



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEMPERATUR PEMBENTUKAN TERHADAP
SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA BAJA
KARBON BATANGAN ASTM A36 UNTUK APLIKASI *WELDED*
*EYE BOLT***

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

**HERRY OKTADINATA
0706173755**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEMPERATUR PEMBENTUKAN TERHADAP
SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA BAJA
KARBON BATANGAN ASTM A36 UNTUK APLIKASI *WELDED*
*EYE BOLT***

TESIS

HERRY OKTADINATA
0706173755

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2009**



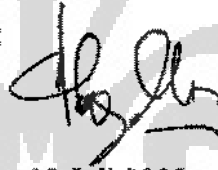
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Herry Oktadinata

NPM : 0706173755

Tanda Tangan :



Tanggal : 10 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Herry Oktadinata

NPM : 0706173755

Program Studi : Metalurgi dan Material

Judul Tesis : Pengaruh Temperatur Pembentukan Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Batangan ASTM A36 Untuk Aplikasi *Welded Eye Bolt*

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

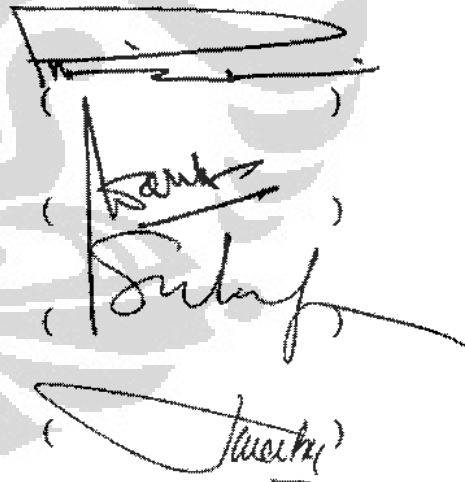
DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA

Pembimbing II : Dr. Ir. Winarto, M.Sc

Penguji : Dr. Ir. Sutopo, M.Sc

Penguji : Dwi Marta Nurjaya, ST, MT



()
()
()
()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 10 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah kepada Allah SWT karena atas berkat, rahmat dan hidayah-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis ini ditulis dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapat gelar Magister Teknik pada Fakultas Teknik Program Pascasarjana Bidang Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa banyak pihak telah membantu hingga selesainya penyusunan tesis ini. Oleh karena itu penghargaan dan ucapan terima kasih saya sampaikan kepada :

- (1) Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA, selaku dosen pembimbing I yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan dalam penyusunan tesis ini ;
- (2) Dr. Ir. Winarto, MSc, selaku dosen pembimbing II yang telah memberi saran dan masukan dalam penyusunan tesis ini ;
- (3) Prof. Dr.-Ing Ir. Bambang Suharno, selaku ketua Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia ;
- (4) Mr. Brian Godden, selaku General Manager PT Binder Indonesia yang telah memberi kesempatan untuk pengujian di pabrik ;
- (5) orangtua dan keluarga saya yang telah banyak memberi dukungan moral ; dan
- (6) sahabat-sahabat pada Program Pascasarjana Bidang Metalurgi dan Material Universitas Indonesia yang banyak membantu dalam penyusunan tesis ini.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini memberi manfaat bagi pengembangan ilmu dan pihak-pihak yang memerlukan.

Depok, 10 Juli 2009

Herry Oktadinata

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Herry Oktadinata
NPM : 0706173755
Program Studi : Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

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

Pengaruh Temperatur Pembentukan Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Batangan ASTM A36 Untuk Aplikasi *Welded Eye Bolt*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan 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 : 10 Juli 2009

Yang menyatakan



(Herry Oktadinata)

ABSTRAK

Nama : Herry Oktadinata
Program Studi : Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Temperatur Pembentukan Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Batangan ASTM A36 Untuk Aplikasi *Welded Eye Bolt*

Proses pembentukan logam dikenal luas di bidang manufaktur. Salah satu produk pembentukan adalah *welded eye bolt* yang dibentuk pada temperatur tinggi. Beberapa masalah ditemui pada *welded eye bolt* dimana terjadi kegagalan berupa retak maupun ukuran penampang yang tidak merata sepanjang daerah pembentukan panas.

Pada penelitian ini diuji keuletan temperatur tinggi baja karbon batangan ASTM A36 sebagai bahan dasar *welded eye bolt*, agar diperoleh hubungan antara temperatur terhadap mampu bentuk material sebagai bahan masukan dalam proses pembentukan panas berikutnya. Metode penelitian meliputi karakterisasi material melalui analisis kimia dan pengujian tarik pada temperatur ruang dan temperatur tinggi (T_{600} , T_{700} , T_{800}). Kemudian dilakukan pembentukan *welded eye bolt* berdiameter 16, 20, 24 mm pada T_{600} , T_{700} , T_{800} . Sampel proses pembentukan kemudian diuji kekerasan dan dilakukan pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM.

Hasil pengujian tarik bahan dasar *welded eye bolt* pada temperatur ruang, T_{600} , T_{700} , T_{800} memperlihatkan bahwa kekuatan tarik dan luluh turun dengan naiknya temperatur. Pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa ukuran butir pada T_{600} dan T_{700} relatif sama, namun pada T_{800} ukuran butir lebih besar. Pengamatan struktur mikro juga menunjukkan terdapatnya inklusi. Hasil optimal pembentukan menunjukkan bahwa T_{600} dan T_{700} lebih baik dibandingkan pada T_{800} . Sedangkan keuletan T_{700} lebih baik daripada T_{600} . Jadi pembentukan komponen *welded eye bolt* pada T_{700} lebih direkomendasikan.

Kata kunci :
baja karbon ASTM A36, pembentukan, temperatur tinggi, struktur mikro, sifat mekanik.

ABSTRACT

Name : Herry Oktadinata
Study Program : Metallurgy and Material
Title : The Effect of Forming Temperature on Mechanical Properties and Microstructure of Round Bar Carbon Steel ASTM A36 for Welded Eye Bolt Application

Metal forming is applied widely in the field of manufacturing. One forming component is the welded eye bolt which is formed at a high temperature. Some problems have been found during forming which include cracks and the cross section not being uniform along the forming area.

This research investigated the high temperature ductility of round bar carbon steel ASTM A36, which will be formed into welded eye bolts, so that we can establish the relationship between the forming temperature and formability of the material as an input in next hot forming process. The method of this research consist of characterizing the material by chemical analysis and conducting the tensile test at room temperature and high temperatures (T_{600} , T_{700} , T_{800}). The forming process was then continued for the welded eye bolt components which have 16, 20, and 24 mm diameter at T_{600} , T_{700} , T_{800} . Samples of the forming process were hardness tested and microstructure was observed by using SEM.

The tensile testing results of the welded eye bolt material at room temperature and T_{600} , T_{700} , T_{800} showed that the tensile strength and yield strength decreased at higher temperatures. Microstructure analysis showed that the grain size at T_{600} and T_{700} are similar, but the grain size at T_{800} is bigger. Inclusions were also observed. Optimum result show forming at T_{600} and T_{700} are better than T_{800} , and ductility of T_{700} is better than T_{600} . From these results T_{700} is recommended for the forming process of welded eye bolt components.

Key words :

carbon steel ASTM A36, forming, high temperature, microstructure, mechanical properties.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Hipotesis Penelitian	3
1.4.1 Hubungan Temperatur dengan Keuletan	4
1.4.2 Hubungan Temperatur dengan Struktur Mikro	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah	4
2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Pembentukan Logam	6
2.1.1 Teknik Pembentukan Logam	6
2.1.2 Sifat Mekanik Pada Pembentukan	8
2.1.2.1 Kekuatan	10
2.1.2.2 Kekerasan	11
2.1.2.3 Hubungan Kekuatan dengan Kekerasan	12
2.1.3 Temperatur Pembentukan	13
2.2 Material Baja Karbon	14
2.2.1 Diagram Fasa	15
2.2.2 Ukuran Butir	18
2.2.2.1 Metode Menentukan Ukuran Butir	18
2.2.2.2 Hubungan Kekuatan dengan Ukuran Butir	20
2.2.3 Inklusi	21
2.2.4 Karakterisasi Temperatur Tinggi	25
2.3 Baja Karbon Standar ASTM A36	26
2.3.1 Komposisi Kimia	27

2.3.2	Sifat-sifat Mekanik	29
3.	METODE PENELITIAN	32
3.1	Diagram Alir Penelitian	32
3.2	Bahan	33
3.3	Peralatan	35
3.4	Karakterisasi Material	35
	3.4.1 Pengujian Komposisi Kimia	36
	3.4.2 Pengujian Tarik	36
3.5	Proses Pembentukan	37
3.6	Pengamatan Metalografi	39
3.7	Pengujian Kekerasan	41
3.8	Pengukuran Reduksi Area (%RA)	43
4.	HASIL PENELITIAN	44
4.1	Karakterisasi Material	44
	4.1.1 Komposisi Kimia	44
	4.1.2 Sifat Mekanik	44
	4.1.3 Pengamatan Metalografi	45
4.2	Proses Pembentukan	46
	4.2.1 Pengamatan Metalografi	47
	4.2.1.1 Ukuran Butir	47
	4.2.1.2 Inklusi	50
	4.2.2 Pengujian Kekerasan	51
	4.2.3 Reduksi Area Hasil Pembentukan dan Hasil Uji Tarik	53
5.	PEMBAHASAN	55
5.1	Komposisi Kimia dan Sifat Mekanik Logam Dasar	55
5.2	Struktur Mikro Hasil Pembentukan	57
	5.2.1 Fasa Selama Proses Pembentukan	57
	5.2.2 Pertumbuhan Butir	58
	5.2.3 Inklusi Mangan Sulfida (MnS)	59
5.3	Kekerasan dan Kekuatan Hasil Pembentukan	60
5.4	Reduksi Area Hasil Pembentukan dan Hasil Uji Tarik	61
6.	KESIMPULAN	63

DAFTAR REFERENSI

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Aplikasi <i>welded eye bolt</i> di industri	1
Gambar 1.2	<i>Welded eye bolt</i> retak setelah pembentukan (kiri), ukuran penampang tidak seragam (kanan)	2
Gambar 2.1	Beberapa teknik pembentukan logam : <i>forging</i> (a), <i>rolling</i> (b), <i>extrusion</i> (c), <i>drawing</i> (d)	7
Gambar 2.2	Kurva tegangan-regangan pada material yang ulet	9
Gambar 2.3	Hubungan antara perpanjangan dan reduksi area pada beberapa jenis logam	10
Gambar 2.4	Perbandingan skala beberapa metode uji kekerasan	11
Gambar 2.5	Hubungan antara kekuatan dan kekerasan pada material baja, kuningan dan besi tuang	12
Gambar 2.6	Diagram fasa baja karbon	16
Gambar 2.7	Struktur mikro baja karbon UNS 10150 yang menunjukkan butiran ferit dan perlit (gelap). Perbesaran 200X, etsa <i>picral</i> 4% dan <i>nital</i> 2%	17
Gambar 2.8	Pengaruh ukuran butir pada kekuatan baja karbon rendah	20
Gambar 2.9	Pengaruh inklusi lunak dan keras pada pembentukan <i>void</i> selama deformasi plastis	22
Gambar 2.10	Inklusi MnS pada baja karbon rendah, permukaan polish, perbesaran 500X	23
Gambar 2.11	Inklusi MnS pada sampel yang mengalami deformasi temperatur 900 °C	24
Gambar 2.12	Pengaruh temperatur pada kekuatan tarik dan luluh baja karbon	26
Gambar 2.13	Grafik tegangan (<i>stress</i>) vs regangan (<i>strain</i>) di daerah elastis pada pengujian tarik	29
Gambar 2.14	Pengaruh unsur karbon pada baja karbon rendah	31
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	32
Gambar 3.2	Mesin uji tarik dan benda uji tarik temperatur tinggi	37
Gambar 3.3	Penggunaan <i>infra red thermometer</i> untuk mengontrol temperatur selama proses pembentukan	38
Gambar 3.4	Cuplikan sampel pengamatan metalografi	40
Gambar 3.5	Cuplikan sampel pada mesin uji SEM (kiri) dan cuplikan sampel temperatur pembentukan 600, 700, 800 °C (kanan)	40
Gambar 3.6	Sampel uji kekerasan	42
Gambar 4.1	Foto hasil uji SEM pada baja karbon ASTM A36	46
Gambar 4.2	Hasil pembentukan <i>welded eye bolt</i> pada temperatur 600 °C dengan diameter 16, 20, 24 mm	46
Gambar 4.3	Garis lurus pada metode pengukuran besar butir dimana	

	1 strip mewakili ukuran 1 mikron	47
Gambar 4.4	Hasil foto mikroskop pada sampel hasil pembentukan temperatur 600 °C (kiri), temperatur 700 °C (tengah), temperatur 800 °C (kanan), perbesaran 500X	50
Gambar 5.1	Grafik kekuatan tarik sebagai fungsi temperatur	56
Gambar 5.2	Grafik ukuran butir (<i>grain size</i>) sebagai fungsi temperatur	59
Gambar 5.3	Grafik reduksi area (%RA) hasil uji tarik sebagai fungsi temperatur	61
Gambar 5.4	Grafik reduksi area (%RA) hasil pembentukan sebagai fungsi temperatur	62
Gambar A.1	Hasil pengujian SEM sampel diameter 16 mm pada temperatur pembentukan 600 °C	66
Gambar A.2	Hasil pengujian SEM sampel diameter 16 mm pada temperatur pembentukan 700 °C	66
Gambar A.3	Hasil pengujian SEM sampel diameter 16 mm pada temperatur pembentukan 800 °C	67
Gambar A.4	Hasil pengujian SEM sampel diameter 20 mm pada temperatur pembentukan 600 °C	67
Gambar A.5	Hasil pengujian SEM sampel diameter 20 mm pada temperatur pembentukan 700 °C	68
Gambar A.6	Hasil pengujian SEM sampel diameter 20 mm pada temperatur pembentukan 800 °C	68
Gambar A.7	Hasil pengujian SEM sampel diameter 24 mm pada temperatur pembentukan 600 °C	69
Gambar A.8	Hasil pengujian SEM sampel diameter 24 mm pada temperatur pembentukan 700 °C	69
Gambar A.9	Hasil pengujian SEM sampel diameter 24 mm pada temperatur pembentukan 800 °C	70
Gambar B.1	Hasil uji tarik temperatur ruang pada benda uji T0-1	71
Gambar B.2	Hasil uji tarik temperatur ruang pada benda uji T0-2	72
Gambar B.3	Hasil uji tarik temperatur ruang pada benda uji T0-3	73
Gambar B.4	Hasil uji tarik temperatur 600 °C pada benda uji T1-1	74
Gambar B.5	Hasil uji tarik temperatur 600 °C pada benda uji T1-2	75
Gambar B.6	Hasil uji tarik temperatur 600 °C pada benda uji T1-3	76
Gambar B.7	Hasil uji tarik temperatur 700 °C pada benda uji T2-1	77
Gambar B.8	Hasil uji tarik temperatur 700 °C pada benda uji T2-2	78
Gambar B.9	Hasil uji tarik temperatur 700 °C pada benda uji T2-3	79
Gambar B.10	Hasil uji tarik temperatur 800 °C pada benda uji T3-1	80
Gambar B.11	Hasil uji tarik temperatur 800 °C pada benda uji T3-2	81
Gambar B.12	Hasil uji tarik temperatur 800 °C pada benda uji T3-3	82
Gambar C.1	Inklusi 1 pada sampel P2 hasil pembentukan temperatur 600 °C	83
Gambar C.2	Inklusi 2 dan 3 pada sampel P2 hasil pembentukan temperatur 600 °C	83
Gambar C.3	Inklusi 4 pada sampel P2 hasil pembentukan temperatur 600 °C	84

Gambar C.4	Inklusi 1 pada sampel K2 hasil pembentukan temperatur 700 °C	84
Gambar C.5	Inklusi 2 pada sampel K2 hasil pembentukan temperatur 700 °C	85
Gambar C.6	Inklusi 3 pada sampel K2 hasil pembentukan temperatur 700 °C	85
Gambar C.7	Inklusi 4 pada sampel K2 hasil pembentukan temperatur 700 °C	86
Gambar C.8	Inklusi 1 pada sampel M2 hasil pembentukan temperatur 800 °C	86
Gambar C.9	Inklusi 2 pada sampel M2 hasil pembentukan temperatur 800 °C	87
Gambar C.10	Inklusi 3 pada sampel M2 hasil pembentukan temperatur 800 °C	87
Gambar C.11	Inklusi 4 pada sampel M2 hasil pembentukan temperatur 800 °C	88
Gambar D.1	Komposisi kimia berdasarkan <i>Mill Certificate</i> dari <i>supplier</i>	95
Gambar D.2	Komposisi kimia hasil pengujian	96
Gambar E.1	Mesin uji tarik dan dapur pemanas	97
Gambar E.2	Mesin uji SEM	97
Gambar E.3	Sampel uji tarik temperatur tinggi	98
Gambar E.4	Patahan sampel uji tarik temperatur 600, 700, 800 °C	98
Gambar E.5	Pemotongan bahan baku dengan mesin <i>bandsaw</i>	99
Gambar E.6	Perlengkapan oksigen dan <i>acetylene</i> untuk pembakaran	99
Gambar E.7	Proses pembentukan <i>welded eye bolt</i>	100
Gambar E.8	Pengontrolan temperatur pembentukan	100
Gambar E.9	Sampel pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C	101
Gambar E.10	Cuplikan sampel uji SEM	101
Gambar E.11	Sampel uji EDX	102

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Ukuran butir berdasarkan standar ASTM E112	19
Tabel 2.2	Perbandingan karakteristik mekanik material <i>low carbon steel</i> , <i>high strength</i> , dan <i>low alloy steel</i>	27
Tabel 2.3	Komposisi kimia baja karbon standar ASTM A36	28
Tabel 2.4	Sifat mekanik baja karbon standar ASTM A36	30
Tabel 3.1	Perbandingan data komposisi kimia bahan berdasarkan standar ASTM A36 dan <i>mill certificate</i>	33
Tabel 3.2	Standard benda uji tarik menurut ASTM E8	34
Tabel 3.3	Kondisi pengujian kekerasan berdasarkan standar ASTM E10	41
Tabel 4.1	Perbandingan komposisi kimia antara standar ASTM A36, <i>mill certificate</i> , dan hasil karakterisasi	44
Tabel 4.2	Hasil uji tarik pada temperatur ruang (25 °C), 600, 700, 800 °C	45
Tabel 4.3	Ukuran butir dari pengamatan metalografi benda uji pada temperatur ruang	48
Tabel 4.4	Ukuran butir pada temperatur pembentukan 600, 700, 800 °C	49
Tabel 4.5	Hasil pengukuran panjang inklusi sampel pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C	50
Tabel 4.6	Hasil analisa EDX yang menunjukkan persentase unsur-unsur yang terdapat pada inklusi	51
Tabel 4.7	Hasil uji kekerasan Brinell	52
Tabel 4.8	Hasil perhitungan kekuatan tarik dari nilai kekerasan Brinell	53
Tabel 4.9	Persentase reduksi area pada pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C	53
Tabel 4.10	Persentase reduksi area pada uji tarik temperatur 600, 700, 800 °C	54

BAB I PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Material baja karbon adalah salah satu material yang sangat sering digunakan sebagai material struktur, komponen otomotif, tangki penyimpanan, hingga untuk bahan perlengkapan rumah tangga (*furniture*). Material ini dipilih sebagai material pembuatan komponen *welded eye bolt* karena mempunyai kekuatan tinggi dan keuletan yang baik sehingga cocok untuk dilakukan pembentukan melalui proses pembengkokan (*bending*) untuk dijadikan komponen *welded eye bolt*. Komponen ini banyak digunakan sebagai batang penggantung (*hanger rod*) pada industri perminyakan dan gas, petrokimia, dan pembangkit tenaga. Gambar 1.1 memperlihatkan *welded eye bolt* yang menggantung atau menahan posisi pipa agar tetap berada pada elevasi tertentu.



