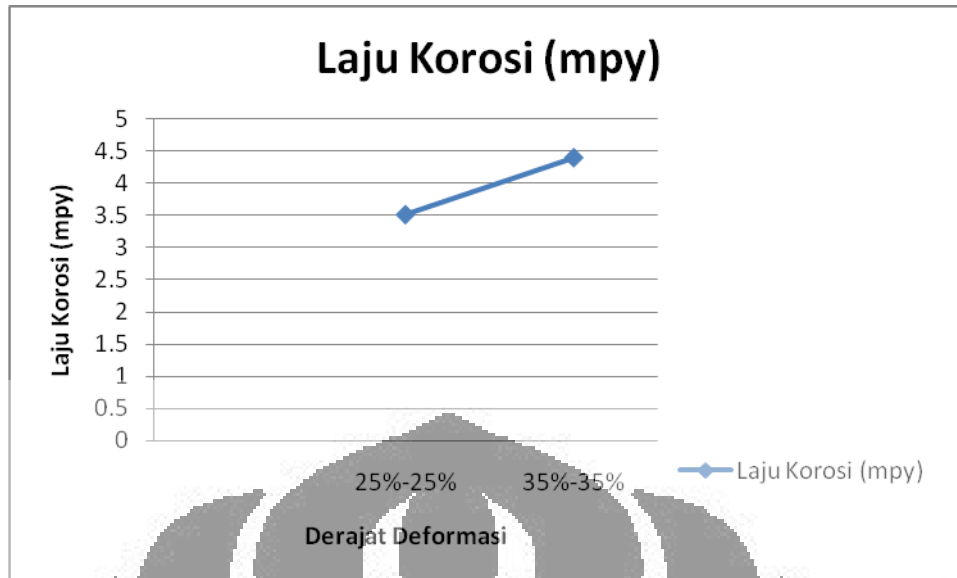
Tabel 4. 5. Tabel Pengujian Laju Korosi terhadap Deformasi

Sampel	Metode Deformasi	Derajat Deformasi	Ecorr (mV)	Icorr (A/cm ²)	Laju Korosi (mpy)
A	Searah	50%	-537.6	7.637x10 ⁻⁶	3.489
B	Bolak-Balik	25%-25%	-572.9	7.706x10 ⁻⁶	3.521
C	Searah	70%	-592.2	8.431x10 ⁻⁶	3.853
D	Bolak-Balik	35%-35%	-744.4	9.629x10 ⁻⁶	4.4
E	-	-	-671.3	1.761x10 ⁻⁵	8.046
F	-	-	-695.9	1.84x10 ⁻⁵	8.498

4.5.1 Hubungan Derajat Deformasi terhadap Laju Korosi



Gambar 4.11. Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Derajat Deformasi Metode Searah

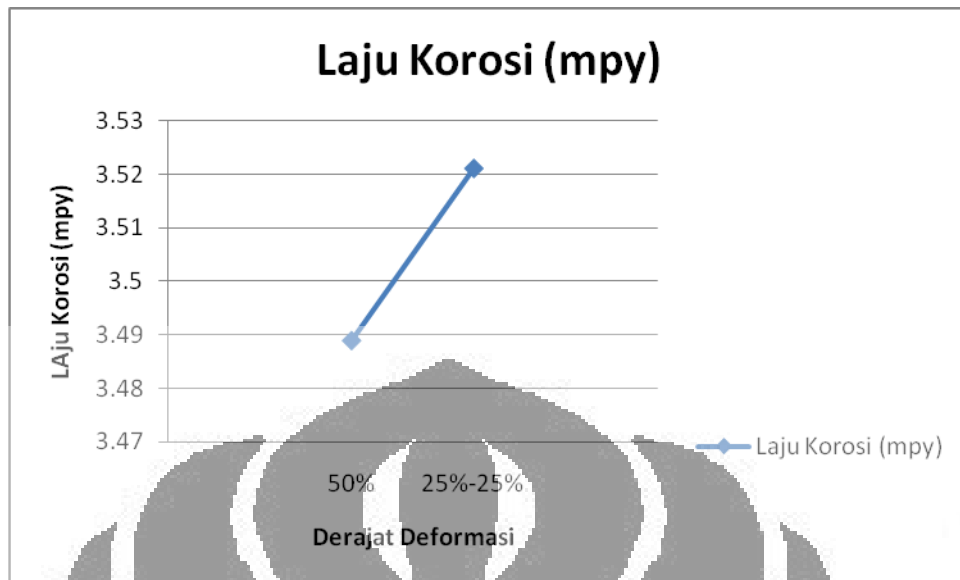


Gambar 4.12. Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Derajat Deformasi Metode Bolak-Balik

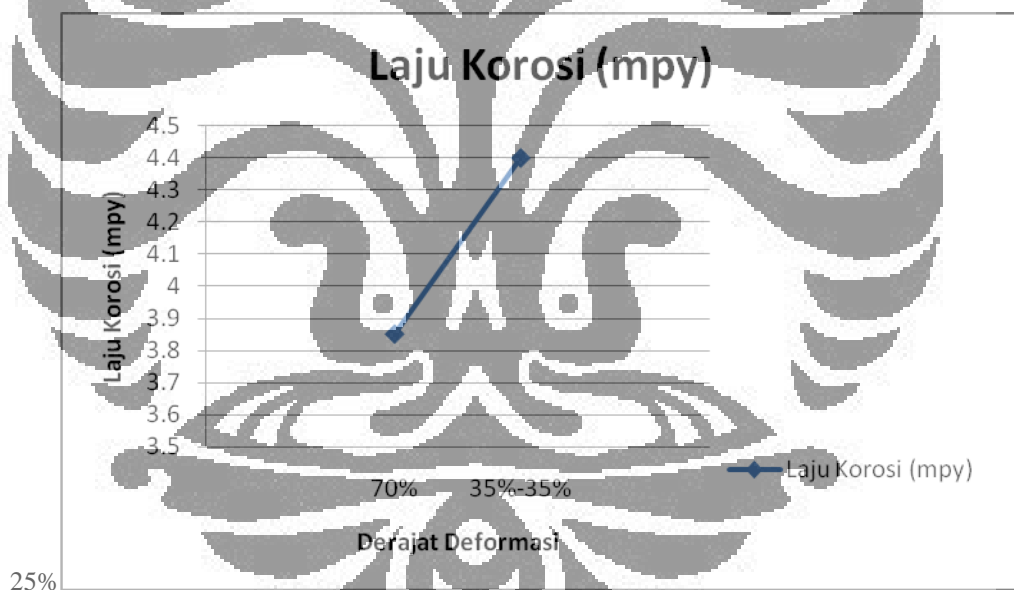
Dari data pengukuran nilai potensial korosi sampel setelah deformasi yang tersaji pada Tabel 4.5, terlihat bahwa sampel A dengan deformasi searah 50% memiliki nilai potensial korosi sebesar -537.6 mV sedangkan sampel C dengan deformasi searah 70% memiliki potensial sebesar -592.2 mV. Begitu pula dengan sampel B dengan deformasi bolak-balik 25%-25% memiliki nilai potensial korosi sebesar -572.9 mV sedangkan sampel D dengan deformasi bolak-balik 35%-35% memiliki potensial sebesar -744.4 mV.

Hal ini juga sesuai dengan model penelitian Suriadi, I G A Kade dan IK Suarsana⁽²⁰⁾ dimana laju korosi cenderung semakin meningkat seiring dengan semakin besarnya derajat deformasi. Namun karena metode pengujian laju korosi yang digunakan adalah polarisasi, maka pengaruh derajat deformasi tidak terlalu signifikan. Hal ini terjadi karena metode polarisasi hanya mengukur laju korosi pada permukaan sampel dan tidak sampai butir. Sedangkan deformasi membuat bentuk dan ukuran butir berubah.

4.5.2 Hubungan Metode Deformasi terhadap Laju Korosi



Gambar 4.13. Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Metode Deformasi Sampel Deformasi Searah 50% dan Bolak-Balik 25%



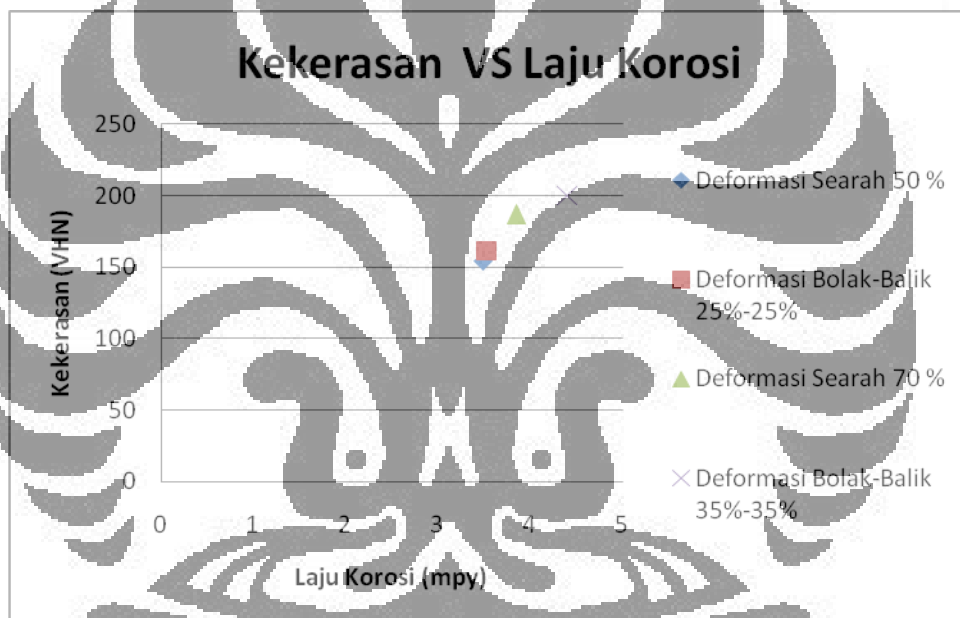
Gambar 4.14. Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Metode Deformasi Sampel Deformasi Searah 70% dan Bolak-Balik 35%-35%

Gambar 4.13 dan 4.14 mengilustrasikan bahwa sampel dengan metode deformasi bolak-balik memiliki nilai laju korosi yang lebih besar dibandingkan dengan metode deformasi searah. Namun perbedaannya tidak terlalu signifikan sehingga dapat diabaikan.