Gambar 1.1 Aplikasi *welded eye bolt* di industri.

Welded eye bolt dibuat melalui proses pembentukan dari baja batangan. Baja batangan dibentuk dengan menggunakan gaya tekan pada temperatur tinggi sehingga terjadi deformasi plastis.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang terjadi pada proses pembentukan logam, dalam hal ini khususnya pada pembuatan *welded eye bolt* adalah terjadinya perubahan bentuk yang tidak seragam sepanjang bagian yang mengalami pembentukan, dan terjadinya retak sebagaimana terlihat pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 *Welded eye bolt* retak setelah pembentukan (kiri), ukuran penampang tidak seragam (kanan)

Gambar 1.2 memperlihatkan retakan searah aliran regangan. Retak terlihat jelas setelah dilakukan pengamatan *dye penetrant test*. Dan juga terlihat ukuran penampang yang tidak seragam dimana pengurangan diameter tidak sama disepanjang batang yang dibentuk.

Untuk itu perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai mampu bentuk material sebagai fungsi temperatur. Dan juga perlu diketahui sifat-sifat mekanik baja karbon batangan ASTM A36 pada temperatur tinggi. Selanjutnya pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro setelah proses pembentukan pada temperatur tinggi.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Melalui penelitian ini diharapkan dapat diketahui pengaruh temperatur pada pembentukan material baja karbon batangan ASTM A36 yang digunakan sebagai bahan baku pada proses fabrikasi komponen *welded eye bolt*.

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui pengaruh kenaikan temperatur terhadap sifat mekanik baja karbon batangan standar ASTM A36.
2. Untuk mengetahui pengaruh temperatur pembentukan terhadap struktur mikro baja karbon batangan standar ASTM A36.
3. Untuk mengetahui hubungan temperatur yang dibutuhkan dalam kaitannya dengan besaran diameter material pada proses pembentukan komponen *welded eye bolt*.
4. Memperbaiki produk jadi hasil pembentukan komponen *welded eye bolt* dari bahan dasar baja karbon standar ASTM A36 melalui proses pembentukan panas.

1.4 HIPOTESIS PENELITIAN

Beberapa penelitian tentang performa baja dalam kaitannya dengan temperatur tinggi telah pernah dilakukan. G.Y Li (2006) melakukan penelitian tentang keuletan temperatur tinggi material baja AH32 pada temperatur 800-1520 °C dan menyimpulkan bahwa kekuatan material turun dengan naiknya temperatur. Makin tinggi temperatur, daerah cekungan (*dimple*) terlihat makin dalam dan permukaan patahan lebih bergelombang (p.78).

Sedangkan Ju Chen (2006) meneliti perbandingan kekuatan luluh pada temperatur ruang terhadap temperatur tinggi. Penelitian dilakukan terhadap material *high strength structural steel* dan *mild steel* pada temperatur 22-940 °C. Penelitiannya menyimpulkan bahwa pada temperatur 22-540 °C faktor reduksi kekuatan luluh dan modulus elastisitas relatif kecil yaitu sekitar 8%. Tetapi pada temperatur di atas 540 °C pengurangan kekuatan luluh dan modulus elastisitas terlihat cukup besar yaitu mencapai sekitar 56% (p.1953).

1.4.1 Hubungan temperatur dengan keuletan

Proses pembentukan adalah proses deformasi plastis dimana diharapkan tidak terjadi retak atau patah pada material. Karena itu material diharapkan memiliki keuletan dan kekuatan yang baik.

Kegagalan material pada pembentukan di temperatur tinggi dipengaruhi oleh keuletan pada temperatur tinggi dan kekuatan. Keuletan meningkat dengan naiknya temperatur. Sedangkan kekuatan turun dengan naiknya temperatur.

1.4.2 Hubungan temperatur dengan struktur mikro

Proses deformasi akibat pembebanan pada temperatur tinggi meliputi peluncuran dislokasi yang menghasilkan slip, perpindahan massa difusi dan pergeseran batas butir. Proses tersebut mempengaruhi distribusi tegangan internal.

Kenaikan temperatur berdampak pada struktur mikro material, dimana terjadi perbesaran butir yang mengakibatkan turunnya kekuatan.

1.5 MANFAAT PENELITIAN

Manfaat penelitian ini adalah untuk memperoleh data temperatur yang paling sesuai pada pembentukan komponen *welded eye bolt* serta sifat mekaniknya sehingga sesuai dengan aplikasinya.

1.6 RUANG LINGKUP DAN BATASAN MASALAH

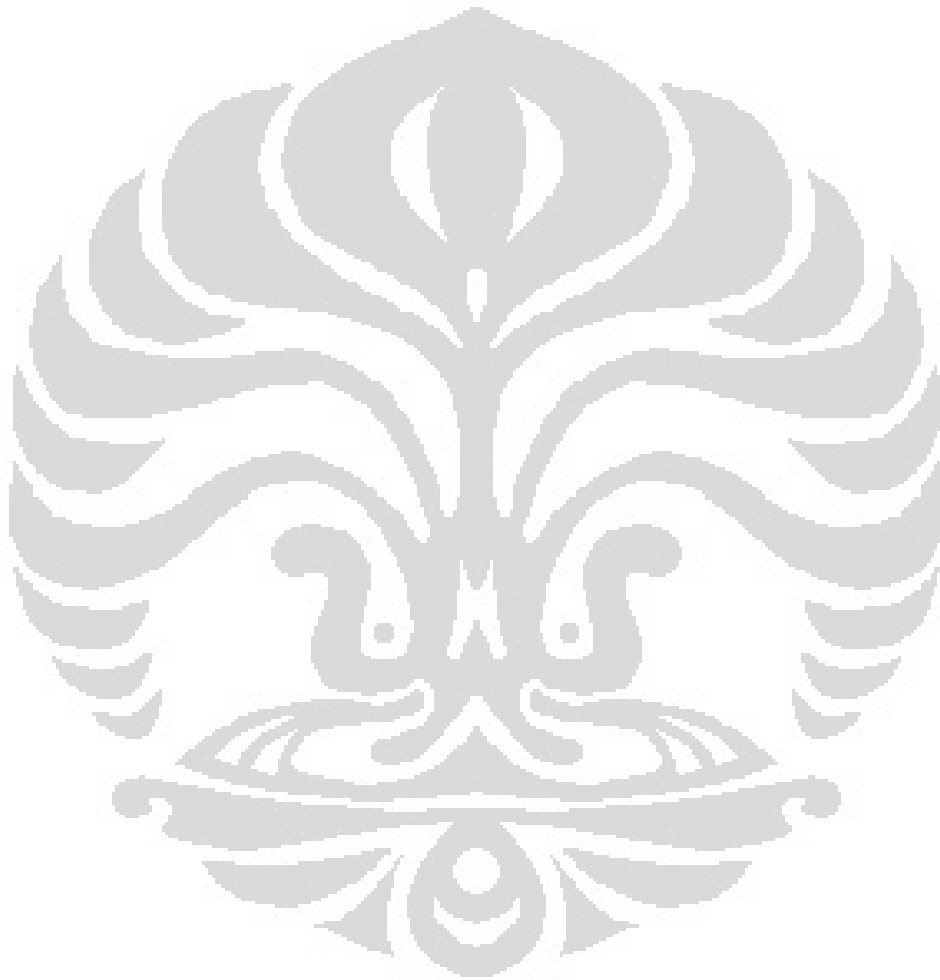
Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon batangan (*round bar*) standar ASTM A36. Dalam hal ini dipilih material berdiameter 16, 20, 24 mm. Proses pembentukan akan dilakukan pada beberapa besaran temperatur yang berbeda (600, 700, 800 °C) sehingga diperoleh hubungan antara besaran temperatur dan mampu bentuk.

Secara umum komponen *welded eye bolt* dihasilkan melalui beberapa tahapan proses berikut :

1. Material baja karbon batangan standar ASTM A36 dipotong menurut ukuran yang diperlukan.
2. Material dibentuk pada temperatur tinggi.
3. Pada bagian ujung material yang dibentuk disambung melalui proses pengelasan.

4. Proses pelapisan (*coating*), yaitu dapat berupa *painting* atau *Hot Dip Galvanize* (HDG)

Variabel yang akan diamati dalam penelitian ini adalah pengaruh temperatur pembentukan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja karbon batangan ASTM A36 dalam kaitannya dengan mampu bentuk. Sehingga dari hasil penelitian akan diperoleh besarnya temperatur yang sesuai untuk pembentukan komponen *welded eye bolt*.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PEMBENTUKAN LOGAM

Proses pembentukan logam adalah proses deformasi plastis dari bahan baku hingga menghasilkan produk akhir yang diinginkan. Proses pembentukan logam dapat didefinisikan sebagai proses pemberian nilai tambah pada bahan baku logam dengan cara deformasi plastis sehingga menghasilkan produk dengan bentuk akhir yang diinginkan (R. Saptono, 2005).

2.1.1 Teknik Pembentukan Logam

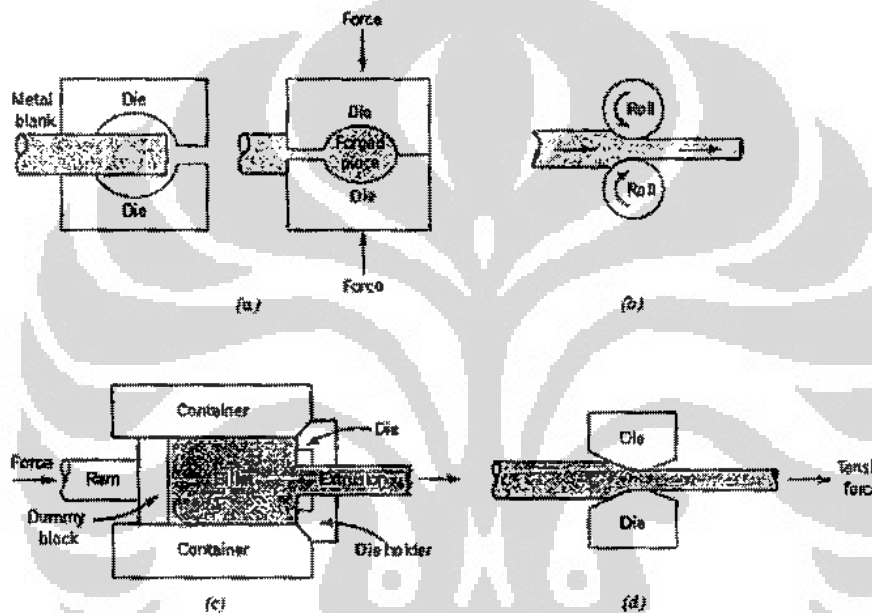
Di bidang manufaktur, bahan baku atau material dengan bentuk geometri yang sangat sederhana diproses menjadi bentuk akhir dengan geometri yang kompleks yang meliputi bentuk, ukuran, akurasi dimensi dan sifat material.

Proses deformasi ini dilakukan dengan bantuan gaya eksternal yang menghasilkan kekuatan melebihi kekuatan luluh material. Karena itu material harus memiliki keuletan yang baik agar dihasilkan deformasi permanen tanpa terjadi retak atau patah.

Teknik pembentukan logam yang umum dan dilakukan secara massal antara lain adalah *forging*, *extrusion*, *rolling*, dan *drawing*. Proses pembentukan logam berperan penting dalam bidang industri untuk menghasilkan komponen dan produk lainnya. Dalam proses pembentukan, bahan baku material umumnya berupa pelat lembaran (*sheet*), batangan (*bar/rod*), kawat (*wire*), dan pipa (*pipe/tube*)

Forging adalah proses pembentukan logam secara plastis dengan memberikan gaya tekan pada logam yang akan dibentuk. Gaya tekan yang diberikan bisa secara manual maupun secara mekanis (hidrolik atau pneumatik). Proses *forging* dapat dikerjakan pada temperatur tinggi maupun pengerjaan dingin. Produk *forging* memiliki struktur butir dan sifat mekanik yang baik. Contoh produk *forging* antara lain piston dan poros engkol (*crank shaft*) pada kendaraan bermotor.

Pengerolan (*rolling*) merupakan cara untuk memperoleh bentuk lengkungan yang panjang. Dilakukan dengan meletakkan material diantara dua rol. Pengerolan dingin dilakukan untuk produksi logam lembaran dengan kualitas permukaan yang baik. Proses ini juga digunakan untuk menghasilkan silinder tipis dari pelat lembaran. Untuk menghasilkan bentuk profil seperti *I-beam*, dihasilkan dengan menggunakan rol beralur.



Gambar 2.1 Beberapa teknik pembentukan logam : *forging* (a), *rolling* (b), *extrusion* (c), *drawing* (d) (Callister, 2001)

Pada proses ekstrusi (*extrusion*), logam ditekan dan ditarik mengalir melalui lubang *die* untuk membentuk benda kerja dengan luas penampang yang lebih kecil. Proses ekstrusi bisa dikerjakan melalui pengerjaan panas atau dingin. Produk hasil ekstrusi antara lain batangan logam dan pipa.

Drawing dilakukan dengan menarik logam melalui sebuah *die* berbentuk *taper* dimana gaya tekan dilakukan dari sisi luar. Pengurangan penampang

berhubungan dengan penambahan panjang. Produk batangan, kawat dan pipa umumnya di hasilkan melalui proses ini.

Cara umum untuk mengklasifikasikan proses pembentukan logam adalah berdasarkan proses dingin (temperatur ruang) dan proses panas (di atas temperatur rekristalisasi). Sifat mekanik material berbeda pada kondisi temperatur yang berbeda. Umumnya kekuatan luluh logam meningkat dengan meningkatnya regangan selama proses dingin (*cold forming*) dan meningkatnya regangan selama proses panas (*hot forming*). Bagaimanapun prinsip umum pembentukan logam pada berbagai temperatur pada dasarnya sama.

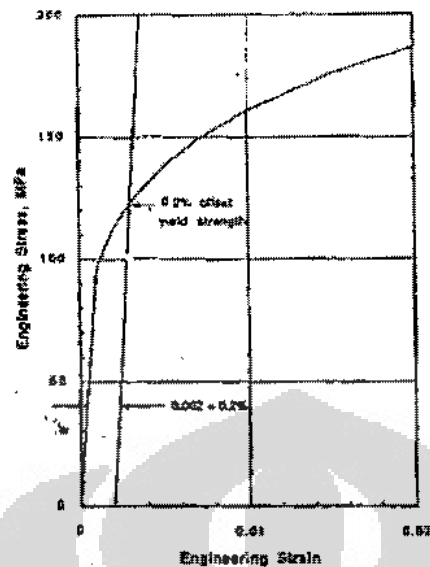
2.1.2 Sifat Mekanik Pada Pembentukan

Untuk memperoleh hasil pembentukan yang baik maka logam harus memiliki sifat-sifat tertentu. Sifat-sifat yang diharapkan adalah kekuatan luluh rendah dan keuletan tinggi. Temperatur mempengaruhi sifat material. Kenaikan temperatur akan mengakibatkan kekuatan luluh turun dan keuletan naik.

Karakteristik produk pembentukan logam merupakan kontribusi dari parameter proses dan material. Parameter proses mencakup regangan, laju regangan, dan temperatur. Untuk mendapatkan struktur dan sifat-sifat yang diinginkan, proses pembentukan dikontrol secara mekanik, *thermal*, atau kombinasi keduanya.

Kekuatan luluh (*Yield Strength*)

Kekuatan luluh adalah titik transisi dari daerah elastis menuju plastis pada kurva tegangan-regangan. Apabila kurva sangat landai sehingga titik tersebut sulit ditentukan dengan presisi, maka ditarik garis sejajar daerah elastis dengan offset 0.002 seperti terlihat pada Gambar 2.2. Kekuatan luluh menunjukkan tingkat ketahanan material terhadap deformasi plastis.



Gambar 2.2 Kurva tegangan-regangan pada material yang ulet
(J.R Davis, 2004)

Keuletan (*Ductility*)

Keuletan adalah salah satu sifat mekanik yang penting. Keuletan diukur dari besaran deformasi plastis yang dicapai ketika material patah. Material yang memiliki deformasi plastis sangat kecil disebut getas. Ada dua parameter umum yang digunakan untuk mengukur keuletan, yaitu perpanjangan (*elongation*) dan reduksi area (*reduction of area*).

$$\text{elongation (\% EL)} = \frac{(l_f - l_0)}{l_0} \times 100 \%$$

dimana l_f adalah panjang akhir dan l_0 adalah panjang awal.

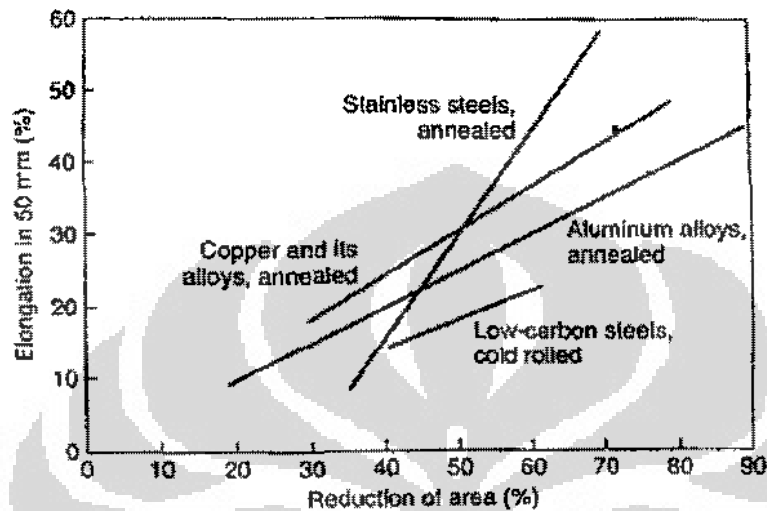
$$\text{reduksi area (\% RA)} = \frac{(A_0 - A_f)}{A_0} \times 100\%$$

dimana A_0 luas penampang awal dan A_f adalah luas penampang akhir.

Persentase perpanjangan (%EL) adalah persentase regangan plastis saat patah. Sedangkan persentase reduksi area (%RA) adalah rasio perubahan luas penampang benda uji saat patah dan luas penampang sebelum diuji. Terdapat kelemahan dalam

pengukuran %RA terhadap material yang sangat ulet, sering terjadi kesulitan untuk mengukur luas penampang akhir pada patahan.

Hubungan antara perpanjangan dan reduksi area dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Hubungan antara perpanjangan dan reduksi area pada beberapa jenis logam (Kalpakjian, 2006)

Dalam kaitannya dengan proses pembentukan, keuletan memberikan indikasi sampai sejauh mana material dapat mengalami deformasi tanpa patah ketika mengalami pembentukan.