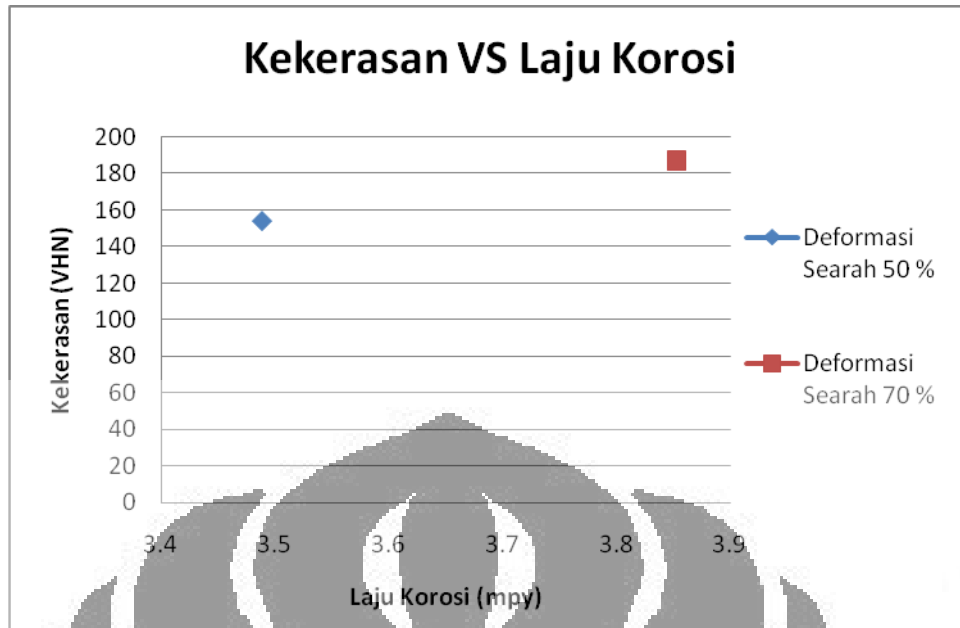
4.5.3 Hubungan Kekerasan terhadap Laju Korosi

Tabel 4. 6. Tabel Pengujian Laju Korosi terhadap Kekerasan

No	Sampel	Metode Deformasi	Derajat Deformasi	Ecorr (mV)	Icorr (A/cm ²)	Laju Korosi (mpy)
1	A	Searah	50%	-537.6	7.637x10 ⁻⁶	3.489
2	B	Bolak-Balik	25%-25%	-572.9	7.706x10 ⁻⁶	3.521
3	C	Searah	70%	-592.2	8.431x10 ⁻⁶	3.853
4	D	Bolak-Balik	35%-35%	-744.4	9.629x10 ⁻⁶	4.4
5	E	-	-	-671.3	1.761x10 ⁻⁵	8.046
6	F	-	-	-695.9	1.84x10 ⁻⁵	8.498



Gambar 4.15. Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan



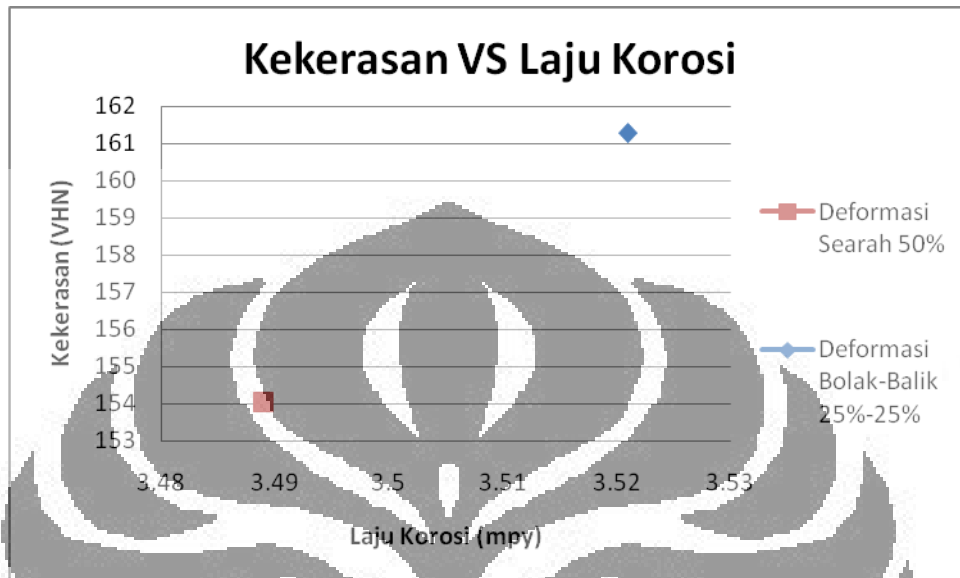
Gambar 4.16. Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan pada Metode Deformasi Searah



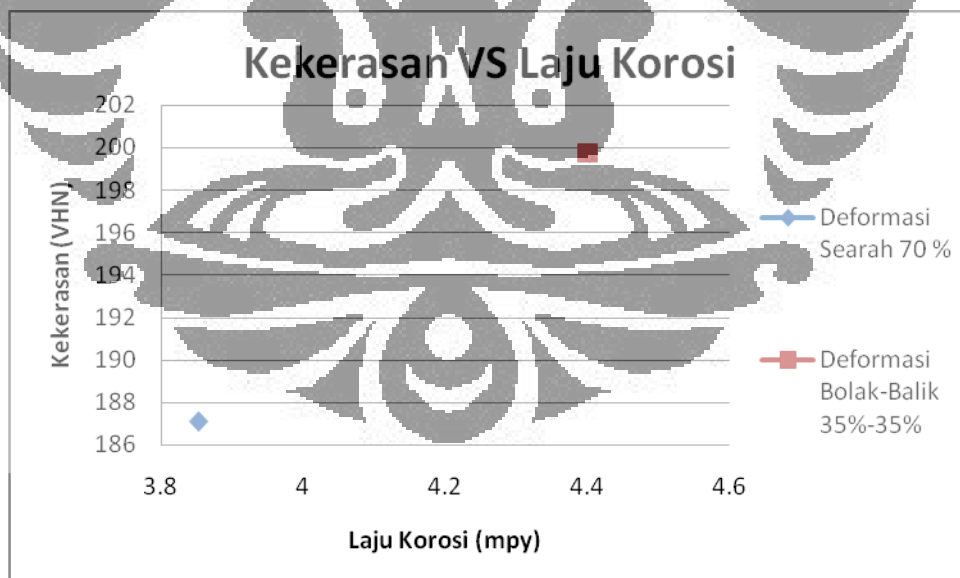
Gambar 4.17. Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan pada Metode Deformasi Bolak-Balik

Gambar 4.15, 4.16, dan 4.17 mengilustrasikan hubungan antara laju korosi dan nilai kekerasan. Sampel A dengan derajat deformasi searah 50 % memiliki nilai kekerasan 154 VHN dengan nilai laju korosi sebesar 3.489 mpy dan sampel C dengan derajat deformasi searah 70 % memiliki nilai kekerasan sebesar 187 VHN dengan laju korosi terbesar 3.853 mpy. Sementara sampel B dengan derajat deformasi bolak-balik 25 %-25 % memiliki nilai kekerasan

VHN dengan nilai laju korosi sebesar 3.521 mpy dan sampel D dengan derajat deformasi bolak-balik 25 %-25 % memiliki nilai kekerasan sebesar 199 VHN dengan laju korosi sebesar 4.4 mpy



Gambar 4.18. Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan pada Sampel Deformasi Searah 50% dan Bolak-Balik 25%-25%



Gambar 4.19. Grafik Hubungan Laju Korosi dengan Kekerasan pada Sampel Deformasi Searah 70% dan Bolak-Balik 35%-35%

Gambar 4.18 dan 4.19 mengilustrasikan bahwa sampel dengan metode deformasi bolak-balik memiliki nilai laju korosi yang lebih besar dibandingkan

metode searah. Namun perbedaannya tidak terlalu signifikan sehingga dapat diabaikan.

Material yang memiliki nilai kekerasan dan kekuatan yang tinggi biasanya mengakibatkan turunnya ketahanan korosi dari material tersebut.⁽¹⁸⁾ Hal ini juga sesuai dengan hasil yang didapatkan pada penelitian ini. Gambar 4.15 sampai dengan 4.19 mengilustrasikan hubungan laju korosi dengan kekerasan yang menjelaskan bahwa laju korosi cenderung meningkat seiring dengan nilai kekerasan yang semakin besar. Sampel dengan perlakuan memiliki nilai laju korosi yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya derajat deformasi dan nilai kekerasan.