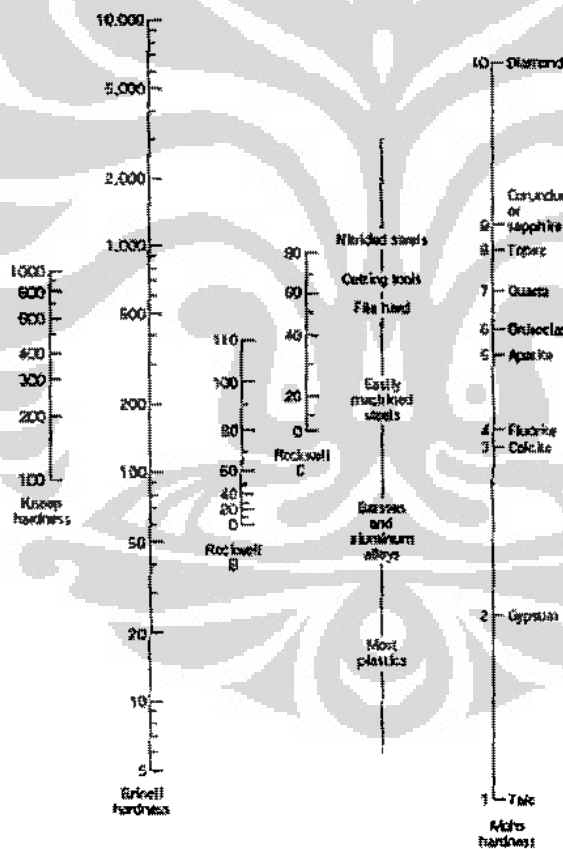
2.1.2.1 Kekuatan

Kekuatan maksimum material dapat diketahui dengan melakukan uji tarik. Hasil uji tarik akan menghasilkan grafik tegangan-regangan sehingga dapat diketahui karakteristik material yang meliputi kekuatan tarik, kekuatan luluh, reduksi area, dan regangan. Marjin antara kekuatan luluh dan kekuatan tarik memberikan faktor keselamatan dalam pemanfaatan material untuk struktur. Namun demikian dalam aplikasinya desain struktur untuk bertahan dibawah pembebanan dilakukan berdasarkan kekuatan luluh (J.R Davis, 2004).

2.1.2.2 Kekerasan

Kekerasan merupakan suatu ukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis lokal. Kekerasan memberikan indikasi umum tentang kekuatan material dan ketahanannya terhadap goresan (*scratch*) dan keausan (*wear*). Lebih spesifik, kekerasan biasanya didefinisikan sebagai ketahanan permanen terhadap penjejakan (*indentation*).

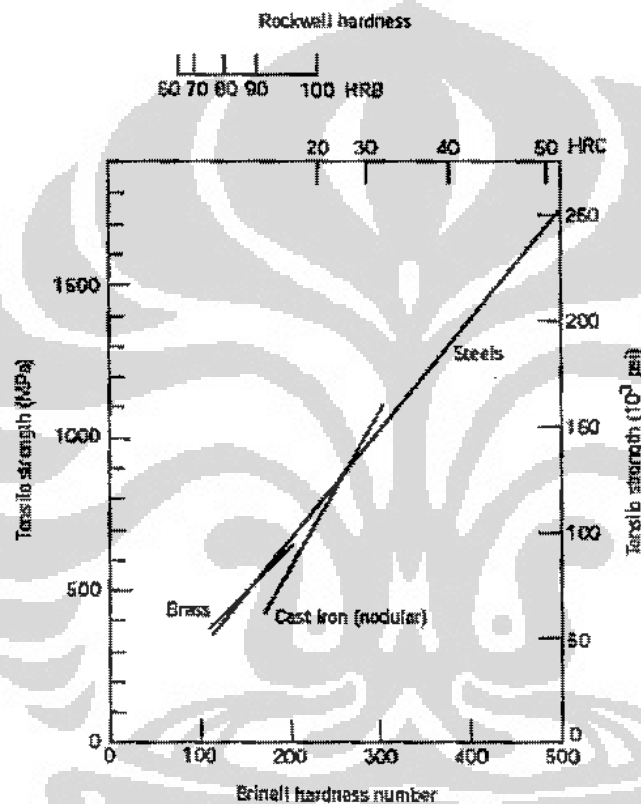
Dalam suatu pengujian kekerasan, beban di tempatkan pada sebuah indenter yang dikenakan langsung pada benda uji. Ukuran seberapa besar penetrasi indenter pada benda uji menunjukkan kemampuan material menahan deformasi plastis. Umumnya metode pengujian kekerasan yang sering digunakan adalah Brinnell, Rockwell, dan Vickers.



Gambar 2.4 Perbandingan skala beberapa metode uji kekerasan
(Callister, 2001)

2.1.2.3 Hubungan Kekuatan dengan Kekerasan

Kekuatan dan kekerasan sama-sama mengindikasikan ketahanan material terhadap deformasi plastis. Keduanya mempunyai hubungan yang proporsional namun konstanta proporsionalitasnya tergantung jenis material sebagaimana terlihat pada Gambar 2.5, dimana tampak grafik kekuatan sebagai fungsi kekerasan Brinell (HB) pada material baja, kuningan dan besi tuang.



Gambar 2.5 Hubungan antara kekuatan dan kekerasan pada material baja, kuningan dan besi tuang (Callister, 2001)

Pada baja, hubungan antara kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) dengan kekerasan (Brinell hardness) dinyatakan dalam rumus :

$$\text{Kekuatan Tarik (TS) (MPa)} = 3.45 \times \text{HB}$$

$$\text{Kekuatan Tarik (TS) (psi)} = 500 \times \text{HB}$$

2.1.3 Temperatur Pembentukan

Secara umum, temperatur pembentukan logam dapat diklasifikasikan kedalam 3 kelompok berdasarkan nilai perbandingan antara temperatur pembentukan T terhadap temperatur lebur T_m (ASM International, Vol.8 Mechanical Testing, 2000) :

- a). Pembentukan dingin (*cold forming*),
yaitu temperatur pembentukan dimana $T < 0.3 T_m$
- b). Pembentukan hangat (*warm forming*),
yaitu temperatur pembentukan dimana $0.3T_m < T < 0.6 T_m$
- c). Pembentukan panas (*hot forming*),
yaitu temperatur pembentukan dimana $T > 0.6 T_m$

Sedangkan Callister mendefinisikan *hot working* sebagai proses deformasi plastis yang dilakukan pada temperatur di atas temperatur rekristalisasi. Dibawah temperatur tersebut dikategorikan *cold working* (Callister, 2001) .

Proses pembentukan panas pada temperatur diatas temperatur rekristalisasi memiliki keuntungan terdapatnya fenomena rekristalisasi yang dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan dan meningkatkan kualitas struktur material dan terjadi pula pengurangan cacat-cacat dan diskontinuitas. Tetapi terdapat pula kerugian karena pada temperatur tersebut lebih mudah terjadi reaksi-reaksi antara logam dan atmosfer, misalnya reaksi oksidasi. Hasil akhir proses ini adalah bentuk visual permukaan yang kurang baik, yaitu relatif kasar dan berpori. Karena itu biasanya digunakan untuk menghasilkan produk yang tidak terlalu mementingkan kehalusan permukaan, misalnya untuk kerangka kendaraan bermotor.

Pada proses pengerjaan dingin diperoleh keuntungan berupa toleransi dimensi dan bentuk visual permukaan yang lebih baik. Interaksi logam dan lingkungan tidak terlalu signifikan. Terjadi peningkatan sifat mekanik berupa kekerasan, kekuatan, dan ketahanan fatik akibat fenomena pengerasan regangan dan peningkatan integritas. Tetapi terdapat efek lain berupa terdapatnya tegangan sisa dan penurunan keuletan. Untuk mengeliminasi diperlukan proses lanjut, yaitu *annealing* (R. Saptono, 2005).

2.2 MATERIAL BAJA KARBON

Baja karbon adalah material dengan bahan dasar Fe dan dan kandungan karbon maksimum 2 %. Namun umumnya baja komersial adalah jenis *hypoeutectoid*, yaitu mempunyai kandungan karbon kurang dari 0.77 %. Karbon merupakan unsur paduan utama dalam baja dengan unsur pengikat Si, P, S, Mn, serta unsur paduan Cr, Ni, Mo, dan lain-lain.

Kekuatan baja karbon tergantung beberapa faktor, seperti kandungan karbon dan proses pengerjaan akhir (*finishing*). Ketika sejumlah karbon ditambahkan, baja menjadi *hardenable grade* dan dapat dikuatkan melalui *solid solution hardening* atau *quenching*. Jika karbon tidak mencapai jumlah yang cukup maka baja tidak merespon perlakuan panas sehingga digolongkan *non hardenable*, dimana peningkatan kekerasan dapat melalui pengerjaan dingin atau distorsi mekanik.

Baja karbon diklasifikasikan berdasarkan kandungan karbonnya menjadi baja karbon rendah, baja karbon menengah, dan baja karbon tinggi (Callister, 2001).

Baja karbon rendah (*low carbon steel*)

Baja karbon rendah umumnya mempunyai kandungan karbon kurang dari 0.25 % dan banyak digunakan untuk komponen badan mobil, rangka struktur, dan pelat lembaran untuk jaringan pipa, bangunan, dan jembatan. Struktur mikro terdiri dari ferit dan perlit, karena itu relatif lunak tetapi keuletan dan ketangguhan tinggi. Salah satu keunggulan baja karbon rendah adalah mempunyai mampu bentuk yang baik sehingga memudahkan untuk membentuk komponen-komponen melalui proses *stamping*, *pressing*, *bending*, dan sebagainya.

Baja karbon menengah (*medium carbon steel*)

Memiliki kandungan karbon antara 0.25 % sampai 0.60 %. Material dapat di *heat treatment* untuk memperbaiki sifat mekanisnya. Penambahan *chromium*, *nickel*, dan *molybdenum* memperbaiki kekuatan dan keuletan.

Baja karbon tinggi (*high carbon steel*)

Memiliki kandungan karbon antara 0.60% sampai 1.4 %, sangat keras, kuat, dan keuletan rendah. Sering digunakan pada kondisi *harden* dan *temper* khususnya pada aplikasi produk yang tahan aus. Untuk aplikasi *tool* dan *die* ditambahkan *chromium*, *vanadium*, *tungsten*, dan *molybdenum* untuk membentuk material yang keras dan tahan aus.

Baja karbon sangat banyak digunakan untuk material teknik karena tingginya rasio kekuatan terhadap biaya (*strength/cost*). Dan juga mempunyai kekakuan tinggi, dengan modulus elastisitas 30 Mpsi, membuatnya sangat menarik dalam kaitannya dengan biaya (*cost*) dan performa. Kekuatan luluh baja karbon mempunyai interval yang lebar, yaitu dari 25 hingga 180 ksi, tergantung dari perlakuan panas dan proses pengerjaan dingin dan juga kontribusi dari masing-masing unsur paduannya (Fisher, 2005).

Kekuatan luluh baja karbon batangan *mill finish* yang di *quenching* dan *tempering* biasanya di kisaran 25 hingga 90 ksi. Kekuatan tarik akan meningkat secara proporsional dengan meningkatnya kekuatan luluh sehingga memberi masukan bagi perancang (*design engineer*) ketika membuat perencanaan dengan mempertimbangkan faktor perpanjangan (*elongation*) dan reduksi area.

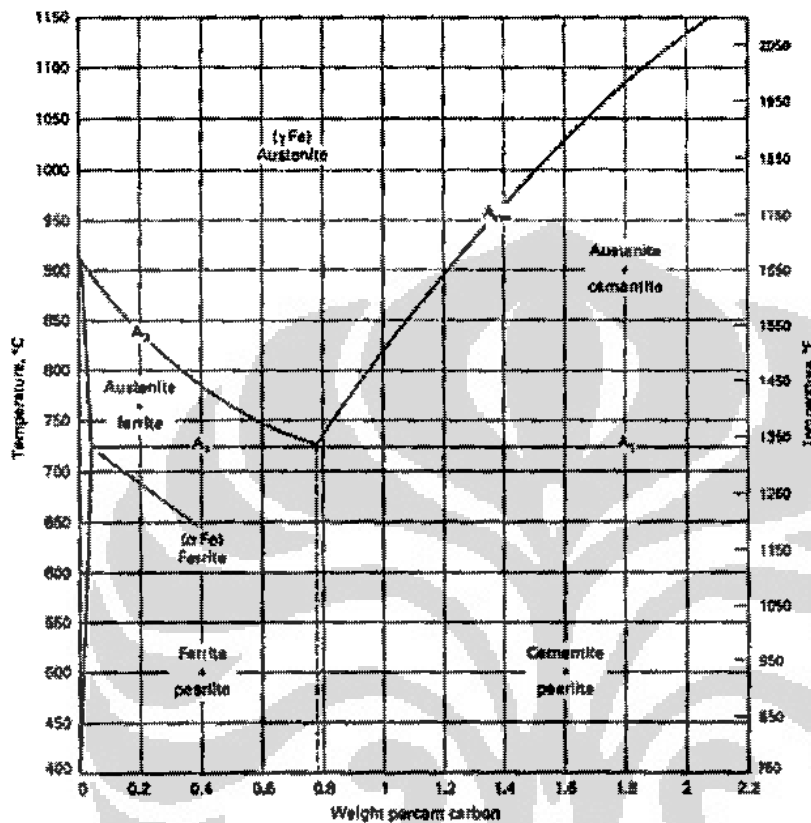
2.2.1 Diagram Fasa

Gambar 2.6 memperlihatkan diagram fasa Fe-C. Sumbu vertikal menyatakan temperatur dan sumbu horizontal menyatakan persentase kandungan karbon dari 0 hingga 2.2 % karbon.

Fasa-fasa ketika pendinginan berjalan sangat lambat, paduan Fe-C pada berbagai temperatur dan komposisi Fe dan C ditunjukkan dalam diagram fasa Fe-C. Diagram fasa tersebut menunjukkan fasa-fasa solid yaitu : α ferit, γ austenit, Fe_3C sementit.

Diagram fasa memperlihatkan bahwa pada temperatur ruang, bentuk yang stabil disebut ferit atau α yang mempunyai struktur kristal BCC. Ferit merupakan

sebuah fasa karena terdiri dari satu unsur penyusun. Pada diagram fasa Fe - C daerah dimana terdapat 100 % ferit berada disebelah kiri bawah diagram pada temperatur di bawah 912 °C.



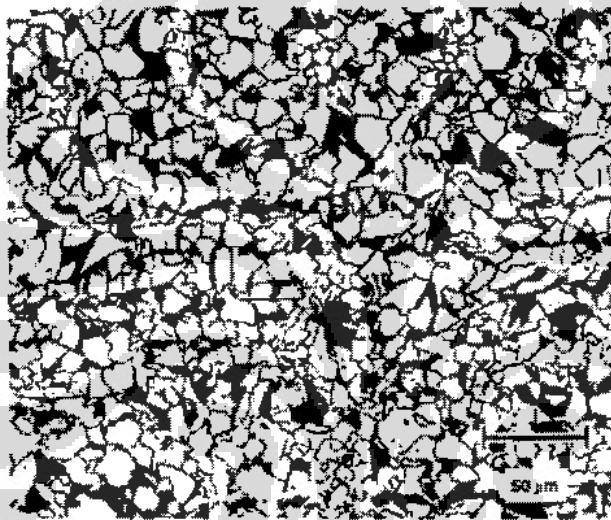
Gambar 2.6 Diagram fasa Fe - C (ASM International, Vol.9 Metallography, 2004)

Ferit mengalami transformasi menjadi FCC austenit atau γ pada temperatur 912 °C. *Interstitial solid solution* karbon dalam γ iron disebut austenit. Austenit mempunyai struktur kristal FCC dan kelarutan padat C lebih besar daripada α ferit. Kelarutan padat karbon dalam austenit maksimum 2.08 % pada temperatur 1147 °C dan menurun ke 0.77 % pada 723 °C.

Karena baja karbon mempunyai kandungan karbon besar dari 0.005 %, kelebihan karbon tampak sebagai sebuah unsur penyusun yang disebut perlit.

Kelebihan (*excess*) karbon dapat pula terlihat sebagai partikel sementit (*iron carbide*) yang umumnya ditemukan dalam baja karbon rendah.

Ferit dapat terlihat dalam bentuk atau morfologi berbeda. Pada sebagian besar produk *rolled* dan *annealed steel*, adalah berupa *equiaxed ferrite*, yaitu butiran ferit yang mempunyai dimensi hampir sama pada semua arah. Pada baja karbon, ferit adalah fasa yang dominan. Karena ferit mengandung sangat sedikit karbon, maka sangat lunak dibandingkan fasa lain.



Gambar 2.7 Struktur mikro baja karbon UNS 10150 yang menunjukkan butiran ferit dan perlit (gelap). Perbesaran 200X, etsa *piral* 4% dan *nital* 2%. [ASM International, Vol. 9 Metallography, 2004]

Sementit adalah senyawa *iron carbide* (Fe_3C) yang keras dan getas, dapat ditemukan dalam kebanyakan baja karbon rendah. Sementit tampak berbentuk partikel *spheroid* dari karbida besi dalam sebuah matriks ferit..

Perlit adalah unsur penyusun lainnya dalam baja karbon, terdiri dari dua fasa yaitu ferit dan sementit. Fasa ferit dan sementit terlihat sebagai *lamellar morphology*.

2.2.2 Ukuran Butir

Teknik metalografi optik digunakan untuk mengamati material pada skala mikro. Sehingga diperoleh berbagai informasi tentang ukuran butir, batas butir, jenis fasa, inklusi, maupun kerusakan material.

Ukuran butir berpengaruh besar pada sifat mekanik baja pada temperatur ruang. Ukuran butir yang kecil (halus) lebih diinginkan dibanding ukuran butir yang besar. Ukuran butir yang kecil akan memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi, dan mengurangi dampak distorsi ketika *quenching*, serta mengurangi kerentanan terhadap retak. Ukuran butir yang halus sangat baik untuk aplikasi *tools* dan *dies*.

Ukuran butir yang besar, pada temperatur ruang memiliki kekuatan dan kekerasan yang rendah. Dan selama proses pembentukan dapat menghasilkan permukaan yang kasar.

Pertumbuhan butir terjadi pada temperatur tinggi, namun beberapa jenis baja dapat mencapai temperatur 1800 °F dengan pertumbuhan butir yang sangat kecil (John E. Neely, Thomas J. Bertone, 2003). Ukuran butir yang bervariasi dapat dihasilkan dari jenis baja yang sama.

2.2.2.1 Metode Menentukan Ukuran Butir

Ada beberapa metode untuk menentukan ukuran butir yang diamati dibawah mikroskop. Berdasarkan standar ASTM E112 beberapa metode yang dapat dipilih adalah metode perbandingan (*comparison procedure*), *planimetric procedure* dan *Heyn lineal intercept procedure*.

Metode perbandingan (*comparison procedure*)

Metode ini dilakukan dengan membandingkan butir hasil pengamatan dengan kartu ukuran butir ASTM. Hubungan antara ukuran butir dan jumlah butir dinyatakan dengan persamaan :

$$N = 2^{G-1}$$

dimana N adalah jumlah butir dalam area 1 inch persegi pada perbesaran 100 kali dan G adalah ukuran butir berdasarkan standar ASTM.

Metode planimetri (*planimetric procedure*)

Pada *planimetric procedure*, ukuran butir ditentukan dengan menghitung jumlah butir dalam area lingkaran dengan diameter 79.8 mm (seluas 5000 mm²). Perbesaran dipilih sedemikian rupa hingga terdapat minimal 50 butir pada area lingkaran tersebut. Jumlah butir dinyatakan dengan persamaan :

$$N = f (N_{\text{inside}} + N_{\text{intercepted}}/2)$$

Dimana N adalah jumlah butir tiap milimeter persegi, f adalah faktor pengali (*Jeffries' multiplier*), N_{inside} adalah jumlah butir yang lengkap masuk kedalam area lingkaran, dan $N_{\text{intercepted}}$ adalah jumlah butir yang terpotong oleh lingkaran.

Tabel 2.1 Ukuran butir menurut standar ASTM E112

Grain Size No. G	N_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{D} Average Diameter		\bar{L} Mean Intercept	
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm
00	0.25	3.86	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0
0.5	0.71	10.06	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1
1.0	1.00	15.50	0.0646	64519	0.2540	254.0	0.2263	226.3
1.5	1.41	21.92	0.0459	45820	0.2138	213.8	0.1903	190.3
2.0	2.00	31.00	0.0323	32259	0.1796	179.6	0.1600	160.0
2.5	2.83	43.84	0.0228	22819	0.1510	151.0	0.1345	134.5
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1
4.0	8.00	124.00	0.00805	8065	0.0889	88.9	0.0800	80.0
4.5	11.31	175.30	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3
5.0	16.00	246.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0588	58.8
5.5	22.63	350.73	0.00289	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6
6.0	32.00	490.00	0.00202	2010	0.0449	44.9	0.0400	40.0
6.5	45.25	701.43	0.00143	1420	0.0375	37.5	0.0330	33.0
7.0	64.00	992.00	0.00101	1009	0.0318	31.8	0.0283	28.3
7.5	89.51	1403.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8
8.0	128.00	1924.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0
8.5	181.02	2695.6	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8
9.0	250.00	3968.0	0.00025	252	0.0158	15.8	0.0141	14.1
9.5	342.04	5611.8	0.00018	179	0.0133	13.3	0.0119	11.9
10.0	512.00	7939.0	0.00013	129	0.0112	11.2	0.0100	10.0
10.5	724.08	11223.2	0.00009	90.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	6.0
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0
12.5	2898.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2
13.0	4098.00	63408.1	0.000016	16.6	0.0040	4.0	0.0036	3.5
13.5	5792.82	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5

Metode perpotongan (*intercept procedure*)

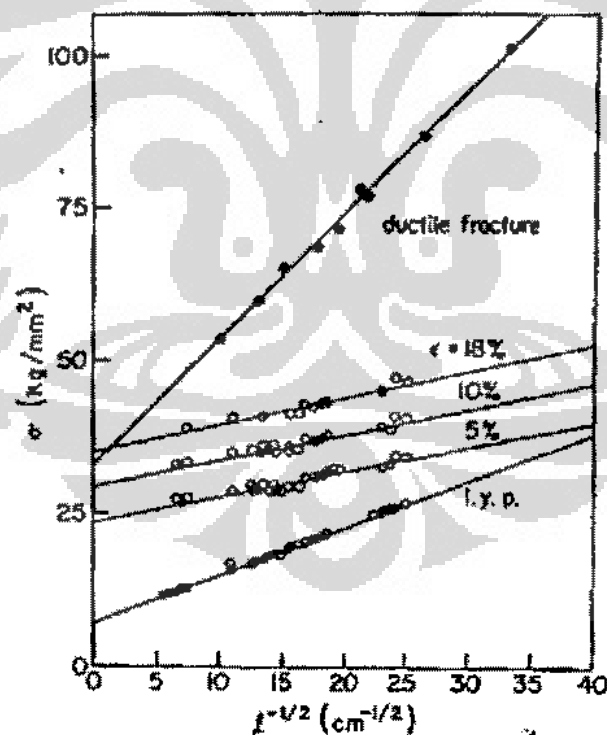
Pada metode ini, ukuran butir dihitung dengan menghitung jumlah butir atau batas butir yang berpotongan dengan panjang garis sembarang yang diketahui. Pada satu atau lebih garis lurus tersebut minimal terdapat 50 perpotongan (*intercept*).

2.2.2.2 Hubungan Kekuatan dengan Ukuran Butir

Hubungan antara kekuatan luluh (σ_y) dengan ukuran butir (d) dinyatakan oleh persamaan Hall-Petch sebagai berikut.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

dimana σ_0 dan k_y adalah konstanta dari hasil eksperimen yang tergantung jenis material. Persamaan diatas menunjukkan bahwa semakin besar ukuran butir maka kekuatan luluh (σ_y) makin tinggi.



Gambar 2.8 Pengaruh ukuran butir pada kekuatan baja karbon rendah (Krauss, 2005)

Pada baja karbon, σ_0 dan k_y sering diambil dari tegangan friksi (*friction stress*) pergerakan dislokasi dalam kristal tunggal (*single crystal*) ferit. Gambar 2.8 menunjukkan grafik dari persamaan Hall-Petch untuk *lower yield strength*, aliran tegangan pada beberapa regangan dan kekuatan patah ulet sebagai fungsi ukuran butir ferit pada baja karbon rendah. Semua parameter kekuatan (*strength*) berbanding terbalik dengan nilai akar ukuran butir (d).

Ada beberapa penjelasan tentang efek ukuran butir pada kekuatan material. Makin besar ukuran butir maka memungkinkan adanya konsentrasi dislokasi yang lebih besar pada batas butir dan menimbulkan tegangan yang lebih tinggi untuk pergerakan dislokasi di batas butir. Makin halus ukuran butir, fraksi struktur mikro makin besar yang dipengaruhi oleh fenomena batas butir, dan makin tinggi tegangan untuk mengaktifasi pergerakan dislokasi.

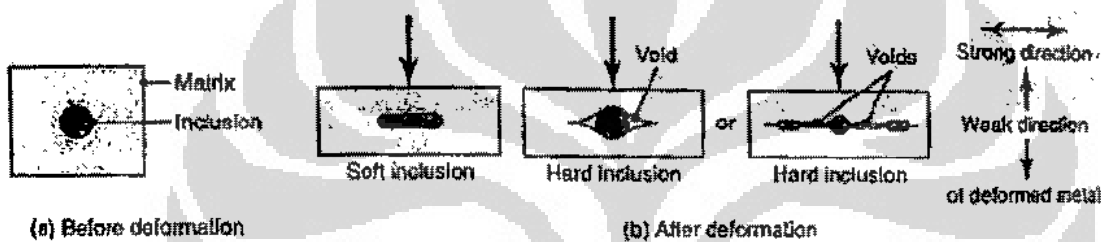
Ukuran butir yang halus juga akan meningkatkan kekuatan patah ulet. Dalam prakteknya, penghalusan ukuran butir menjadi mekanisme untuk meningkatkan kekuatan dan ketangguhan.

2.2.3 Inklusi

Inklusi adalah fasa *non-metallic* yang berpengaruh penting pada patah ulet. Inklusi terdiri dari berbagai jenis unsur pengotor (*impurities*) dan partikel fasa kedua seperti oksida, karbida, dan sulfida. Besarnya pengaruh inklusi tergantung faktor-faktor seperti bentuk, kekerasan, distribusi dan fraksi atau persentase terhadap volume keseluruhan. Inklusi muncul ketika proses pembuatan dan pemurnian baja, perpindahan antar *vessel* yang berisi baja cair, coran, dan endapan dalam baja padat. Inklusi dapat dihasilkan dari reaksi dalam proses pembekuan baja yang dikenal dengan *indigenous inclusions*, atau dapat disebabkan karena beberapa partikel kotoran (*slag*), *refractories*, atau material lain yang masuk ke baja cair yang disebut *exogenous inclusions* (Krauss, 2005).

Void dan *porosity* dapat berkembang selama proses pembuatan material akibat proses pengecoran dan pembentukan. Ada 2 faktor yang mempengaruhi pembentukan *void* (Kalpakjian, 2006).

- a). Kekuatan ikatan antarmuka antara inklusi dan matriks. Jika ikatannya kuat, kurang kecenderungan untuk pembentukan *void* selama deformasi plastis.
- b). Kekerasan inklusi. Jika lunak seperti MnS maka bentuk keseluruhan berubah mengikuti deformasi plastis. Jika keras seperti oksida dan karbida, dapat menimbulkan *void*. Pada inklusi keras, karena getas dapat hancur menjadi partikel-partikel kecil selama deformasi.



Gambar 2.9 Pengaruh inklusi lunak dan keras pada pembentukan void selama deformasi plastis (Kalpakjian, 2006).

Inklusi yang tinggi mengurangi keuletan dan ketangguhan. Sifat mekanik tergantung bentuk inklusi yang menyebabkan material menjadi *anisotropy*. Sifat mekanik arah pengerolan pada pelat baja karbon akan berbeda dengan arah tegak lurus pengerolan.

Inklusi oksida berbentuk *spherical particles* atau berbentuk *dendrites*. Oksida lebih keras dibandingkan matriks baja dan selama pengerjaan panas akan hancur. Tetapi juga mungkin partikel oksida yang keras tersebut tidak mengalami deformasi selama pengerjaan panas sehingga dapat menyebabkan retak dalam bentuk celah konis (*conical gap*) pada antarmuka inklusi-matriks.

Umumnya unsur Mn ditambahkan ke dalam baja, dan kemudian terbentuk partikel mangan sulfida (MnS). MnS dalam baja memiliki bentuk yang bermacam-

macam, mulai dari bentuk bulat hingga bentuk sudut yang tak beraturan. MnS terbentuk tidak sendirian, tetapi kadang-kadang bersama dengan unsur lainnya. Tanpa unsur Mn yang cukup, sulfur akan membentuk FeS yang akan mengakibatkan rendahnya temperatur lebur (*melting point*) dan dapat menyebabkan retak selama deformasi plastis.

Partikel mangan sulfida (MnS) mempunyai plastisitas dan elongasi yang tinggi selama pengerjaan panas. Gambar 2.10 menunjukkan kelompok partikel MnS pada bagian *longitudinal* material baja karbon, sehingga menyebabkan *anisotropy* pada sifat mekanik material. Partikel mangan sulfida dapat larut pada temperatur tinggi dan mengendap kembali selama pendinginan yang mengakibatkan menurunnya ketangguhan.

Morfologi MnS terbagi atas 3 tipe, yaitu tipe I *globular*, tipe II *dendritic*, dan tipe III *irregular*. MnS sebagai fasa inklusi sangat mudah terlihat melalui pengamatan dengan mikroskop optik. Mn terlihat berwarna abu-abu terang, dan sedikit transparan (R. Kiessling, N. Lange, 1978). Deformasi pada baja biasanya karena fasa MnS memanjang searah dengan arah pengerjaan pada material. Inklusi MnS ditemukan di hampir semua baja dan mempunyai kontribusi dalam memperbaiki mampu mesin material.



Gambar 2.10 Inklusi MnS pada baja karbon rendah, permukaan polish, perbesaran 500X (Krauss, 2005)

Morfologi dan distribusi inklusi MnS akan berpengaruh pada sifat mekanik material sehingga penting untuk diketahui. Pengamatan morfologi MnS pada baja karbon rendah standar DIN C10, menunjukkan bahwa pada temperatur 1100 hingga 1400 °C morfologi MnS tidak jauh berbeda (H. Avdusinovic, A. Gigovic, 2005).

Dalam penelitian N. Wolanska & A.K. Lis (2007) tentang inklusi *non-metallic* pada permukaan sampel baja karbon rendah, pengujian komposisi kimia pada inklusi melalui analisa EDX menunjukkan inklusi mempunyai ukuran yang bervariasi dari 0.6 hingga 4µm, sebagian besar adalah MnS dengan bentuk bulat dan SiO₂ dalam berbagai bentuk. Selain itu juga terdapat unsur-unsur lain secara bersamaan seperti MnO dan Al₂O₃ (p. 292).

Gambar 2.11 menunjukkan inklusi MnS dengan unsur lain seperti Al dan Si (1). Terdapat *silicate oxide* dengan diameter 0.65 µm dalam butir ferit (2) dan tidak ada kekosongan (*void*) di sekitar daerah inklusi. Inklusi MnS dengan beberapa *silicate oxide* berdiameter 1.3 µm terjadi pada batas butir didalam *void* sepanjang 4µm (3).



Gambar 2.11 Inklusi MnS pada sampel yang mengalami deformasi temperatur 900 °C (N. Wolanska, A.K Lis, 2007)

2.2.4 Karakterisasi Temperatur Tinggi

Kenaikan temperatur akan menurunkan kekuatan material dan meningkatkan keuletan yang merupakan pengaruh temperatur pada deformasi material. Keuletan baja karbon dapat diukur dari persentase reduksi area (% RA) atau persentase perpanjangan (% EL) hasil pengujian tarik temperatur tinggi. Kurva %RA – T atau %EL – T menunjukkan karakterisasi keuletan material sebagai fungsi temperatur.

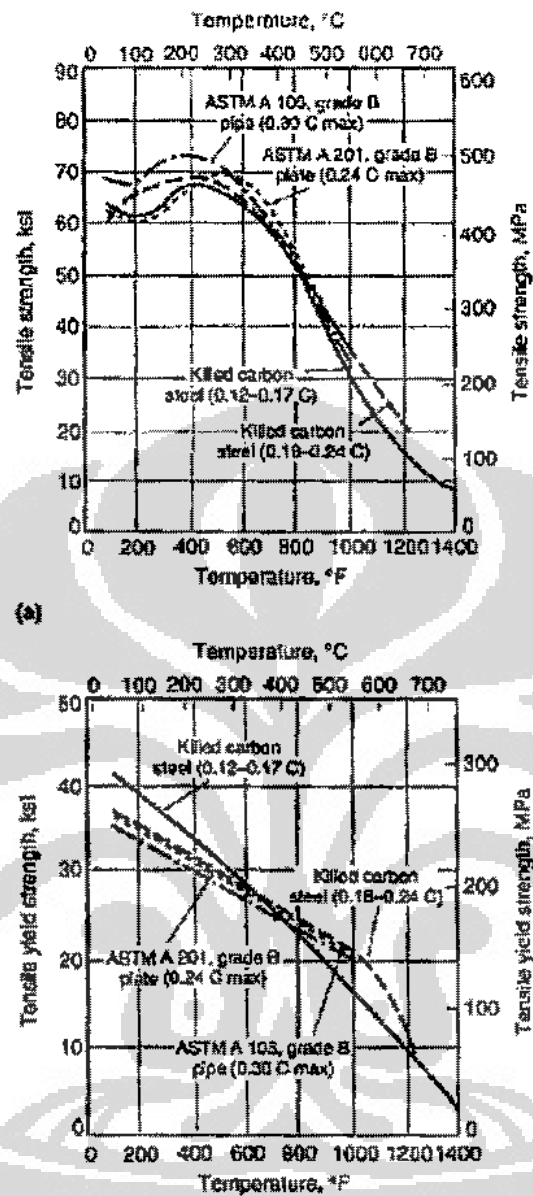
Kekuatan tarik, kekuatan luluh, perpanjangan, dan reduksi area adalah parameter yang sangat penting dalam deformasi plastis. Sifat-sifat produk pembentukan panas tergantung pada perubahan struktur mikro setelah pemanasan. Deformasi struktur mikro dapat diamati melalui mikroskop optik atau SEM untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap deformasi plastis.

Persentase reduksi area (% RA) baja karbon rendah 1008 pada temperatur hingga 750 °C dapat mencapai 60-70 % dan pada temperatur diatas 1000 °C mencapai 70-80 %. Pada temperatur 700 °C dan 800 °C terdapat fasa ferit pada struktur mikro selama proses deformasi. Keuletan meningkat melalui kontribusi fraksi volume ferit (N. Wolanska, A.K. Lis, 2007).

Pada temperatur ruang, deformasi plastis terjadi melalui proses dislokasi, dimana pergerakan bidang-bidang kristal terjadi melalui luncuran dislokasi. Batas butir berperan sebagai penghambat pergerakan dislokasi, mengakibatkan terjadi penumpukan dislokasi. Penumpukan ini menyebabkan peningkatan konsentrasi tegangan yang dikenal dengan *strain hardening*.

Pada temperatur rendah, ukuran butir yang halus efektif menghambat dislokasi, tetapi pada temperatur tinggi, tidak efektif menghambat dislokasi karena fenomena *creep*. *Strain hardening* dieliminasi pada temperatur tinggi ketika kristal-kristal bergerak membentuk konfigurasi baru yang dikenal sebagai proses *recovery*.

Gambar 2.12 memperlihatkan hubungan antara kenaikan temperatur dan kekuatan tarik dan luluh material baja karbon. Dari grafik terlihat bahwa kekuatan tarik dan luluh turun dengan peningkatan temperatur.



Gambar 2.12 Pengaruh temperatur pada kekuatan tarik dan luluh baja karbon (ASM International, Vol.8 Mechanical Testing, 2000)

2.3 BAJA KARBON STANDAR ASTM A36

Baja karbon (*carbon steel*) memiliki banyak tipe, baik itu berasal dari standar JIS, DIN maupun ASTM. Salah satu baja karbon yang sangat sering digunakan pada aplikasi struktural (jembatan dan gedung) adalah baja karbon ASTM A36. Baja

karbon ini memiliki keuletan dan kekuatan yang baik. Tabel 2.2 memperlihatkan perbandingan sifat mekanik beberapa jenis material *low carbon steel*, *high strength*, dan *low alloy steel*.

Tabel 2.2 Perbandingan karakteristik mekanik material *low carbon steel*, *high strength*, dan *low alloy steel* (Callister, 2001).

<i>AISI/SAE or ASTM Number</i>	<i>Tensile Strength [MPa (ksf)]</i>	<i>Yield Strength [MPa (ksf)]</i>	<i>Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]</i>	<i>Typical Applications</i>
<i>Plain Low-Carbon Steels</i>				
1010	325 (47)	180 (26)	28	Automobile panels, nails, and wire
1020	380 (55)	205 (30)	25	Pipe; structural and sheet steel
A36	400 (58)	220 (32)	23	Structural (bridges and buildings)
A516 Grade 70	485 (70)	260 (38)	21	Low-temperature pres- sure vessels
<i>High-Strength, Low-Alloy Steels</i>				
A440	435 (63)	290 (42)	21	Structures that are bolted or riveted
A633 Grade E	520 (75)	380 (55)	23	Structures used at low ambient temperatures
A656 Grade 1	655 (95)	552 (80)	15	Truck frames and rail- way cars

2.3.1 Komposisi Kimia

Karbon dengan konsentrasi maksimum 0.26 % - 0.29 % merupakan unsur paduan utama dalam baja karbon ASTM A36. Unsur karbon ini memberikan kontribusi pada sifat keras dan kuat, tetapi disaat yang sama juga menghasilkan sifat getas.

Pada baja karbon ASTM A36 terdapat pula sejumlah kecil unsur pengikat seperti *manganese* (Mn), *phosphorus* (P), *sulfur* (S), dan *silicon* (Si). Jumlah kandungan masing masing unsur dapat dilihat pada Tabel.2.3.

Tabel 2.3 Komposisi kimia baja karbon standar ASTM A36

Produk	Batangan			
	kurang dari 3/4" (20 mm)	antara 3/4" sampai 1 1/2" (20 - 40 mm)	antara 1 1/2" sampai 4" (40 - 100 mm)	lebih dari 4" (100 mm)
Carbon, maks. %	0.26	0.27	0.28	0.29
Manganese, %	...	0.60 - 0.90	0.60 - 0.90	0.60 - 0.90
Phosphorus, %	0.04	0.04	0.04	0.04
Sulfur, maks. %	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicon, maks. %	0.40	0.40	0.40	0.40

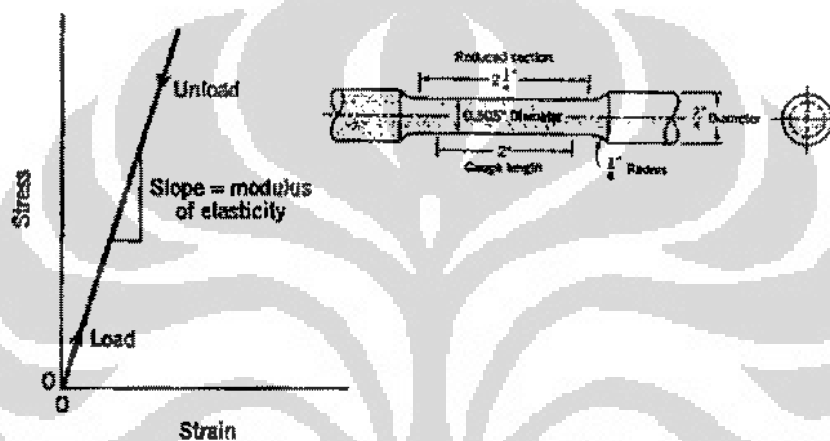
Pengaruh masing-masing unsur pada baja karbon ASTM A36 adalah sebagai berikut :

- Carbon (C)** : Memperbaiki mampu keras, kekuatan, kekerasan dan ketahanan aus. Mengurangi keuletan dan ketangguhan.
- Manganese (Mn)** : Memperbaiki mampu keras, kekuatan, ketahanan abrasi (*abrasion resistance*) dan mampu mesin. Mengurangi mampu las.
- Sulfur (S)** : Memperbaiki mampu mesin ketika bergabung dengan Mn. Mengurangi kekuatan *impact* dan keuletan, mengurangi kualitas permukaan material. Jika kekurangan Mn, sulfur akan bereaksi dengan Fe di batas butir, hal ini akan berpotensi menimbulkan retak ketika ada pembebanan.
- Phosphorus (P)** : Memperbaiki kekuatan, mampu keras, ketahanan korosi, dan mampu mesin. Mengurangi keuletan dan ketangguhan. Membentuk senyawa Fe_3P yang getas.
- Silicon (Si)** : Memperbaiki kekuatan, kekerasan, ketahanan korosi, dan penghantar listrik (*electrical conductivity*). Mengurangi mampu mesin dan mampu bentuk pada pengerjaan dingin.