Struktur martensit yang keras misalnya, memiliki ketahanan korosi yang lebih buruk dibandingkan dengan baja feritik maupun austenitik.⁽¹⁸⁾ Deformasi yang diberikan terhadap baja karbon rendah menyebabkan butir ferrite terdeformasi menjadi lebih keras dan dapat menurunkan ketahanan korosi.⁽¹⁸⁾

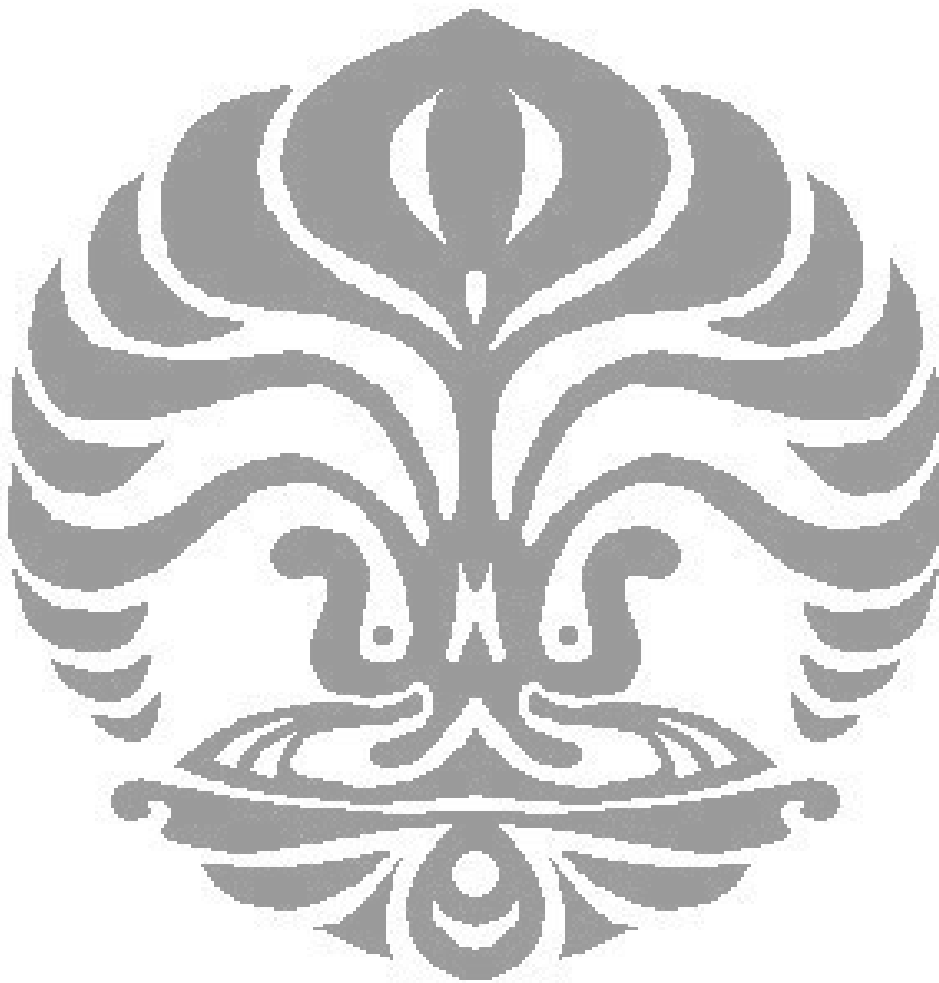


BAB 5

KESIMPULAN

1. Struktur mikro yang terbentuk pada sampel baja AISI 1013 setelah proses austenisasi pada temperature 1100 °C yang ditahan selama 20 menit, lalu dilakukan *quenching* dengan air es dilanjutkan dengan *tempering* pada temperature 650 °C yang ditahan selama 5 jam kemudian canai hangat pada temperature 600 °C dan *annealing* pada temperature 390 °C yang ditahan selama 30 menit adalah *acicular ferrite* dan pearlite.
2. Semakin besar derajat deformasi maka akan cenderung meningkatkan nilai kekerasan pada sampel baja AISI 1013. Sampel dengan derajat deformasi searah 50% memiliki nilai kekerasan sebesar 154 VHN sementara sampel dengan derajat deformasi searah 70% memiliki nilai kekerasan sebesar 187 VHN. Begitu pula sampel dengan deformasi bolak-balik 25%-25% memiliki nilai kekerasan sebesar 161 VHN sedangkan sampel dengan derajat deformasi bolak-balik 35%-35% memiliki nilai kekerasan sebesar 206 VHN.
3. Semakin besar derajat deformasi maka akan cenderung meningkatkan nilai laju korosi pada sampel baja AISI 1013. Sampel dengan derajat deformasi searah 50% memiliki nilai laju korosi sebesar 3.489 mpy sedangkan sampel dengan derajat deformasi searah 70% memiliki nilai laju korosi sebesar 3.853 mpy. Begitu pula dengan sampel dengan derajat deformasi bolak-balik 25%-25% memiliki nilai laju korosi sebesar 3.521 mpy sementara sampel dengan derajat deformasi bolak-balik 35%-35% memiliki nilai laju korosi sebesar 4.4 mpy. Namun karena metode pengujian laju korosi yang digunakan adalah polarisasi, maka pengaruh derajat deformasi tidak terlalu signifikan.
4. Semakin besar nilai kekerasan maka akan cenderung meningkatkan laju korosi pada sampel baja AISI 1013. Sampel dengan derajat deformasi searah 50% memiliki nilai kekerasan 154 VHN dengan nilai laju korosi sebesar 3.489 mpy dan sampel C dengan derajat deformasi searah 70%

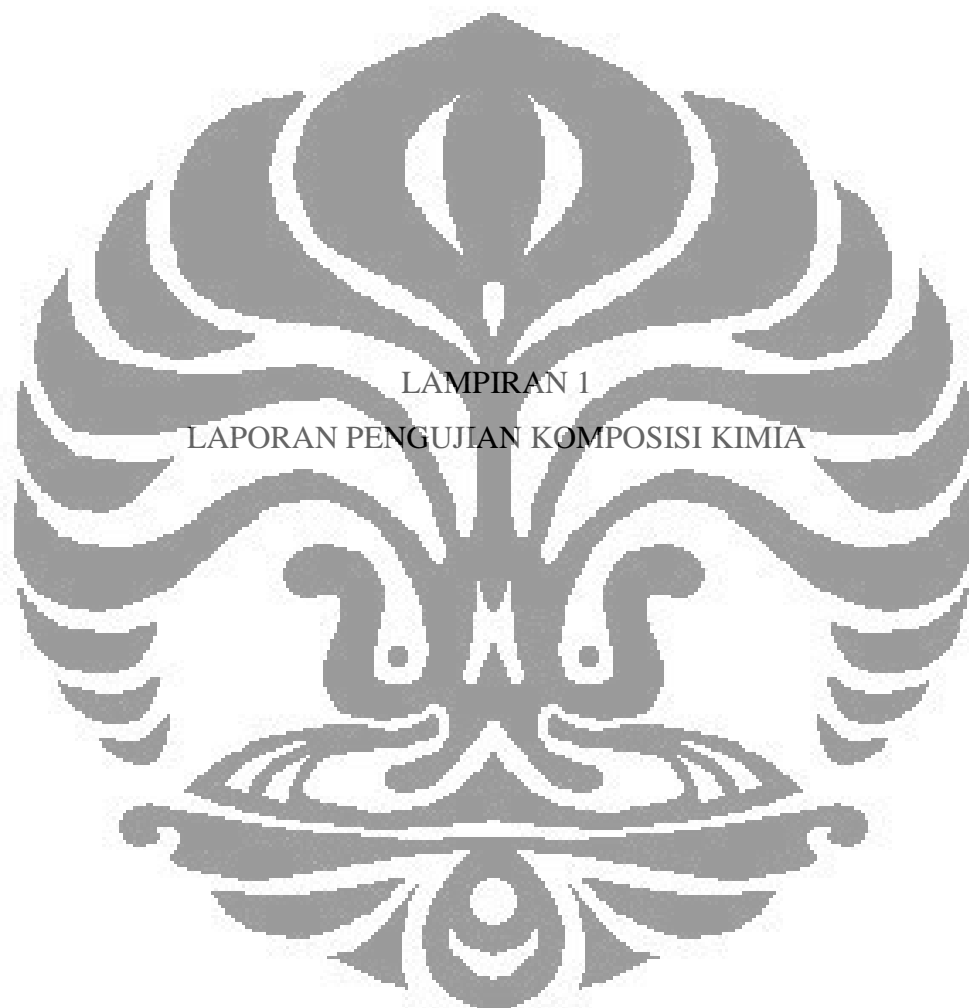
memiliki nilai kekerasan sebesar 187 VHN dengan laju korosi sebesar 3.853 mpy. Sementara sampel B dengan derajat deformasi bolak-balik 25 %-25 % memiliki nilai kekerasan 161 VHN dengan nilai laju korosi sebesar 3.521 mpy dan sampel D dengan derajat deformasi bolak-balik 25 %-25 % memiliki nilai kekerasan sebesar 199 VHN dengan laju korosi sebesar 4.4 mpy



DAFTAR REFERENSI

1. Edwin Scott, Jr., —*ASA Materials Market Digest*”, www.asa.net, 2009, hal 1-6.
2. <http://www.keytometals.com/CorrosionofCarbonSteel> (Jan 19st, 2010)
3. J. Zrník, J. Drnek, Z. Nový, S. V. Dobatkin, O. Stejskal, —*Structure Evolution During Severe Warm Plastic Deformation of Carbon Steel*||, Rev. Adv. Mater. Sci. 10, 2005, hal. 45-53.
4. I. Kozasu, *Material Science and Technology*, Vol. 7, Constitution and Properties of Steel Ed by F. B. Pickering, VCH, 1993, hal. 184
5. ASM Handbook, *Heat Treatment*, Vol. 4, ASM International, Cleveland-Ohio, 2001, p. 155, 160
6. Krauss, G. *Heat Treatment and Processing Principles*, ASM International, 1995
7. William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 6th ed., John Wiley & Son, Inc., 2003.
8. ASM Handbook. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys: Vol. 1*, ASM International, Cleveland-Ohio, 2001. p. 215
9. ASM Handbook, *Metallography and Microstructures*, Vol 9, ASM International, 2004. 1409, 1472, 1449
10. Pickering, F. B., *Physical Metallurgy and the design of the steels* , Applied Science Publishers, London, 1978, pp. 1-88.
11. B K Panigrahi, *Processing Of Low Carbon Steel Plate And Hot Strip An Overview* .R&D Centre For Iron And Steel, Steel Authority Of India Ltd., Ranchi 834 002, India

12. 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.
13. I.Kozasu: *Materials Science and Technology*, vol.7 Constitution and Properties of Steels Ed. By F.B.Pickering, VCH, (1993), 184.
14. H. K. D. H. BHADESHIA. 2001. *Bainite In Steels: Transformations, Microstructure And Properties*. Second Edition. (IOM Communications Ltd.)
15. Dieter, George E. *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill Book Company)
16. Jones, Denny A, *Principles and Prevention of Corrosion*, Macmillan Publishing Company, 1992
17. ASTM G 102. ASTM Internasional
18. *ASM Handbook, Vol.13, Corrosion*, ASM International
19. C.H. Lee , H.K.D.H. Bhadeshia a, H.-C. Lee. *Effect of plastic deformation on the formation of acicular ferrite*. *Materials Science and Engineering A360* (2003) 249_ 257. Elsevier)
20. Suriadi, I G A Kade dan IK Suarsana. *Prediksi Laju Korosi dengan Perubahan Besar Derajat Deformasi Plastis dan Media Pengkorosi pada Material Baja Karbon*. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cakram* Vol.1 No.1 . Desember 2007 (1-8)
21. ASTM E 92. ASTM Internasional





CENTER FOR MATERIALS PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL-UNIVERSITAS INDONESIA
LABORATORIUM UJI MATERIAL

Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia
Phone : 021 - 788 49045, 786 3510 Fax : 021 - 78888 111, 7872 350 E-mail : cmfpa@metal.ui.ac.id, cmfpa.ui@gmail.com

LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA
COMPOSITION TEST REPORT

Page 1 of 1

No Laporan	0275	Bahan	Steel
Report No		Material	
Pemakai Jasa	Ronald	Identitas Bahan	Plate
Customer		Material Identity	
Alamat	DTMM FTUI	Tanggal Terima	April 27th, 2010
Address		Receiving Date	
No Kontrak	051N/PT.02/FT04/P/2010	Standar	ASTM A751
Contract No		Standard	
Tanggal Uji	April 27th, 2010	Mesin Uji	Optical Emission Spectrometer
Date of Test		Testing machine	

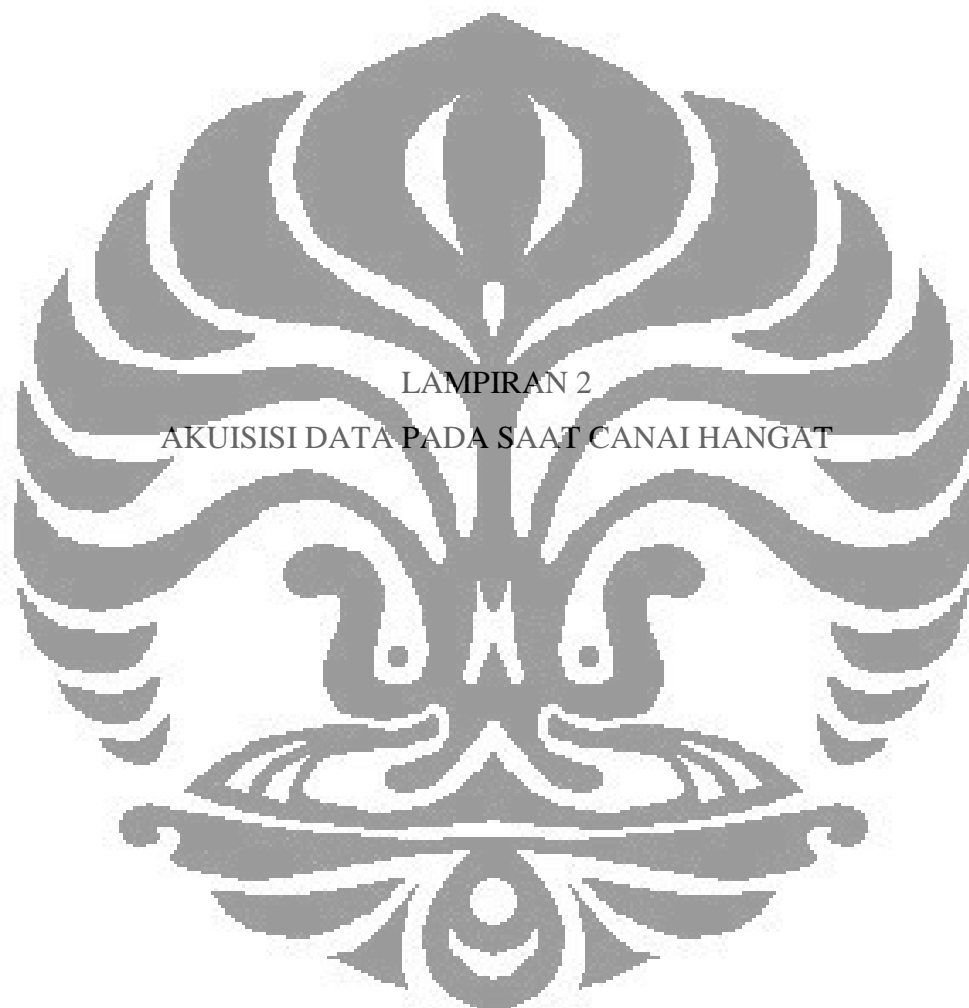
Kode Sampel	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
01	0.120	0.198	<0.005	0.008	0.636	<0.005	<0.001
	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Al (%)	Fe (%)
	<0.001	<0.002	0.018	<0.001	0.016	0.037	98.913

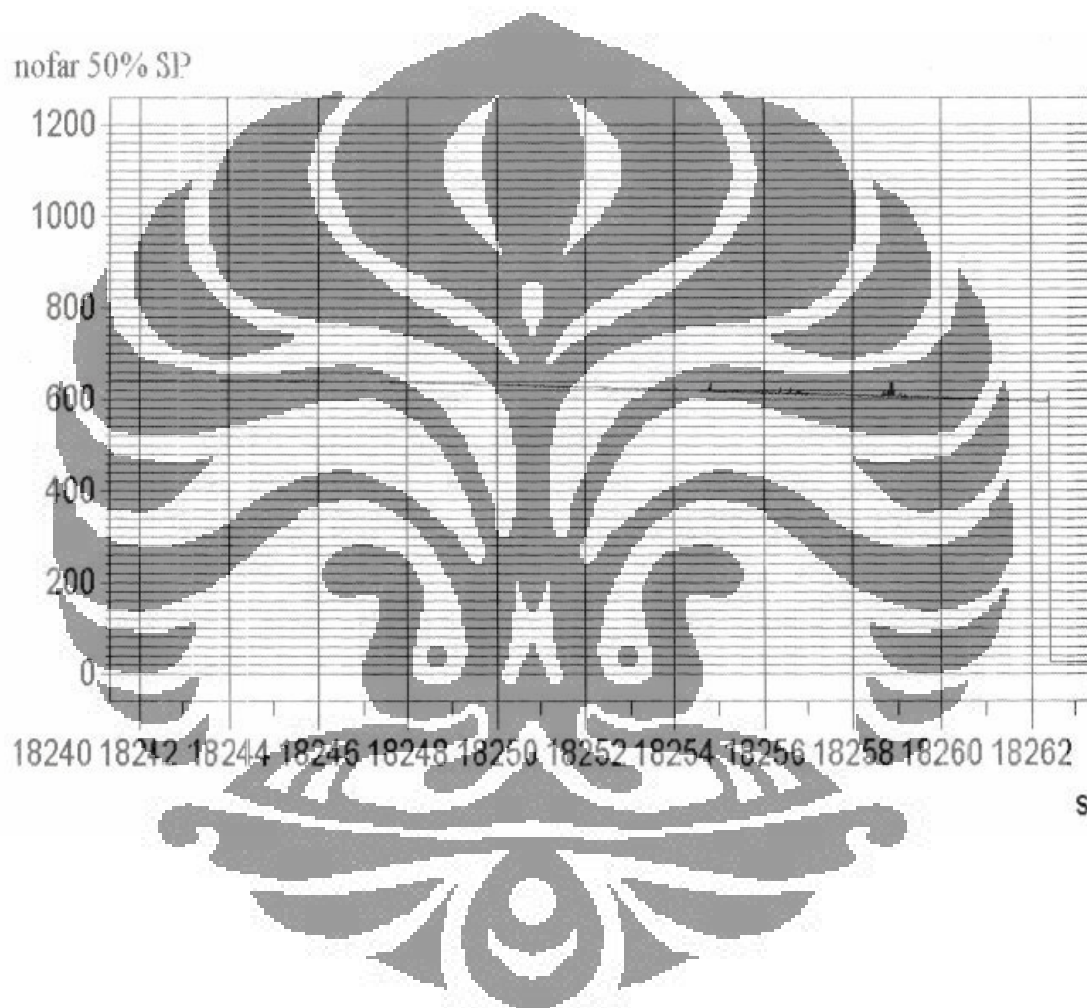
Depok, April 27th, 2010
LABORATORIUM UJI MATERIAL
Technical Manager