2.3.2 Sifat-sifat Mekanik

Sifat-sifat mekanik material menggambarkan hubungan antara deformasi atau respon terhadap kondisi dibawah pembebanan. Sifat-sifat mekanik yang penting meliputi kekuatan (*strength*), kekerasan (*hardness*), keuletan (*ductility*), dan kekakuan (*stiffness*).

Pengujian tarik di daerah deformasi elastis terlihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Grafik tegangan (*stress*) vs regangan (*strain*) di daerah elastis pada pengujian tarik

Deformasi yang terjadi dimana tegangan dan regangan berbanding lurus (proporsional) disebut daerah deformasi elastis. Sedangkan kemiringan (*slope*) di daerah deformasi elastis menunjukkan modulus elastisitas (modulus Young). Modulus elastisitas (E) menggambarkan besaran kekakuan atau ketahanan material terhadap deformasi elastis. Deformasi elastis ini bersifat *non-permanent*, artinya material akan kembali ke bentuk semula ketika beban dilepaskan.

Apabila beban berlanjut, akan terjadi deformasi plastis yang sifatnya *permanent*, artinya material tidak dapat kembali ke bentuk semula meski beban telah dilepaskan. Mekanisme deformasi plastis dapat berupa tergelincirnya (*slippage*)

kristal-kristal melalui pergerakan dislokasi sepanjang bidang luncuran, atau dapat juga melalui mekanisme kembaran (*twinning*)

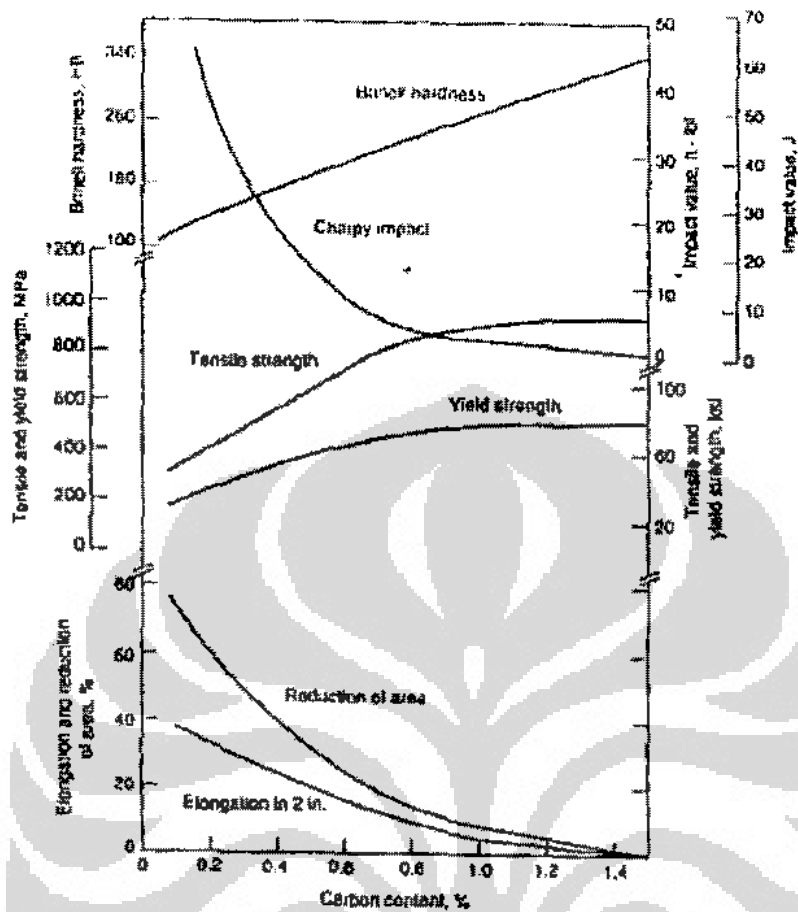
Tabel 2.4 menunjukkan sifat-sifat mekanik baja karbon ASTM A36. Data secara spesifik menunjukkan karakteristik kekuatan tarik (*tensile strength*), titik luluh (*yield point*) dan pertambahan panjang (*elongation*) material tersebut.

Tabel. 2.4 Sifat mekanik baja karbon standar ASTM A36.

Pelat, Profil, Batangan :	
<i>Tensile strength</i> , ksi (MPa)	58-80 (400-550)
<i>Yield point</i> , ksi (MPa)	36 (250)
Pelat dan Batangan :	
<i>Elongation</i> dalam 8" (200 mm), min, %	20
<i>Elongation</i> dalam 2" (50 mm), min, %	23
Profil :	
<i>Elongation</i> dalam 8" (200 mm), min, %	20
<i>Elongation</i> dalam 2" (50 mm), min, %	21

Sifat sifat mekanik baja karbon dipengaruhi oleh komposisi kimia dan struktur mikronya. Unsur karbon sangat berpengaruh pada kekuatan tarik, kekuatan luluh, kekerasan, dan perpanjangan (*elongation*) Semakin tinggi unsur karbon, maka semakin tinggi kekuatan tarik, kekuatan luluh, kekerasan, tetapi *elongation* akan turun seperti terlihat pada Gambar 2.14.

Sangat penting untuk dipertimbangkan besaran titik luluh (*yield point*) 250 MPa dan perpanjangan (pada panjang ukur 50 mm) 23 % ketika dilakukan proses pembentukan pada material baja karbon ASTM A36. Tetapi besaran tersebut adalah pada kondisi temperatur ruang. Tentu akan diperoleh nilai yang berbeda ketika dilakukan pengujian pada temperatur tinggi.

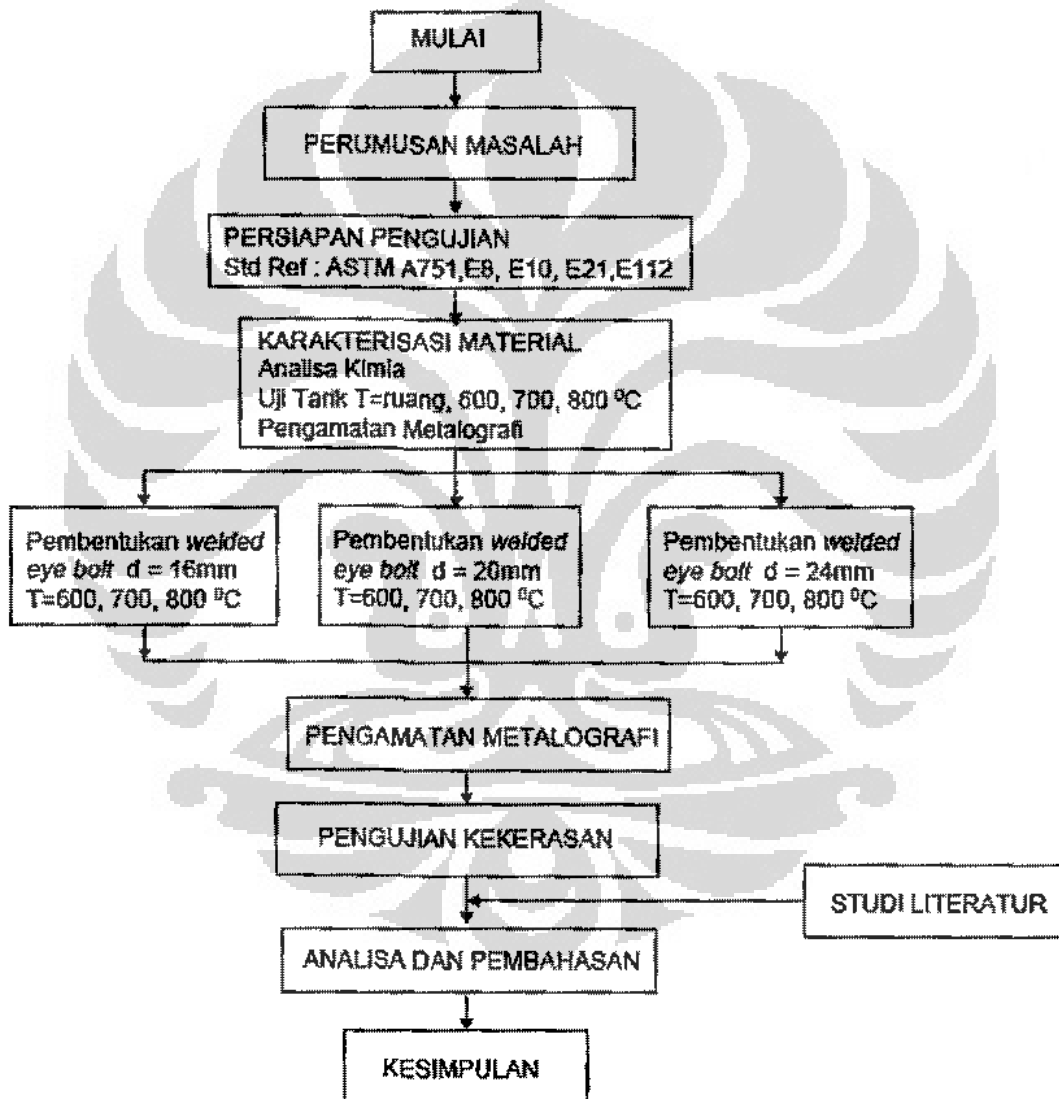


Gambar 2.14 Pengaruh unsur karbon pada baja

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Diagram alir penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 BAHAN

Untuk keperluan karakterisasi bahan (pengujian komposisi kimia, pengujian tarik, pengujian kekerasan, dan pengujian metalografi), maka dipersiapkan bahan baja karbon batangan standar ASTM A36.

Tabel 3.1 menunjukkan komposisi kimia standar ASTM A36 dibandingkan dengan komposisi kimia berdasarkan data *mill certificate* yang diperoleh dari pemasok (*supplier*).

Tabel 3.1 Perbandingan data komposisi kimia bahan berdasarkan standar ASTM A36 dan *mill certificate*

Referensi	Karbon (C, % maks)	Mangan (Mn, %)	Phospor (P, % maks)	Sulfur (S, % maks)	Silikon (Si, % maks)
Standar ASTM A36	0.27	0.60 - 0.90	0.04	0.05	0.40
<i>Mill Certificate</i>	0.18	0.66	0.011	0.024	0.27

a) Bahan uji karakterisasi, terdiri dari :

Sampel uji komposisi kimia :

Jumlah sampel 1 buah, berukuran \varnothing 24 x 10 mm.

Sampel uji tarik temperatur ruang :

Jumlah sampel 3 buah, berukuran sesuai standar ASTM E8.

Sampel uji tarik temperatur 600 °C :

Jumlah sampel 3 buah, berukuran sesuai standar ASTM E8.

Sampel uji tarik temperatur 700 °C :

Jumlah sampel 3 buah, berukuran sesuai standar ASTM E8.

Sampel uji tarik temperatur 800 °C :

Jumlah sampel 3 buah, berukuran sesuai standar ASTM E8.

Sampel uji metalografi :

Jumlah sampel 1 buah, berukuran \varnothing 24 x 10 mm

Tabel 3.2 Standard benda uji tarik menurut ASTM E8.

	Ukuran Standar (<i>standard specimen</i>)	Ukuran kecil (<i>small size specimens proportional to standard</i>)			
	<i>inch</i>	<i>inch</i>	<i>inch</i>	<i>inch</i>	<i>inch</i>
Diameter	0.500	0.350	0.250	0.160	0.113
G - panjang ukur (<i>gage length</i>)	2.000 +/- 0.005	1.400 +/- 0.005	1.000 +/- 0.005	0.640 +/- 0.005	0.450 +/- 0.005
D - diameter	0.500 +/- 0.010	0.350 +/- 0.007	0.250 +/- 0.007	0.160 +/- 0.003	0.113 +/- 0.002
R - jari-jari radius	3/8	1/4	3/16	5/32	3/32
A - panjang reduksi area	2 1/4	1 1/4	1 1/4	3/4	5/8

b) Bahan uji pembentukan terdiri dari :

Sampel uji pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C

Jumlah sampel untuk masing-masing temperatur adalah 3 buah.

Ukuran sampel berdiameter 16, 20, 24 mm dan panjang 500 mm.

c) Bahan uji metalografi dan kekerasan merupakan cuplikan sampel hasil pembentukan, dengan ukuran sebagai berikut :

Sampel P1 : ukuran Ø16 x 10 mm, hasil pembentukan temperatur 600 °C

Sampel K1 : ukuran Ø16 x 10 mm, hasil pembentukan temperatur 700 °C

Sampel M1 : ukuran Ø16 x 10 mm, hasil pembentukan temperatur 800 °C

Sampel P2 : ukuran Ø20 x 10 mm, hasil pembentukan temperatur 600 °C

Sampel K2 : ukuran Ø20 x 10 mm, hasil pembentukan temperatur 700 °C

Sampel M2 : ukuran Ø20 x 10 mm, hasil pembentukan temperatur 800 °C

Sampel P3 : ukuran Ø24 x 10 mm, hasil pembentukan temperatur 600 °C

Sampel K3 : ukuran Ø24 x 10 mm, hasil pembentukan temperatur 700 °C

Sampel M3 : ukuran Ø24 x 10 mm, hasil pembentukan temperatur 800 °C

3.3 PERALATAN

Peralatan yang digunakan untuk proses pengujian adalah sebagai berikut.

Peralatan untuk pembentukan (*forming*).

- a. Blok pembentuk
- b. Pipa penyambung
- c. Oksigen dan gas *acetylene*
- d. *Torch*
- e. Alat ukur temperatur infra merah (*infra red thermometer*)

Menggunakan *infra red thermometer* IRtek IR100e yang mampu mengukur temperatur dari -25°C hingga 1000°C .

- f. Alat pengukur waktu (*stopwatch*)
- g. Sarung tangan pelindung panas

Peralatan untuk pengujian.

- a. Mesin uji tarik & dapur pemanas.

Alat yang digunakan adalah mesin uji tarik Shimadzu yang mempunyai kapasitas 20 ton dengan tambahan dapur pemanas (*small furnace*) untuk pengujian tarik temperatur tinggi.

- b. Alat uji komposisi kimia (*optical emission spectrometer*).
- c. Mikroskop optik.
- d. Alat uji SEM (*scanning electron microscope*).
- e. Alat uji kekerasan.
- f. Alat ukur *digital caliper*.

3.4 KARAKTERISASI MATERIAL

Pengujian karakterisasi material adalah untuk mengetahui sifat-sifat bahan dasar yang digunakan. Pengujian ini meliputi uji komposisi kimia, uji tarik, dan pengamatan struktur mikro.

3.4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian dilakukan dengan alat uji *optical emission spectrometer* dan menggunakan standar pengujian ASTM A751. Pengujian bertujuan untuk mengetahui komposisi kimia material. Sifat-sifat material dipengaruhi oleh unsur-unsur kimia penyusunnya.

3.4.2 Pengujian Tarik

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh informasi kekuatan tarik, kekuatan luluh, perpanjangan, dan reduksi area pada temperatur ruang dan temperatur tinggi. Pengujian dilakukan berdasarkan standar ASTM E8 dan ASTM E21.

Pengujian tarik pada $T_0 =$ temperatur ruang, $T_1 = 600$ °C, $T_2 = 700$ °C, dan $T_3 = 800$ °C, dilakukan dengan 3 benda uji pada masing-masing temperatur. Benda uji diberi identifikasi atau kode sebagai berikut :

Sampel T_{0-1} , T_{0-2} , T_{0-3} untuk uji tarik temperatur ruang.

Sampel T_{1-1} , T_{1-2} , T_{1-3} untuk uji tarik temperatur 600 °C.

Sampel T_{2-1} , T_{2-2} , T_{2-3} untuk uji tarik temperatur 700 °C.

Sampel T_{3-1} , T_{3-2} , T_{3-3} untuk uji tarik temperatur 800 °C.

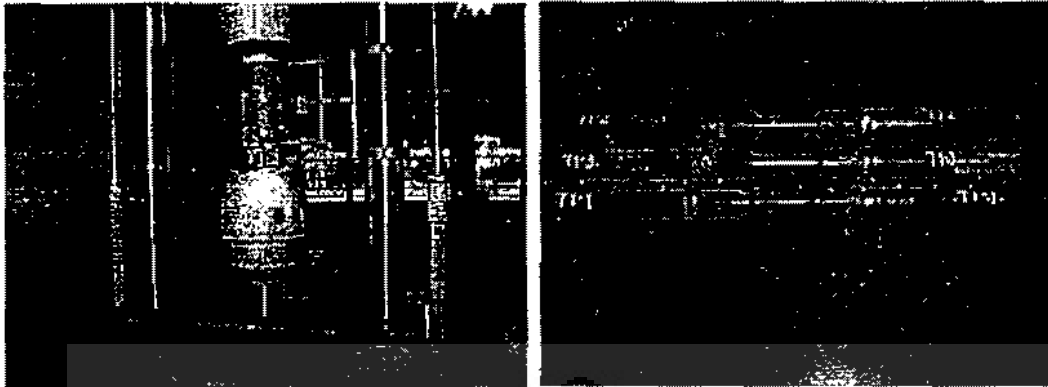
Hasil pengujian tarik menampilkan grafik hubungan antara beban (P) sebagai fungsi pertambahan panjang (ΔL). Dari nilai beban (P), luas penampang benda uji (A_0), dan pertambahan panjang (ΔL) dapat diperoleh nilai tegangan (σ) dan regangan (ε) akibat pembebanan, yaitu :

$$\sigma = P / A_0$$

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

Proyeksi tegangan dan regangan pada suatu grafik akan menghasilkan grafik tegangan – regangan yang menggambarkan sifat mekanik benda uji.

Untuk keperluan uji tarik temperatur tinggi, bagian pegangan (*grip*) benda uji dibuat lebih panjang untuk mengakomodasi total panjang minimal yang dibutuhkan 500 mm agar pegangan benda uji berada diluar dapur pemanas (*furnace*).



Gambar 3.2 Mesin uji tarik dan benda uji tarik temperatur tinggi

Pada uji tarik temperatur tinggi, mula-mula dapur pemanas dipasang di mesin uji tarik. Kemudian benda uji dipasang atau di jepit pada grip pemegang benda uji, sedemikian hingga penempatan benda uji berada tepat ditengah-tengah dapur pemanas. Peralatan *thermocouple* yang disiapkan pada dapur pemanas akan mengindasikan temperatur dalam dapur pemanas. Bagian atas dan bawah dapur pemanas yang masih menyisakan celah lalu ditutup dengan *glass wool* untuk meminimalkan panas yang hilang saat pengujian. Kemudian proses pemanasan dimulai hingga mencapai temperatur pengujian, yaitu masing-masing pada temperatur 600, 700, dan 800 °C. Kecepatan pemanasan rata-rata dari temperatur ruang hingga temperatur pengujian (600, 700, 800 °C) adalah 15 °C/menit. Benda uji ditahan selama 5 menit (*holding time*) pada temperatur uji sebelum ditarik.