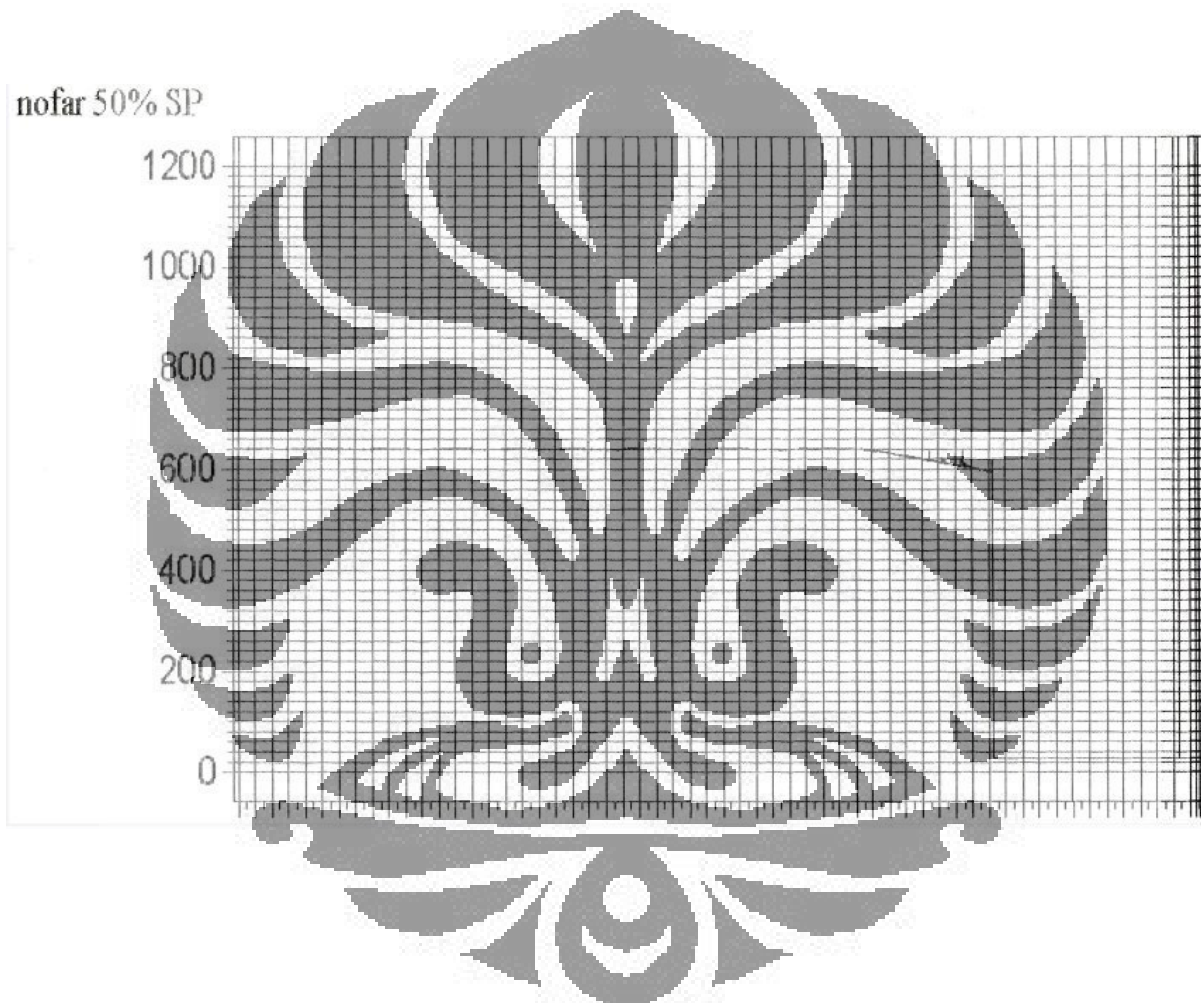
(Ahmad Ivan Kusyuan, ST, M.Eng)

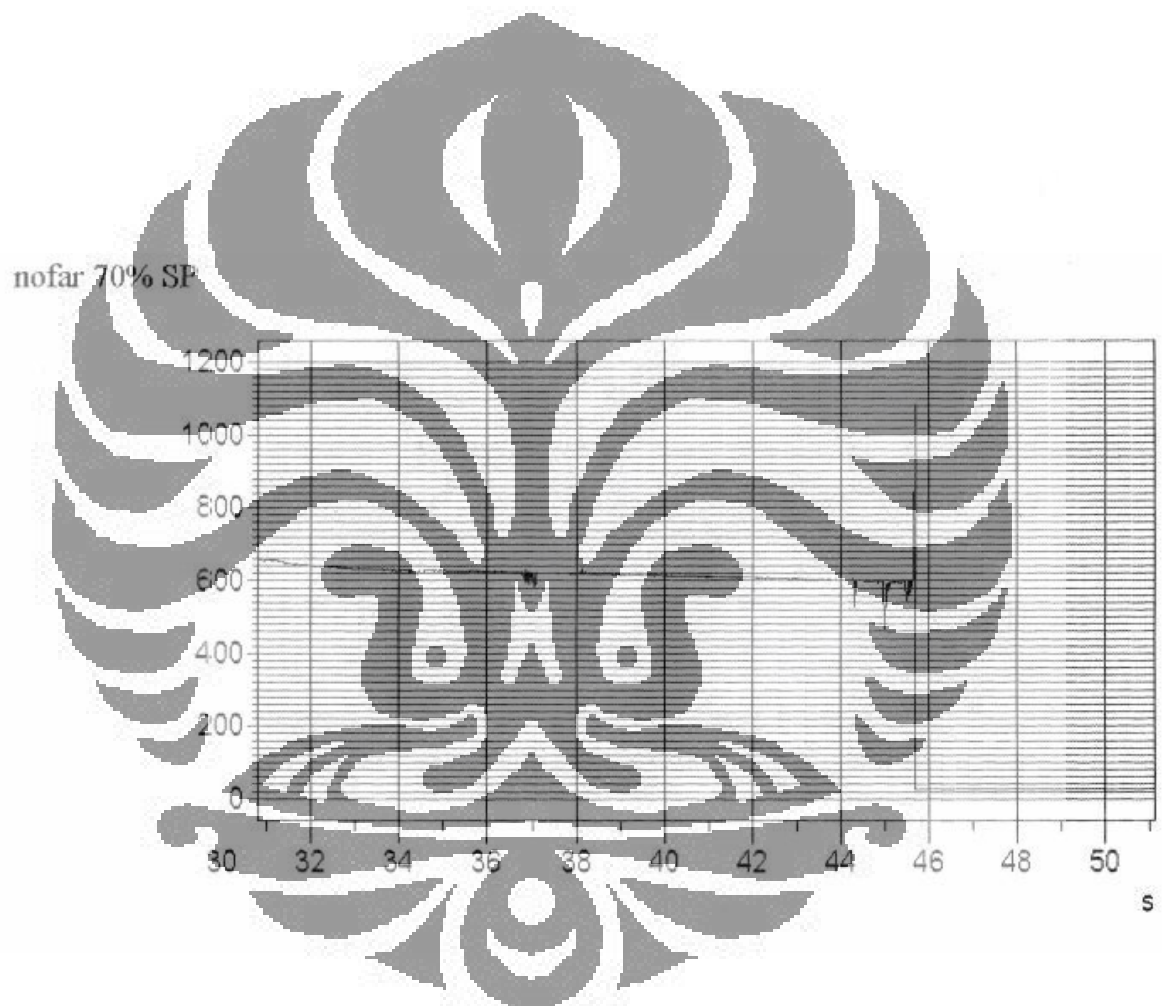
FF-26/Met-UI Rev 0

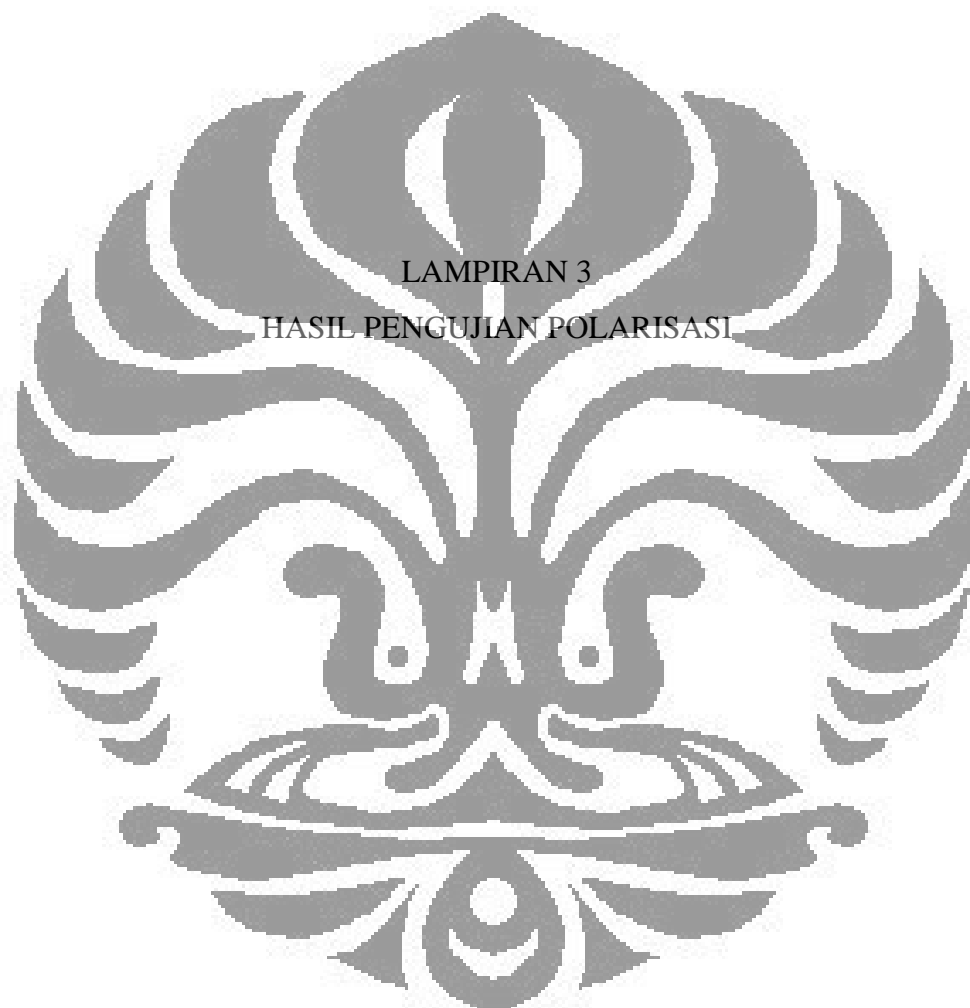
Laporan hasil pengujian hanya berlaku untuk tujuan yang tertera di Laporan Uji Material. Untuk informasi lebih lanjut, hubungi kami.

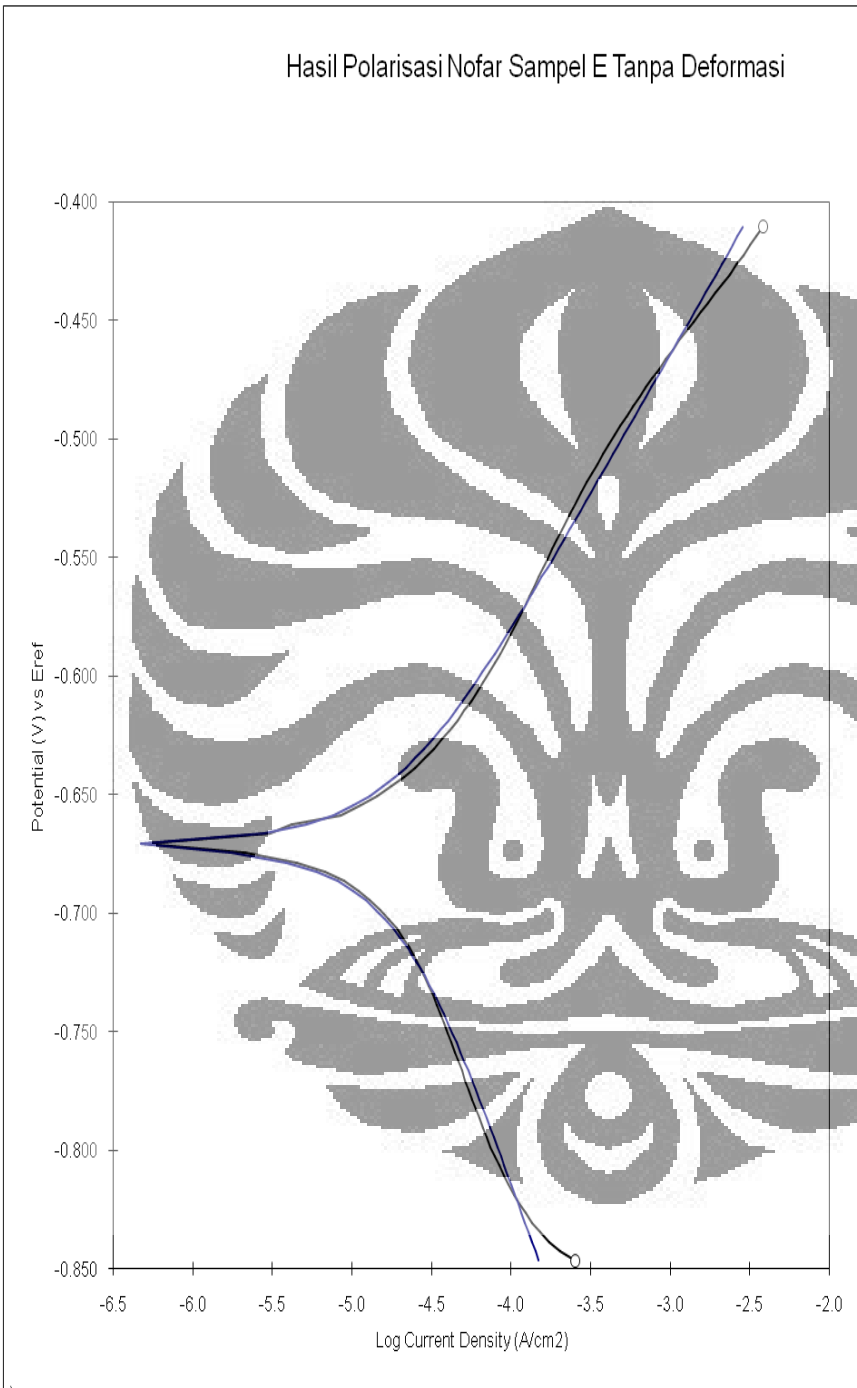










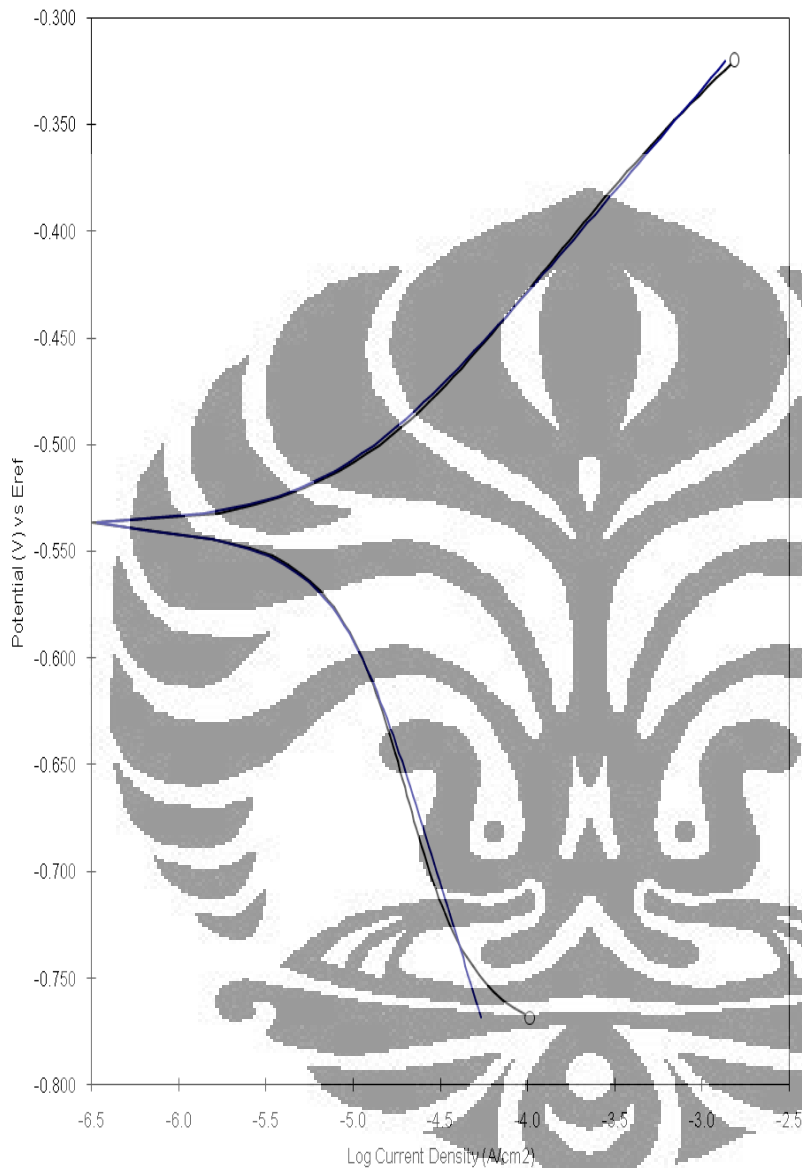


Pstat #1
Scan: -0.25 V to 0.25 V, 4 mV/s, 1 s/
EOC: -0.59638 V
Area: 0.785 cm²
Electrode: 7.87 gm/cm³, 27.92 g/Equ
Conditioning: OFF
Delay: OFF
IR Comp.: OFF