3.5 PROSES PEMBENTUKAN

Proses pembentukan dilakukan pada beberapa temperatur untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap hasil pembentukan. Proses pembentukan *welded eye bolt* dilakukan pada kondisi berikut :

- a). Ukuran benda kerja = diameter 16 mm x panjang 500 mm
 Temperatur pembentukan (T) = 600, 700, dan 800 °C

- b). Ukuran benda kerja = diameter 20 mm x panjang 500 mm
Temperatur pembentukan (T) = 600, 700, dan 800 °C
- c). Ukuran benda kerja = diameter 24 mm x panjang 500 mm
Temperatur pembentukan (T) = 600, 700, dan 800 °C

Material yang digunakan adalah baja karbon batangan ASTM A36. Batangan baja karbon tersebut dipotong menggunakan mesin *bandsaw* sesuai dengan ukuran diatas. Kemudian beberapa peralatan pendukung disiapkan, yaitu blok pembentuk, pipa pemegang, *burner*, termometer infra merah, dan *stopwatch*.

Mula-mula material dipanaskan dengan menggunakan *burner* yang terdiri dari oksigen, gas *acetylene* dan *torch* hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Temperatur perlakuan dikontrol dengan menggunakan termometer infra merah, yang "ditembakkan" di sekitar 5 titik pada area yang di panaskan.



Gambar 3.3 Penggunaan *infra red thermometer* untuk mengontrol temperatur selama proses pembentukan

Ketika temperatur mencapai titik yang diinginkan, lalu ditahan 5 menit untuk memberi kesempatan agar temperatur bagian luar dan dalam sama, sebelum dilakukan proses pembentukan. Pembentukan dilakukan secara manual (dengan

tenaga operator). Pada bagian pegangan operator, baja batangan disambung dengan pipa baja untuk memudahkan ketika proses pembentukan. Setelah proses pembentukan selesai, *welded eye bolt* didinginkan di udara.

Dari hasil pembentukan, diambil sampel untuk pengujian yang meliputi :

- a. Pengamatan metalografi (mikroskop optik, SEM, EDX)
- b. Pengujian kekerasan (kekerasan Brinell)
- c. Pengukuran reduksi area (%RA)

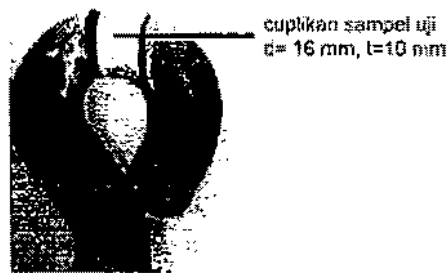
3.6 PENGAMATAN METALOGRAFI

Pengamatan metalografi bermanfaat untuk mengetahui jenis dan jumlah / distribusi struktur mikro yang menjadi salah satu alat dalam kontrol kualitas material, karena sifat material sangat dipengaruhi oleh struktur mikronya.

Pada penelitian ini, pengamatan metalografi bertujuan untuk :

- 1). Untuk mengetahui komposisi struktur mikro
- 2). Untuk mengetahui ukuran butir
- 3). Untuk mengetahui jenis fasa
- 4). Untuk mengetahui terdapatnya inklusi

Setelah proses pembentukan panas, benda uji dipotong melintang untuk memperoleh cuplikan sampel. Cuplikan sampel pada masing-masing produk hasil pembentukan diambil dibagian "kepala" *welded eye bolt* seperti terlihat pada Gambar 3.4. Dasar pemilihan area pengamatan ini adalah karena merupakan daerah kritis yang mengalami deformasi ekstrim. Ukuran cuplikan sampel adalah diameter sesuai diameter benda uji dengan tebal 10 mm.



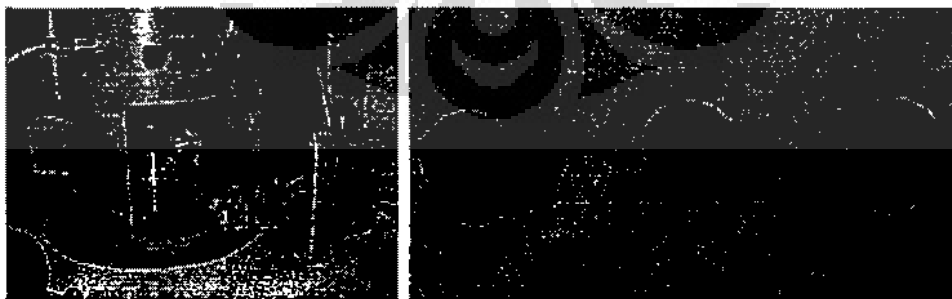
Gambar 3.4 Cuplikan sampel pengamatan metalografi

Tahapan persiapan sampel untuk pengujian adalah sebagai berikut :

- 1). Pemotongan sampel
- 2). Gerinda (amplas)
- 3). Pemolesan
- 4). Etsa nital 2%
- 5). Pengamatan dengan *scanning electron microscope* (SEM)

Kemudian pada cuplikan sampel tersebut dilakukan pengamatan struktur mikro untuk mengetahui fasa dan besar butir. Pengamatan metalografi dilakukan dengan bantuan mesin uji SEM. Tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh temperatur pembentukan 600, 700, 800 °C terhadap perubahan struktur mikro.

Untuk mengetahui terdapatnya inklusi, pengamatan dilakukan dengan mikroskop optik (perbesaran 500X, tanpa etsa). Selanjutnya untuk mengetahui jenis unsur yang terdapat pada inklusi maka dilakukan pengujian EDX.



Gambar 3.5 Cuplikan sampel pada mesin uji SEM (kiri) dan cuplikan sampel temperatur pembentukan 600, 700, 800 °C (kanan)

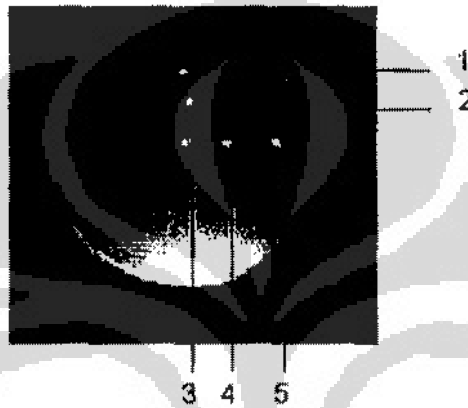
3.7 PENGUJIAN KEKERASAN

Pengujian kekerasan dilakukan menurut standar ASTM E10 yang merupakan metode pengujian kekerasan Brinell pada material logam. Menggunakan indenter baja berbentuk bola yang ditekan pada permukaan benda uji. Ukuran penjejakan kemudian diukur dengan mikroskop berskala. Tabel 3.3 menunjukkan ukuran indenter dan beban yang diberikan menurut standar ASTM E10.

Tabel 3.3 Kondisi pengujian kekerasan berdasarkan standar ASTM E10

Hardness Symbol	Ball Diameter D , mm	$0.102 F$ D^2	Test Force F Nominal Value	
HBW 10/3000	10	30	29.42	kN - (3000 kgf)
HBW 10/1500	10	15	14.71	kN - (1500 kgf)
HBW 10/1000	10	10	9.807	kN - (1000 kgf)
HBW 10/500	10	5	4.903	kN - (500 kgf)
HBW 10/250	10	2.5	2.452	kN - (250 kgf)
HBW 10/125	10	1.25	1.226	kN - (125 kgf)
HBW 10/100	10	1	98.07	N - (100 kgf)
HBW 5/750	5	30	7.355	kN - (750 kgf)
HBW 5/250	5	10	2.452	kN - (250 kgf)
HBW 5/125	5	5	1.226	kN - (125 kgf)
HBW 5/62.5	5	2.5	612.0	N - (62.5 kgf)
HBW 5/31.25	5	1.25	306.5	N - (31.25 kgf)
HBW 5/25	5	1	245.2	N - (25 kgf)
HBW 2.5/187.5	2.5	30	1.839	kN - (187.5 kgf)
HBW 2.5/62.5	2.5	10	612.0	N - (62.5 kgf)
HBW 2.5/31.25	2.5	5	306.5	N - (31.25 kgf)
HBW 2.5/15.625	2.5	2.5	153.2	N - (15.625 kgf)
HBW 2.5/7.812.5	2.5	1.25	76.61	N - (7.8125 kgf)
HBW 2.5/6.25	2.5	1	61.20	N - (6.25 kgf)
HBW 2/120	2	30	1.177	kN - (120 kgf)
HBW 2/40	2	10	392.3	N - (40 kgf)
HBW 2/20	2	5	196.1	N - (20 kgf)
HBW 2/10	2	2.5	98.07	N - (10 kgf)
HBW 2/5	2	1.25	49.03	N - (5 kgf)
HBW 2/4	2	1	39.23	N - (4 kgf)
HBW 1/30	1	30	294.2	N - (30 kgf)
HBW 1/10	1	10	98.07	N - (10 kgf)
HBW 1/5	1	5	49.03	N - (5 kgf)
HBW 1/2.5	1	2.5	24.52	N - (2.5 kgf)
HBW 1/1.25	1	1.25	12.26	N - (1.25 kgf)
HBW 1/1	1	1	9.807	N - (1 kgf)

Pengujian kekerasan dilakukan pada cuplikan sampel hasil pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C, dan merupakan sampel yang sama yang digunakan pada pengujian SEM. Penjejakan dilakukan pada 5 titik dengan posisi dari bagian luar ke bagian dalam penampang benda uji sebagaimana terlihat pada Gambar 3.6. Tujuannya adalah untuk mengetahui apabila terdapat perbedaan kekerasan antara bagian dalam material dengan bagian kearah permukaan material.



Gambar 3.6 Sampel uji kekerasan.

Pengujian ini berdasarkan uji kekerasan Brinelli, yaitu dengan memberikan beban konstan (dengan *indenter* baja) yang dikeraskan pada permukaan benda uji. Penjejakan dilakukan pada 5 titik untuk masing-masing benda uji yang kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Diameter indenter baja adalah 2.5 mm dengan beban 187.5 kgf. Jejak diukur dengan menggunakan mikroskop optik dan dikonversi ke dalam rumus :

$$HB = 2P / \{ \pi D (D - (D^2 - d^2)^{1/2}) \}$$

dimana :

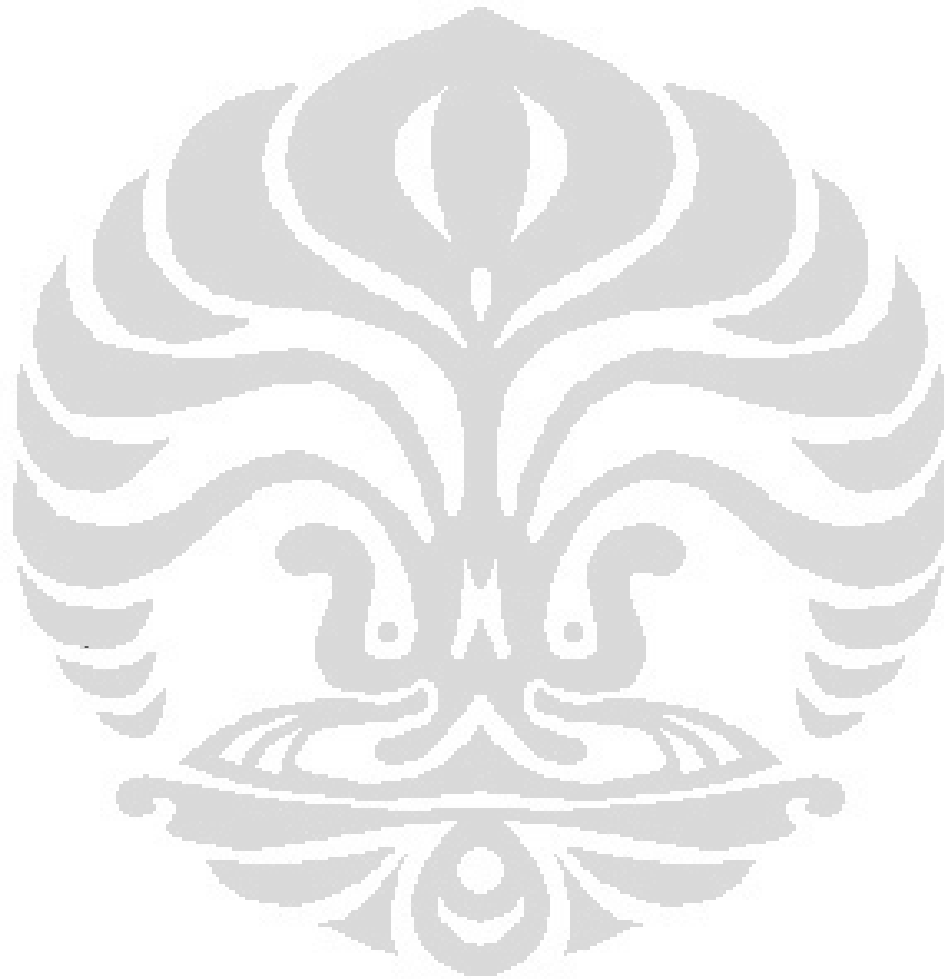
P = beban (kgf)

D = diameter bola indenter (mm)

d = diameter jejak (mm)

3.8 PENGUKURAN REDUKSI AREA (% RA)

Pengukuran reduksi area dilakukan untuk mengetahui keuletan material pada beberapa temperatur dari hasil pengujian tarik dan hasil pembentukan. Pengukuran dilakukan langsung dengan menggunakan *caliper*. Pada hasil uji tarik, pengukuran dilakukan pada diameter penampang benda uji tarik di sekitar area yang terdekat dengan patahan. Sedangkan pada hasil pembentukan, pengukuran dilakukan pada area yang mengalami deformasi plastis.



BAB 4 HASIL PENELITIAN

4.1 KARAKTERISASI MATERIAL

Pengujian karakterisasi yang dilakukan pada bahan dasar meliputi pengujian komposisi kimia, pengujian tarik dan metalografi. Dari hasil pengujian tersebut diperoleh informasi unsur-unsur kimia yang terdapat pada material, sifat mekanik, dan struktur mikro material yang diuji.

4.1.1 Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan mesin uji *optical emission spectrometer*. Data hasil uji komposisi kimia kemudian dibandingkan dengan standar ASTM A36 dan *mill certificate* seperti terlihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan komposisi kimia antara standar ASTM A36, *mill certificate*, dan hasil karakterisasi

Referensi	Karbon (C, % maks)	Mangan (Mn, %)	Phospor (P, % maks)	Sulfur (S, % maks)	Silikon (Si, % maks)
Standar ASTM A36	0.27	0.80 - 0.90	0.04	0.05	0.40
<i>Mill Certificate</i>	0.180	0.860	0.011	0.024	0.270
Hasil Karakterisasi	0.163	0.468	0.008	0.003	0.113

4.1.2 Sifat Mekanik

Pengujian tarik temperatur tinggi memberikan perkiraan kapasitas beban statik di bawah pembebanan waktu pendek. Dari hasil pengujian diperoleh data kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan keuletan material. Nilai keuletan memberikan

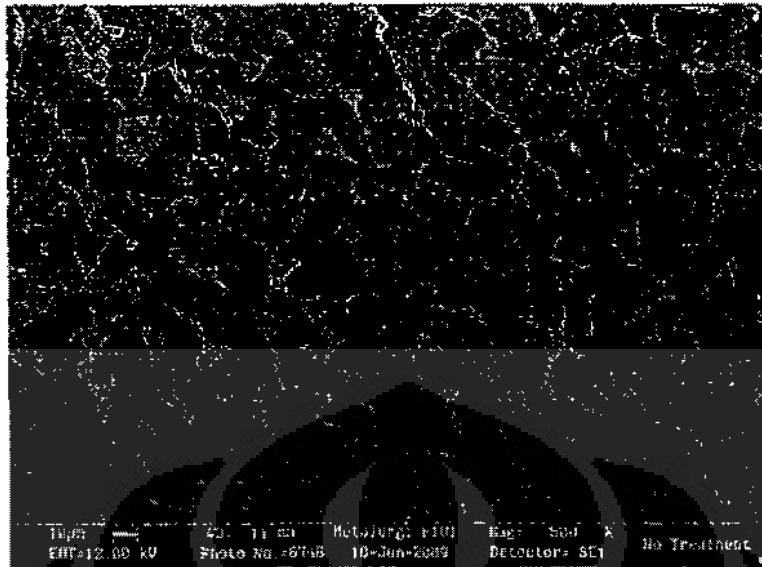
ukuran pembanding terhadap kemampuan material ketika mengalami deformasi lokal tanpa retak atau patah. Data hasil uji tarik dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil uji tarik pada temperatur ruang (25 °C), 600, 700, 800 °C

Benda Uji	Temperatur Uji (°C)	Diameter (mm)	P maks (kg)	P luluh (kg)	ΔL (mm)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Yield Strength (kg/mm ²)	% EL	Nilai rata-rata		
									Tensile Strength (kg/mm ²)	Yield Strength (kg/mm ²)	% EL
T0-1	25	8.90	3350	2300	11.45	53.88	36.99	32.71	52.80	36.45	33.95
T0-2	25	8.90	3150	2250	12.10	50.66	36.19	34.57			
T0-3	25	8.90	3350	2250	12.10	53.88	36.19	34.57			
T1-1	600	12.70	4875	3000	17.25	38.50	23.69	34.50	38.42	23.82	34.13
T1-2	600	12.80	5250	3250	16.75	40.82	25.27	33.50			
T1-3	600	12.70	4550	2850	17.20	35.94	22.51	34.40			
T2-1	700	12.75	2475	1650	22.90	19.39	12.93	45.80	19.66	13.11	45.47
T2-2	700	12.60	2675	1750	21.80	21.46	14.04	43.60			
T2-3	700	12.85	2350	1600	23.50	18.13	12.34	47.00			
T3-1	800	12.85	1550	1000	25.00	11.96	7.71	50.00	11.70	7.59	67.50
T3-2	800	12.90	1450	950	37.50	11.10	7.27	75.00			
T3-3	800	12.80	1550	1000	38.75	12.05	7.78	77.50			

4.1.3 Pengamatan Metalografi

Untuk mengetahui struktur mikro material maka dilakukan pengamatan metalografi. Pengamatan metalografi dilakukan pada material dasar, dan pada material hasil pembentukan temperatur tinggi. Dari pengamatan tersebut diperoleh informasi ukuran butir dan jenis fasa. Hasil pengamatan metalografi dengan menggunakan SEM terlihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Foto hasil uji SEM pada baja karbon ASTM A36

4.2 PROSES PEMBENTUKAN

Proses pembentukan dilakukan pada temperatur 600, 700, dan 800 °C dengan benda uji masing-masing berdiameter 16, 20, dan 24 mm. Produk hasil proses pembentukan terlihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil pembentukan *welded eye bolt* pada temperatur 600 °C dengan diameter 16, 20, 24 mm

4.2.1 Pengamatan Metalografi

4.2.1.1 Ukuran butir

Dari hasil pengamatan metalografi, dilakukan pengukuran besar butir. Pengukuran besar butir dilakukan secara langsung dengan menentukan aktual rata-rata ukuran butir dari hasil uji SEM perbesaran 500X. Dengan menarik garis lurus dengan panjang tertentu pada foto struktur mikro, maka dapat dihitung jumlah butir yang berpotongan dengan garis lurus tersebut. Lalu dihitung rasio antara jumlah butir dan panjang garis sehingga diperoleh ukuran butir (Smith, Hashemi, 2006).

Berdasarkan ASTM E112, *Heyn Lineal Intercept Procedure*, perkiraan ukuran butir rata-rata dihitung dari jumlah butir yang berpotongan (*intercept*) pada satu atau lebih garis lurus dengan sekurang-kurangnya 50 *intercept*.

Metode Pengukuran Besar Butir

Hasil uji SEM dengan perbesaran 500X menunjukkan skala dimana 1 strip mewakili 10 mikron. Lima buah garis lurus dibuat pada foto hasil uji SEM. Panjang masing-masing garis lurus tersebut secara proporsional sama dengan 30 strip. Sehingga total panjang 1 garis = 30 strip x 10 mikron = 300 mikron.



Gambar 4.3. Garis lurus pada metode pengukuran besar butir dimana 1 strip mewakili ukuran 10 mikron

Jumlah butir sepanjang 1 garis lurus dihitung dari banyaknya batas butir yang berpotongan dengan garis lurus tersebut. Besar butir dihitung dari panjang 1 garis lurus (= 300 mikron) dibagi jumlah batas butir yang berpotongan dengan garis lurus tersebut. Untuk setiap sampel uji, dibuat 5 garis yang kemudian diambil nilai rata-rata dari besar butirnya.

Foto Hasil Uji SEM

Uji SEM dilakukan pada sampel tanpa proses pembentukan dan sampel uji pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C. Sampel diberi identifikasi warna putih (T=600 °C), kuning (T=700 °C), dan merah (T=800 °C). Dengan masing-masing sampel uji pembentukan berukuran 16, 20, dan 24 mm maka total jumlah sampel yang diamati adalah 9 sampel. Foto hasil uji SEM diambil dengan perbesaran 500X dan etsa *nital* 2%.

Setelah pengamatan metalografi kemudian dilanjutkan dengan pengukuran besar butir masing-masing sampel dengan metode seperti yang telah diuraikan diatas. Dengan menarik 5 garis lurus pada hasil foto SEM dan menghitung jumlah batas butir yang berpotongan dengan garis-garis tersebut maka diperoleh rata-rata ukuran butir. Ukuran butir tersebut lalu dikonversikan ke *grain size* ASTM. Hasil pengukuran butir menunjukkan adanya perbedaan ukuran butir pada masing-masing temperatur.

Tabel 4.3 Ukuran butir dari pengamatan metalografi benda uji pada temperatur ruang

Jumlah Butir di Area Observasi	Panjang <i>Intercept</i> (µm)	Rata-rata Panjang <i>Intercept</i> (µm)	Rata-rata <i>Grain Size</i> ASTM
23	13.04	12.22	9.5
25	12.00		
26	11.54		
25	12.00		
24	12.50		

Tabel 4.4 Ukuran butir pada temperatur pembentukan 600, 700, 800 °C

Benda Uji	Temperatur Pembentukan (°C)	Diameter Sampel (mm)	Jumlah Butir di Area Observasi	Panjang Intercept (µm)	Rata-rata Panjang Intercept (µm)	Rata-rata Grain Size ASTM
P1	600	16	29	10.34	10.36	
			29	10.34		
			31	9.68		
			29	10.34		
			27	11.11		
P2	600	20	31	9.68	9.77	10
			29	10.34		
			34	8.82		
			30	10.00		
			30	10.00		
P3	600	24	25	12.00	12.32	
			23	13.04		
			24	12.50		
			24	12.50		
			26	11.54		
K1	700	16	29	10.34	10.57	
			28	10.71		
			29	10.34		
			28	10.71		
			28	10.71		
K2	700	20	22	13.64	13.42	9.5
			21	14.29		
			23	13.04		
			22	13.64		
			24	12.50		
K3	700	24	32	9.38	9.28	
			33	9.09		
			33	9.09		
			34	8.82		
			30	10.00		
M1	800	16	19	15.79	16.02	
			20	15.00		
			17	17.65		
			18	16.67		
			20	15.00		
M2	800	20	18	16.67	17.24	8.5
			15	20.00		
			20	15.00		
			19	15.79		
			16	18.75		
M3	800	24	16	18.75	16.61	
			20	15.00		
			18	16.67		
			17	17.65		
			20	15.00		

4.2.1.2 Inklusi

Pengamatan melalui mikroskop optik

Pengamatan inklusi pada sampel hasil pembentukan 600, 700, 800 °C dilakukan melalui mikroskop optik dengan perbesaran 500X. Hasil foto mikroskop menunjukkan indikasi adanya inklusi dengan bentuk morfologi pipih memanjang, sebagaimana terlihat pada Gambar 4.4. Panjang 5 buah inklusi pada masing-masing sampel diukur dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.5.



Gambar 4.4 Hasil foto mikroskop pada sampel hasil pembentukan temperatur 600 °C (kiri), temperatur 700 °C (tengah), temperatur 800 °C (kanan), perbesaran 500X.

Tabel 4.5 Hasil pengukuran panjang inklusi sampel pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C

Sampel Uji	Temperatur Pembentukan (°C)	Panjang Inklusi (µm)	Rata-rata Panjang Inklusi (µm)
P	600	18	18.2
		22	
		19	
		13	
		19	
K	700	12	8.6
		7	
		10	
		9	
		5	
M	800	23	17.8
		16	
		19	
		10	
		21	

Untuk memastikan unsur-unsur yang terdapat pada inklusi tersebut, maka dilanjutkan dengan analisa EDX.

Analisa EDX (*Energy Dispersive X-Ray Analysis*)

Analisa EDX dilakukan pada sampel P2, K2, dan M2 yang merupakan hasil pembentukan temperatur 600, 700, dan 800 °C. Pada masing-masing sampel dilakukan analisa unsur pada 4 area (*spot*) yang diduga sebagai inklusi. Hasilnya menunjukkan bahwa terdapat beberapa unsur seperti Mn, S, Si dan O, sebagaimana terlihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil analisa EDX yang menunjukkan persentase unsur-unsur yang terdapat pada inklusi

Sampel Uji	Area Inklusi	Unsur (%)			
		Mn	S	Si	O
P2	Inklusi 1	18.23	11.79	0.00	0.00
	Inklusi 2	25.96	4.53	0.00	11.02
	Inklusi 3	5.44	26.56	0.00	0.00
	Inklusi 4	45.19	22.88	0.00	0.00
K2	Inklusi 1	0.00	7.17	0.00	26.23
	Inklusi 2	34.63	15.01	15.28	35.08
	Inklusi 3	21.37	13.97	1.68	6.09
	Inklusi 4	32.37	19.56	0.00	5.66
M2	Inklusi 1	0.00	0.00	0.00	26.08
	Inklusi 2	32.43	16.40	0.00	0.00
	Inklusi 3	61.41	38.59	0.00	0.00
	Inklusi 4	24.05	15.02	0.00	0.00

4.2.2 Pengujian Kekerasan

Kekerasan secara proporsional berbanding lurus dengan kekuatan tarik. Pada baja karbon rendah, hubungan antara kekerasan Brinell (*Brinell Hardness Number*) dengan kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) adalah sebagai berikut :

$$\text{Kekuatan Tarik (MPa)} = 3.45 \times \text{Kekerasan Brinell (HB)}$$

Tabel 4.7 Hasil uji kekerasan Brinell

Sampel	T Pembentukan (°C)	d Sampel (mm)	Titik Penjejakan	d Penjejakan (mm)	Rata-rata d Penjejakan (mm)	Kekerasan (HB)	Rata-rata Kekerasan (HB)
P1	600	16	1	1.259	1.228	140	
			2	1.198			
			3	1.157			
			4	1.247			
			5	1.278			
P2	600	20	1	1.186	1.176	160	151
			2	1.187			
			3	1.205			
			4	1.155			
			5	1.145			
P3	600	24	1	1.215	1.225	152	
			2	1.217			
			3	1.223			
			4	1.244			
			5	1.224			
K1	700	16	1	1.273	1.232	137	
			2	1.185			
			3	1.177			
			4	1.251			
			5	1.276			
K2	700	20	1	1.241	1.192	145	141
			2	1.206			
			3	1.223			
			4	1.129			
			5	1.159			
K3	700	24	1	1.254	1.257	142	
			2	1.251			
			3	1.258			
			4	1.261			
			5	1.263			
M1	800	16	1	1.273	1.226	137	
			2	1.180			
			3	1.171			
			4	1.221			
			5	1.284			
M2	800	20	1	1.285	1.284	134	137
			2	1.275			
			3	1.297			
			4	1.279			
			5	1.286			
M3	800	24	1	1.265	1.276	139	
			2	1.277			
			3	1.269			
			4	1.289			
			5	1.278			

Dari data kekerasan Brinell dapat dihitung besarnya kekuatan yang diperoleh secara teoritis. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil perhitungan kekuatan tarik dari nilai kekerasan Brinell

Sampel	Temperatur Pembentukan (°C)	Diameter Sampel (mm)	Kekerasan (HB)	Tensile Strength		Rata-rata Tensile Strength	
				MPa	kg/mm ²	MPa	kg/mm ²
P1	600	16	140	483	49.29	520	53.04
P2	600	20	160	552	56.33		
P3	600	24	152	524	53.51		
K1	700	16	137	473	48.23	488	49.76
K2	700	20	145	500	51.05		
K3	700	24	142	490	49.99		
M1	800	16	137	473	48.23	472	48.11
M2	800	20	134	462	47.17		
M3	800	24	139	480	48.93		

4.2.3 Reduksi Area Hasil Pembentukan dan Hasil Uji Tarik

Reduksi area sebagai akibat proses pembentukan diperoleh dengan mengukur luas penampang sebelum dan setelah pembentukan. Sedangkan reduksi area hasil uji tarik diukur langsung pada benda uji sebelum dan setelah uji tarik. Data hasil pengukuran reduksi area dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10.

Tabel 4.9 Persentase reduksi area pada pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C

Sampel	Temperatur Pembentukan (°C)	d Awal (mm)	A Awal (mm ²)	d Akhir (mm)	A Akhir (mm ²)	Reduksi Area (% RA)	Rata-rata Reduksi Area (% RA)
P1	600	15.95	199.71	15.87	197.71	1.00	1.93
P2	600	19.90	310.87	19.67	303.72	2.30	
P3	600	23.90	448.40	23.60	437.21	2.49	
K1	700	15.95	199.71	15.49	188.35	5.68	4.24
K2	700	19.90	310.87	19.61	301.87	2.89	
K3	700	23.90	448.40	23.40	429.83	4.14	
M1	800	15.95	199.71	15.63	191.77	3.97	5.93
M2	800	19.90	310.87	19.25	290.89	6.43	
M3	800	23.90	448.40	23.00	415.27	7.39	

Tabel 4.10 Persentase reduksi area pada uji tarik temperatur 600, 700, 800 °C

Sampel	Temperatur Uji Tarik (°C)	D Awal (mm)	A Awal (mm ²)	d Akhir (mm)	A Akhir (mm ²)	Reduksi Area (% RA)	Rata-rata Reduksi Area (% RA)
T1-1	600	12.70	126.61	7.70	46.54	63.24	59.11
T1-2	600	12.80	128.61	8.10	51.50	59.95	
T1-3	600	12.70	126.61	8.60	58.06	54.14	
T2-1	700	12.75	127.61	6.40	32.15	74.80	78.22
T2-2	700	12.60	124.63	5.70	25.50	79.54	
T2-3	700	12.85	129.62	5.70	25.50	80.32	
T3-1	800	12.85	129.62	4.90	16.85	85.46	89.32
T3-2	800	12.90	130.63	3.90	11.94	90.86	
T3-3	800	12.80	128.61	3.70	10.75	91.64	



BAB 5 PEMBAHASAN

5.1 KOMPOSISI KIMIA DAN SIFAT MEKANIK LOGAM DASAR

Hasil uji komposisi kimia menunjukkan bahwa material uji adalah baja karbon rendah dengan C = 0.163 %. Kadar unsur-unsur paduan lainnya sesuai dengan standar ASTM A36, kecuali manganese (Mn). Hasil karakterisasi menunjukkan kadar Mn yang lebih rendah dari standar ASTM A36, yaitu hanya sebesar 0.468 %. Bandingkan dengan standar ASTM A36 dimana Mn = 0.6 – 0.9 %.

Unsur Mn berperan memperbaiki kekuatan, sifat mampu mesin material, dan pembentukan MnS. Tanpa Mn yang cukup, sulfur (S) membentuk FeS yang karena titik leburnya (*melting point*) rendah maka akan mengurangi kemampuan pengerjaan panas baja.

Dari hasil pengujian tarik diperoleh nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan perpanjangan yang memenuhi sifat mekanik sesuai standar ASTM A36. Pengujian tarik pada temperatur 600, 700, 800 °C memperlihatkan kekuatan turun dan keuletan meningkat dengan naiknya temperatur.

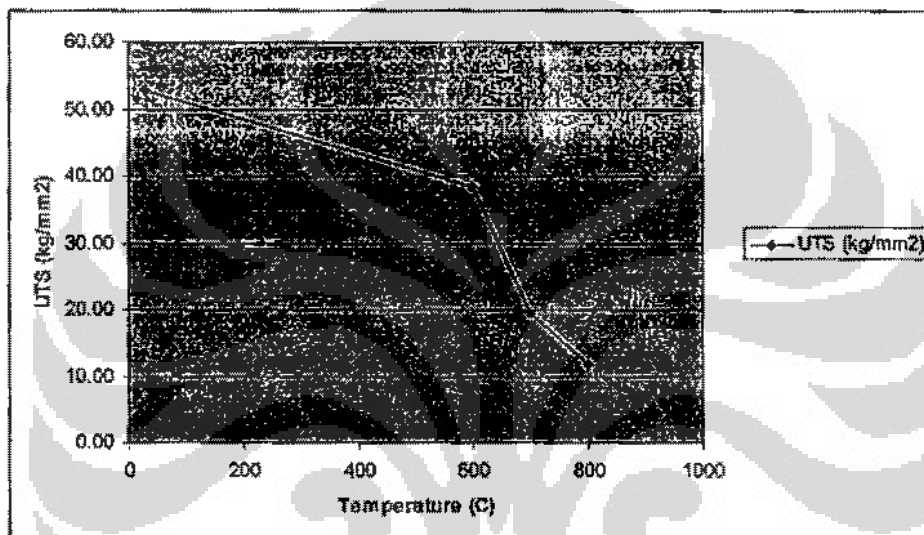
Pada temperatur ruang (T25)	: $\sigma = 52.80 \text{ kg/mm}^2$	dan $\epsilon = 33.95 \%$
Pada temperatur 600 °C (T600)	: $\sigma = 38.42 \text{ kg/mm}^2$	dan $\epsilon = 34.13 \%$
Pada temperatur 700 °C (T700)	: $\sigma = 19.66 \text{ kg/mm}^2$	dan $\epsilon = 45.47 \%$
Pada temperatur 800 °C (T800)	: $\sigma = 11.70 \text{ kg/mm}^2$	dan $\epsilon = 67.50 \%$

Kenaikan persentase *elongation* pada T700 dan T800 jauh lebih baik dibandingkan T600 yang hampir sama dengan T25. Karena keuletan yang tinggi pada T700 dan T800 maka pembentukan *welded eye bolt* pada temperatur tersebut dapat menjadi pilihan.

Gambar 5.1 memperlihatkan grafik hubungan kekuatan dengan temperatur. Reduksi kekuatan dari T600 ke T800 lebih besar dibandingkan reduksi kekuatan dari

T25 ke T600. Artinya, temperatur diatas 600°C sudah sangat tinggi bagi material baja karbon ASTM A36 yang mempengaruhi penurunan kekuatan secara ekstrim.

Reduksi kekuatan dari T600 ke T700 lebih besar dibandingkan dari T700 ke T800. Persentase reduksi kekuatan dari T600 ke T700 adalah 49 %, sedangkan reduksi kekuatan dari T700 ke T800 adalah 40 %. Hal ini dapat dianalisa lebih lanjut dari struktur mikro dan fasa yang terbentuk pada temperatur-temperatur tersebut.



Gambar 5.1 Grafik kekuatan tarik sebagai fungsi temperatur

Fasa Ketika Pengujian Tarik Temperatur Tinggi

Berdasarkan diagram fasa Fe-C, fasa-fasa yang terbentuk pada baja karbon dipengaruhi oleh temperatur dan kandungan karbon. Pada temperatur 600°C material baja karbon dengan kandungan karbon 0.163 % mempunyai fasa ferit (α) dan perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). Demikian juga pada temperatur 700°C , masih berada di fasa yang sama. Karakteristik ferit adalah bersifat lunak dan ulet dengan struktur kristal BCC.

Ketika temperatur dinaikkan hingga mencapai 800°C , temperatur tersebut telah melampaui titik *eutectoid* (723°C) sehingga terjadi perubahan fasa dimana perlit bertransformasi menjadi austenit (γ). Fasa austenit mempengaruhi sifat mekanik

material. Austenit mempunyai sifat tangguh, dengan struktur kristal FCC yang mempunyai lebih banyak *interstitial position* yang ditempati oleh atom karbon, mempunyai sifat ulet pada temperatur tinggi. Selain itu, pada temperatur 800 °C ukuran butir lebih besar dibandingkan pada temperatur 600 °C atau 700 °C karena terjadi pertumbuhan butir. Pada temperatur tinggi, ukuran butir yang lebih besar berkontribusi dalam menahan pergerakan dislokasi ketika terjadi deformasi plastis.

Kombinasi antara perubahan fasa dan pertumbuhan butir yang lebih tinggi pada temperatur 800 °C dapat menjadi faktor yang berkontribusi pada perubahan sifat mekanik yang ikut mempengaruhi laju reduksi kekuatan dari temperatur 700 °C ke 800 °C.

5.2 STRUKTUR MIKRO HASIL PEMBENTUKAN

Struktur mikro penting untuk diketahui karena memiliki kontribusi pada sifat-sifat mekanik material. Analisa struktur mikro berikut ini meliputi jenis fasa, ukuran butir, dan inklusi.

5.2.1 Fasa Selama Proses Pembentukan

Benda uji adalah baja karbon dimana hasil uji komposisi kimia menunjukkan kandungan karbon 0.163 %. Ketika mengalami proses pembentukan dengan pemanasan hingga temperatur 600 dan 700 °C, material mempunyai fasa ferit-perlit, berada dibawah titik *eutectoid* pada diagram fasa baja karbon. Pemanasan pada temperatur tersebut tidak mengakibatkan perubahan fasa karena temperatur pemanasan masih dibawah titik *eutectoid*. Setelah proses pembentukan selesai, material didinginkan secara normal di udara. Hasil pembentukan temperatur 600 °C dan 700 °C pada pengamatan struktur mikro melalui SEM (perbesaran 500X dan etsa *nital* 2%) menunjukkan terdapatnya fasa ferit dan perlit. Ferit terlihat sebagai fasa yang dominan, sehingga sifat material secara keseluruhan lebih dipengaruhi oleh sifat ferit.

Pada proses pembentukan temperatur 800 °C, terjadi perubahan fasa karena sudah melampaui titik *eutectoid*, material mempunyai fasa ferit (α) dan austenit (γ). Pendinginan normal diudara mengakibatkan austenit bertransformasi menjadi perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). Transformasi tersebut dimulai dari batas butir. Makin tinggi laju pendinginan, makin halus struktur perlit, dimana jarak antara lamel Fe_3C makin rapat. Hasil pengamatan struktur mikro melalui SEM menunjukkan terdapat fasa ferit dan perlit. Fasa perlit terlihat dalam bentuk lamel yang merupakan gabungan dari ferit dan sementit (Fe_3C). Karena pendinginan berjalan lambat di udara, maka jarak antar lamel tidak terlalu rapat.