BetaC = 188.9 mV/Decade
BetaA = 118.0 mV/Decade
Rp = 1.792E+03 Ohm cm²
CorrRate = 8.046 mpy

NOTES

Hasil Polarisasi Nofar Sampel A Deformasi 50%

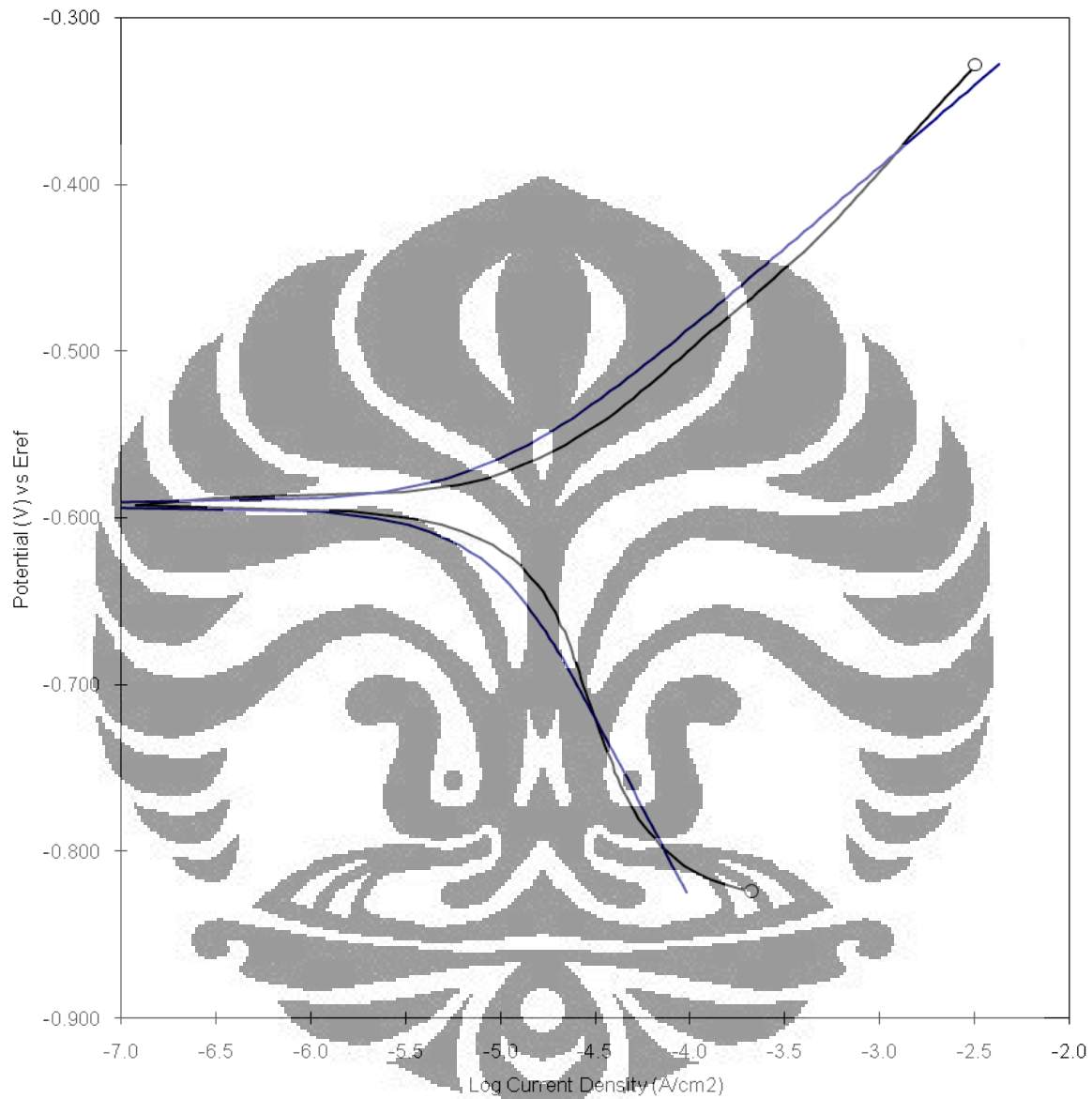


Pstat #1
 Scan: -0.25 V to 0.25 V, 4 mV/s, 1 s/p
 EOC: -0.518372 V
 Area: 0.86 cm²
 Electrode: 7.87 gm/cm³, 27.92 g/Equi
 Conditioning: OFF
 Delay: OFF
 IR Comp.: OFF

NOTES

TAFEL RESULTS
 Region = -768.3 mV to -320.3 mV
 E_{corr} = -537.6 mV
 I_{corr} = 7.637E-06 A/cm²
 Beta_C = 271.9 mV/Decade
 Beta_A = 96.6 mV/Decade
 R_p = 4.054E+03 Ohm cm²
 CorrRate = 3.489 mpy

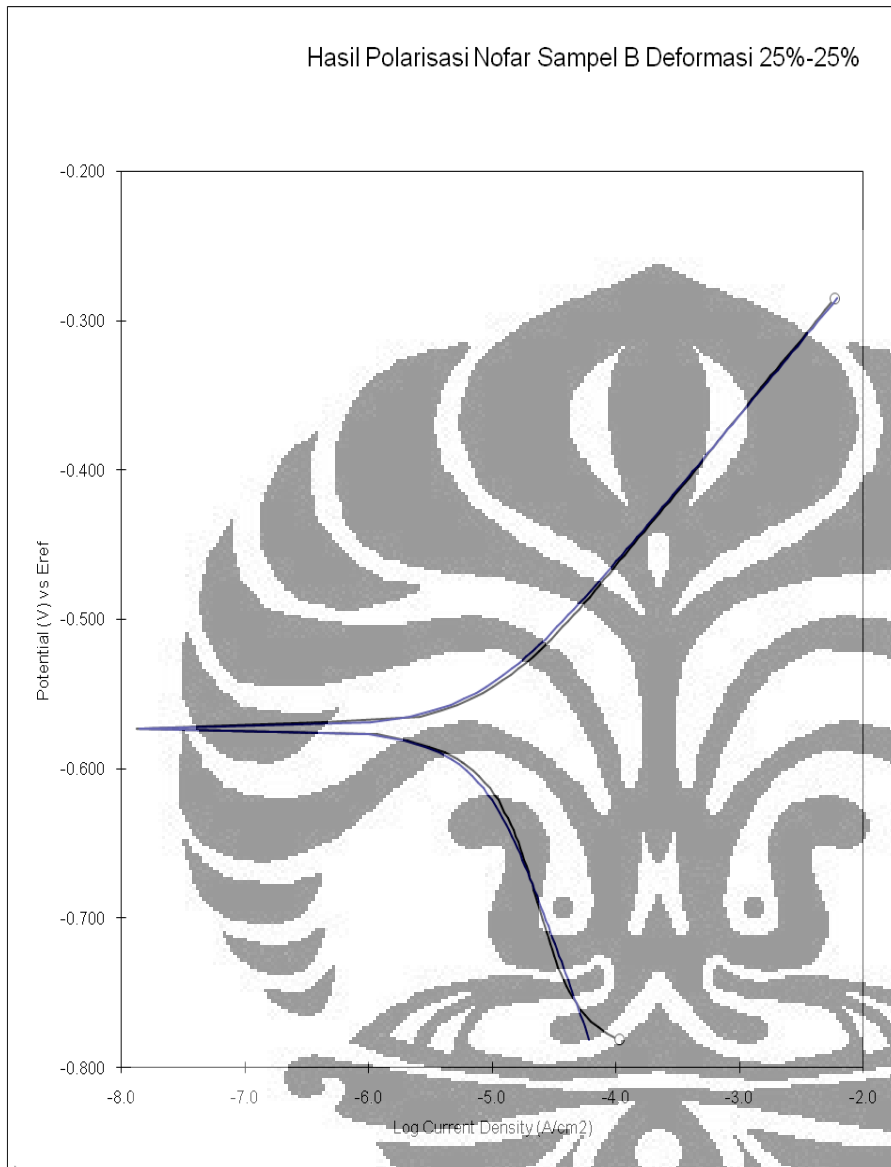
Hasil Polarisasi Nofar Sampel C Deformasi 70%



Pstat #1
 Scan: -0.25 V to 0.25 V
 EOC: -0.574359 V
 Area: 1.07 cm²
 Electrode: 7.87 gm/cm²
 Conditioning: OFF
 Delay: OFF
 IR Comp.: OFF

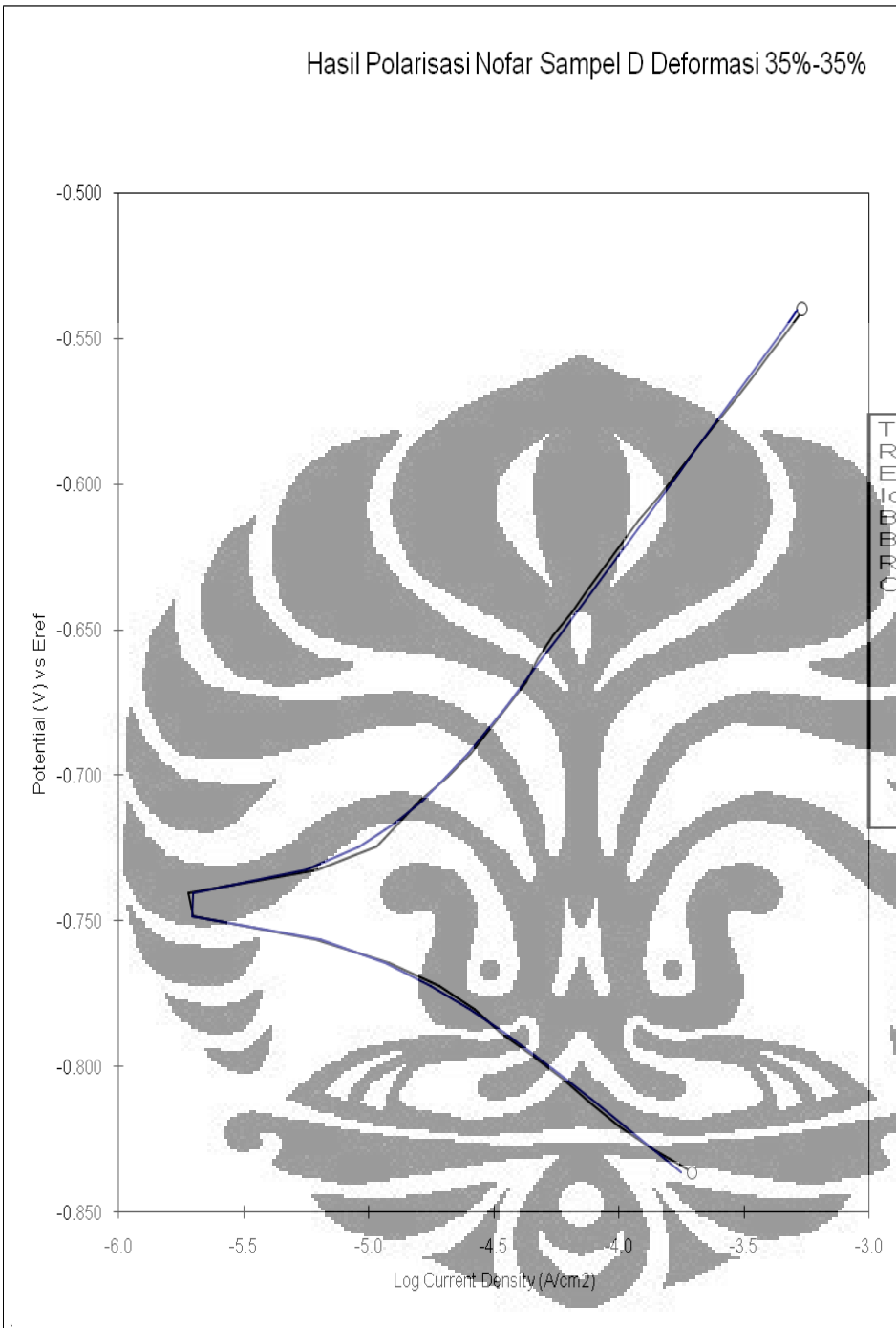
NOTES

TAFEL RESULTS
 Region = -824.3 mV to
 Ecorr = -592.2 mV
 Icorr = 8.431E-06 A/cm²
 BetaC = 220.8 mV/Dec
 BetaA = 97.8 mV/Dec
 Rp = 3.491E+03 Ohm
 CorrRate = 3.853 mpy



Pstat #1
Scan: -0.25 V to 0.25 V, 4 mV/s, 1 s/pt
EOC: -0.531035 V
Area: 0.79 cm²
Electrode: 7.87 gm/cm³, 27.92 g/Equivalent
Conditioning: OFF
Delay: OFF
IR Comp.: OFF

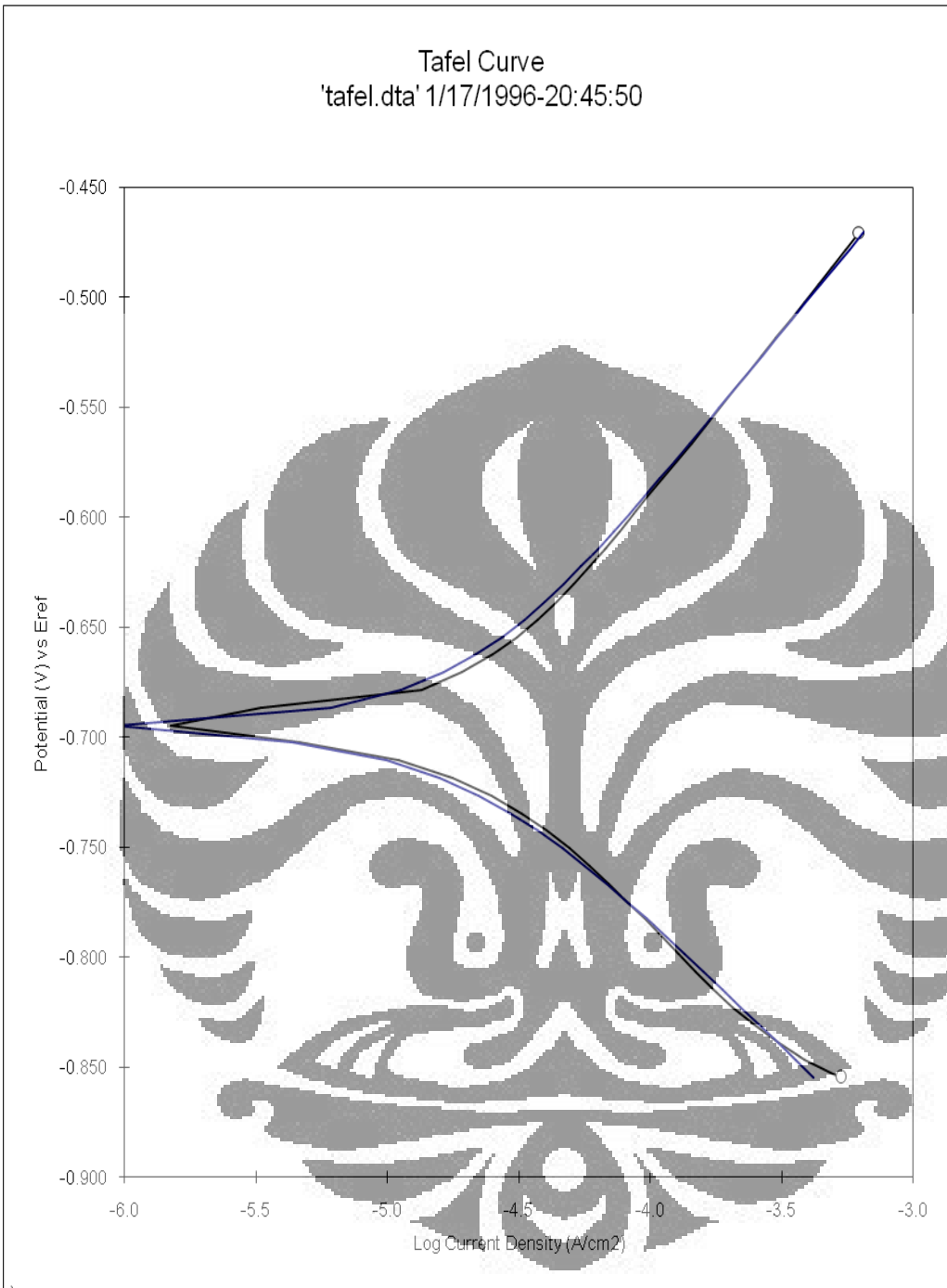
TAFEL RESULTS
Region = -781.0 mV to -285.0 mV
E_{corr} = -572.9 mV
I_{corr} = 7.706E-06 A/cm²
BetaC = 232.0 mV/Decade
BetaA = 99.2 mV/Decade
R_p = 3.917E+03 Ohm cm²
CorrRate = 3.521 mpy



TAFEL RESULTS
Region = -836.3 mV
Ecorr = -744.4 mV
Icorr = 9.629E-06 A/cm²
BetaC = 72.5 mV/Dec
BetaA = 118.0 mV/Dec
Rp = 2.026E+03 Ohm
CorrRate = 4.400 mp

Pstat #1
EOC: -0.686146 V
Area: 2.51 cm²
Electrode: 7.87 gm/cm³
Conditioning: OFF
Delay: OFF
IR Comp.: OFF

NOTES



Pstat #1
 EOC: -0.604537 V
 Area: 0.995 cm²
 Electrode: 7.87 gm/cm³
 Conditioning: OFF
 Delay: OFF
 IR Comp.: OFF

NOTES

TAFEL RESULTS
 Region = -854.5 mV to -470.5 mV
 Ecorr = -695.9 mV
 Icorr = 1.840E-05 A/cm²
 BetaC = 116.9 mV/Decade
 BetaA = 145.8 mV/Decade
 Rp = 1.531E+03 Ohm cm²
 CorrRate = 8.408 mpy