5.2.2 Pertumbuhan Butir

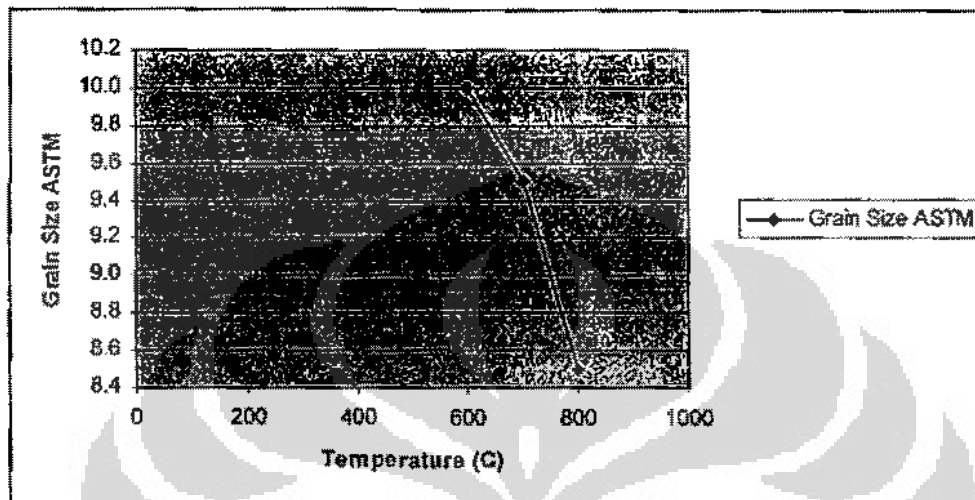
Hasil uji SEM pada sampel hasil pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C menunjukkan terjadinya pertumbuhan butir yang signifikan pada temperatur 800 °C. Hasil pengukuran besar butir pada pembentukan temperatur 600 dan 700 °C menunjukkan ukuran hampir sama yaitu berkisar antara 9-12 mikron untuk temperatur 600 °C, dan 9-13 mikron untuk temperatur 700 °C. Berdasarkan ASTM E112, besar butir tersebut dikategorikan dalam *grain size* no. 9.5 dan 10.

Hasil pembentukan temperatur 800 °C pada pengamatan struktur mikro menunjukkan pertumbuhan butir dimana ukuran butirnya jauh lebih besar dibandingkan hasil pembentukan temperatur 600 dan 700 °C, yaitu berkisar antara 16 sampai 17 mikron. Berdasarkan ASTM E112, besar butir tersebut dikategorikan dalam *grain size* no. 8.5.

Pengamatan ukuran butir pada beberapa ukuran sampel berbeda yang berdiameter 16, 20, dan 24 mm menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda. Hal ini karena selama proses pembentukan, ada waktu tahan (*holding time*) selama 5 menit untuk memberi kesempatan temperatur bagian luar dan bagian dalam material menjadi sama.

Gambar 5.2 menunjukkan ukuran butir (*grain size*) berdasarkan ASTM E112 pada sampel uji hasil pembentukan temperatur 600, 700, dan 800 °C. Sampel hasil

pembentukan temperatur 600, 700 dan 800 °C masing-masing mempunyai *grain size* ASTM nomor 10, 9.5, dan 8.5. Artinya, semakin tinggi temperatur, semakin besar ukuran butir.



Gambar 5.2 Grafik ukuran butir (*grain size*) sebagai fungsi temperatur

5.2.3 Inklusi Mangan Sulfida (MnS)

Pengamatan metalografi pada sampel pembentukan temperatur 600, 700, dan 800 °C menunjukkan terdapatnya inklusi yang berasal dari logam dasar yang digunakan. Inklusi dihasilkan dari proses pembuatan baja.

Hasil pengamatan mikroskop optik membuktikan bahwa inklusi terdapat pada semua sampel uji dengan besar bervariasi. Panjang inklusi bervariasi dari 5 hingga 23 mikron.

Untuk mengetahui unsur-unsur yang terdapat pada area inklusi tersebut, maka dilakukan pengujian EDX. Hasil uji menyatakan bahwa pada inklusi terdapat unsur-unsur Mn, S, Si, dan O. Unsur Mn dan S terlihat dominan sehingga menguatkan dugaan terdapatnya inklusi MnS.

Inklusi MnS berpotensi menjadi awal terjadinya retak pada skala mikro (*micro crack*) dalam proses pembentukan *welded eye bolt*. Inklusi yang tinggi akan mengurangi keuletan dan ketangguhan material.

5.3 KEKERASAN DAN KEKUATAN HASIL PEMBENTUKAN

Pengujian kekerasan dilakukan dengan penjejakan pada 5 titik dengan lokasi berbeda, dari bagian luar ke bagian dalam material. Hasil uji menunjukkan tidak terdapat kecenderungan perbedaan kekerasan antara bagian luar dan dalam. Ini berarti bahwa selama proses pembentukan panas, temperatur bagian luar dan dalam relatif sama. Hal ini karena ketika temperatur pembentukan tercapai, ada waktu tahan (*holding time*) sekitar 5 menit sebelum pembentukan dimulai.

Pengujian kekerasan pada sampel dilakukan berdasarkan standar kekerasan Brinell sehingga diperoleh nilai kekerasan sampel hasil proses pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C. Nilai kekerasan dikonversikan menjadi kekuatan material. Sehingga diperoleh nilai kekuatan material sebagai berikut :

$$\sigma_{600} = 53.04 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{700} = 49.76 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{800} = 48.11 \text{ kg/mm}^2$$

Kekerasan dan kekuatan material hasil pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C menunjukkan kecenderungan turun dengan makin tingginya temperatur pembentukan.

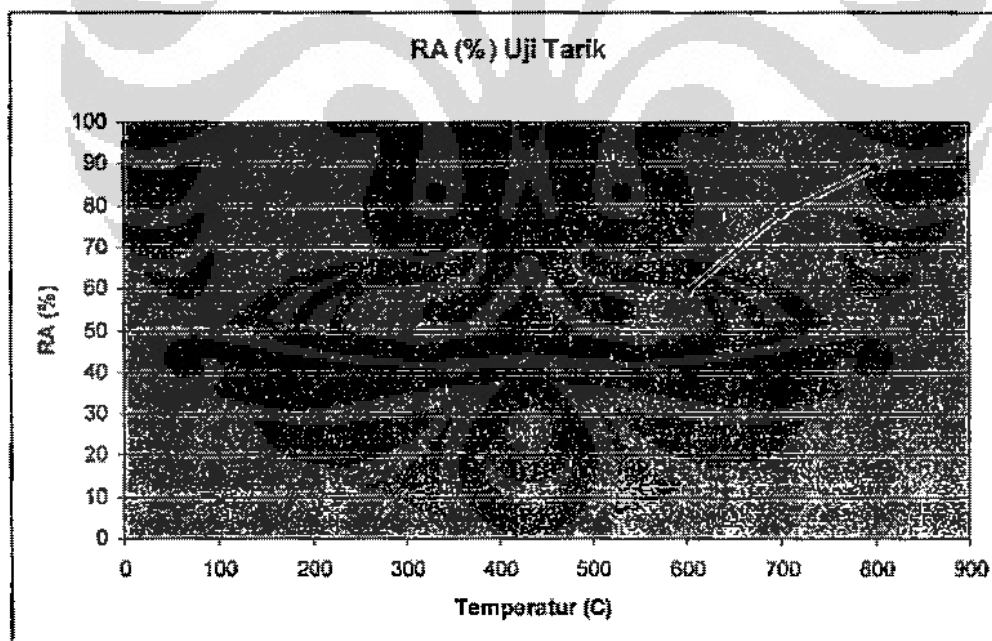
Makin tinggi temperatur pembentukan, makin besar ukuran butir. Pada pengujian ini ukuran butir hasil pembentukan temperatur 800 °C lebih besar dibandingkan temperatur 600 dan 700 °C. Ukuran butir yang besar menyebabkan kekuatan turun sebagaimana terlihat dari hasil pengujian kekerasan.

Pada temperatur ruang, ukuran butir sangat berpengaruh pada kekuatan material. Makin kecil ukuran butir, makin tinggi kekuatan material.

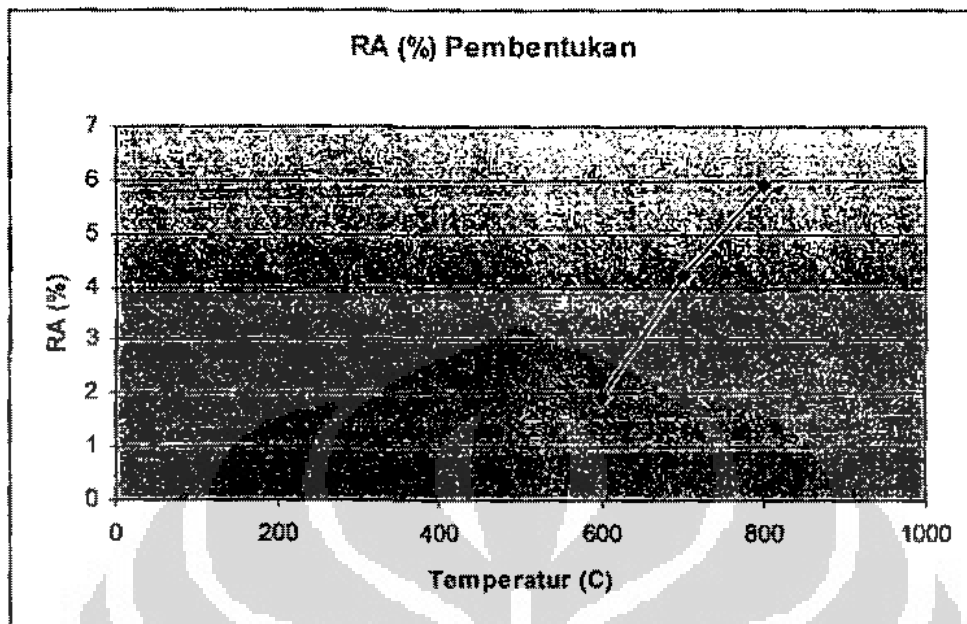
5.4 REDUKSI AREA HASIL UJI TARIK DAN HASIL PEMBENTUKAN TEMPERATUR 600, 700, DAN 800 °C

Data pengujian menunjukkan makin tinggi temperatur maka makin tinggi persentase reduksi area. Ini berarti keuletan material meningkat dengan naiknya temperatur.

Reduksi area (% RA) pada sampel *welded eye bolt* hasil pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C menunjukkan nilai yang jauh dibawah reduksi area sampel uji tarik sebagaimana terlihat pada Gambar 5.3 dan Gambar 5.4. Dengan demikian persentase perpanjangan (*elongation*) ketika pembentukan *welded eye bolt* jauh dibawah perpanjangan hasil uji tarik. Jadi sangat kecil kemungkinan material mengalami kegagalan karena perpanjangan selama proses pembentukan.



Gambar 5.3 Grafik reduksi area (% RA) hasil uji tarik sebagai fungsi temperatur



Gambar 5.4 Grafik reduksi area (% RA) hasil pembentukan sebagai fungsi temperatur

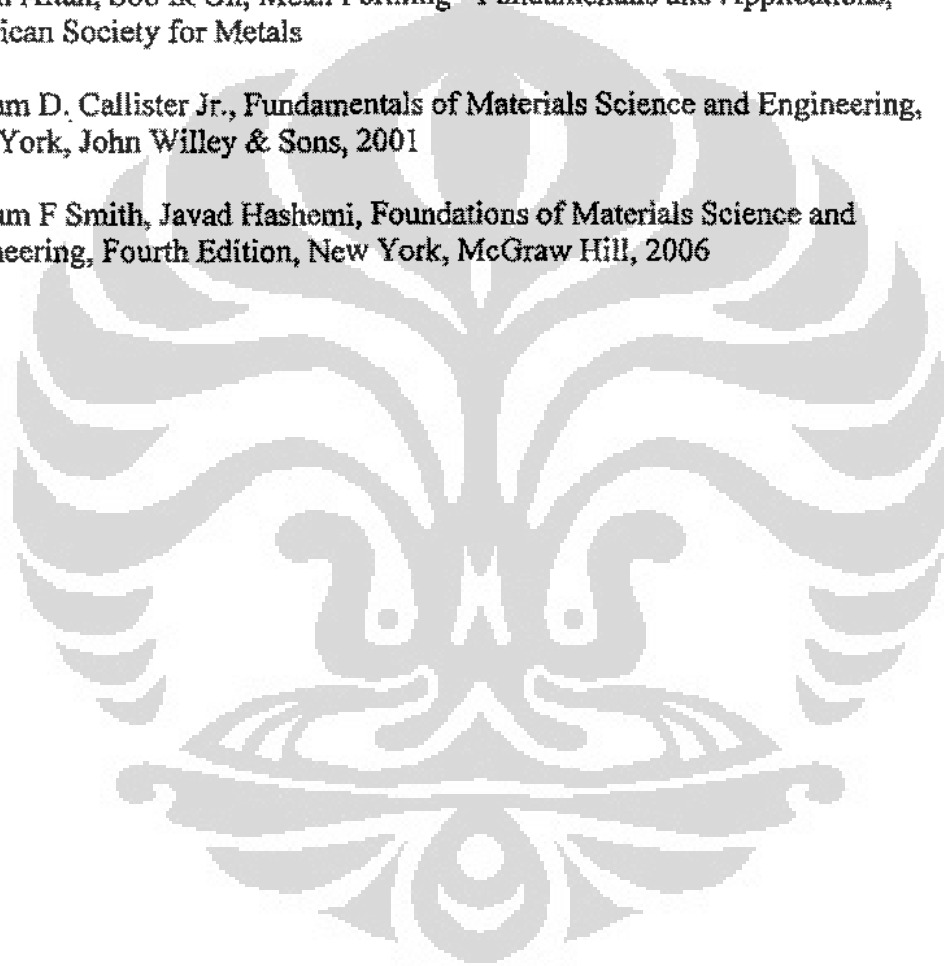
BAB 6 KESIMPULAN

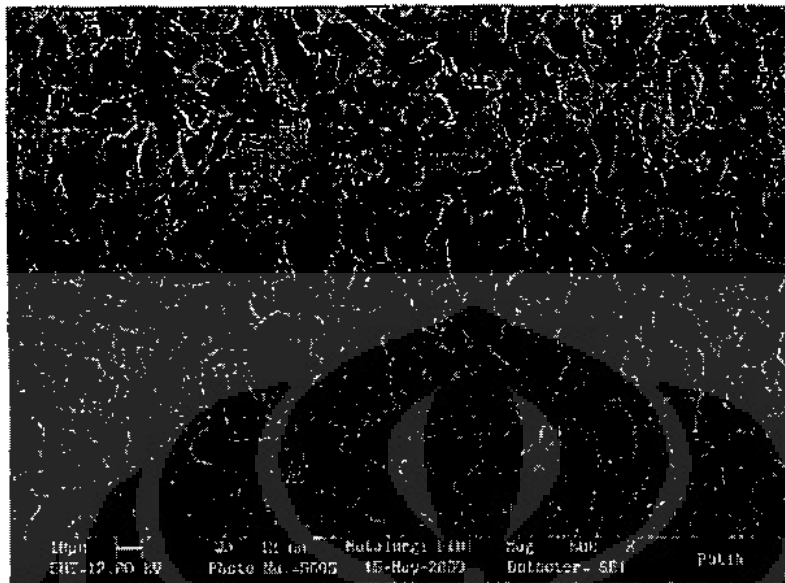
1. Pada pengujian tarik temperatur ruang (25 °C) dan temperatur tinggi (600 °C, 700 °C, 800 °C), kekuatan luluh menurun dan keuletan meningkat dengan naiknya temperatur. Dengan demikian maka mampu bentuk baja karbon ASTM A36 meningkat dengan naiknya temperatur.
2. Kekuatan baja karbon ASTM A36 turun dengan naiknya temperatur. Reduksi kekuatan dari temperatur 600 °C ke 800 °C jauh lebih besar dibandingkan dari temperatur ruang (25 °C) ke temperatur 600 °C. Temperatur diatas 600 °C terlalu tinggi bagi material yang mempengaruhi reduksi kekuatan.
3. Pada proses pembentukan temperatur tinggi, terjadi pertumbuhan butir dengan naiknya temperatur. Hasil uji SEM sampel pembentukan temperatur 800 °C menunjukkan ukuran butir 16-17 µm, jauh lebih besar dibandingkan sampel pembentukan temperatur 600 °C dan 700 °C yang mempunyai ukuran butir 9-13 µm. Ukuran butir hasil pembentukan temperatur 600 °C dan 700 °C menunjukkan kemiripan.
4. Dengan ukuran butir yang lebih kecil, kekerasan dan kekuatan hasil pembentukan temperatur 600 °C dan 700 °C lebih tinggi dibandingkan temperatur 800 °C. Sedangkan keuletan ketika dilakukan pembentukan pada temperatur 700 °C lebih baik dibandingkan temperatur 600 °C. Dengan demikian pembentukan *welded eye bolt* pada temperatur 700 °C lebih direkomendasikan.
5. Hasil pengamatan metalografi dengan mikroskop optik dan analisa EDX menunjukkan terdapatnya inklusi mangan sulfida (MnS). Inklusi dapat berpotensi menjadi pemicu retak pada skala mikro (*micro crack*).

DAFTAR REFERENSI

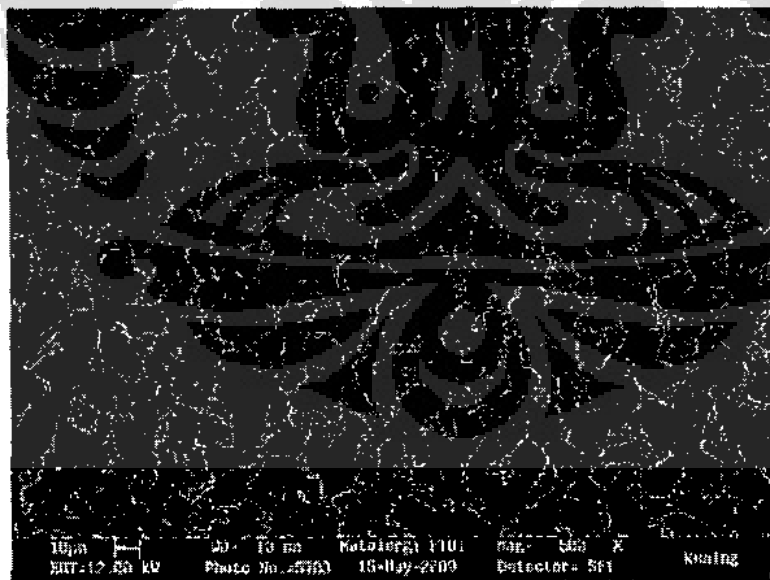
- [1] ASM Metals Handbook Vol. 08 Mechanical Testing and Evaluation, 2000
- [2] ASM Metals Handbook Vol. 09 Metallography and Microstructures, 2004
- [3] ASTM A36 Standard Specification for Carbon Structural Steel
- [4] George Dieter, Metalurgi Mekanik, McGraw Hill, 1986
- [5] George Krauss, Steel Processing, Structure, and Performance, ASM International, 2005
- [6] G.Y. Li, Investigation on Hot Ductility and Strength of Continuous Casting Slab for AH32 Steel, Journal on Acta Metallurgica Sinica (English Letter) Vol. 19 No.1 pp 75-78, Feb 2006
- [7] H. Avdusinovic, A. Gigovic, The Morphology and Distribution of MnS in Low Carbon Steel, Journal on Metallurgija 44 , 2005
- [8] John E. Neely, Thomas J. Bertone, Practical Metallurgy and Materials of Industry, Sixth Edition, Prentice Hall, 2003
- [9] J.R. Davis, Tensile Testing, Second Edition, 2004
- [10] Ju Chen, Behaviour of High Strength Structural Steel at Elevated Temperatures, Journal of Structural Engineering © ASCE, December 2006
- [11] K.E. Thelning, Steel and Its Heat Treatment, Butterworths, 1984
- [12] Lawrence W. Fisher, Selection of Engineering Materials and Adhesives, Taylor & Francis Group, 2005
- [13] N. Wolanska, A.K Lis, Microstructure Investigation of Low Carbon Steel after Hot Deformation, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol.20, Issues 1-2, Jan-Feb 2007
- [14] N. Wolanska, A.K Lis, The Deformation Analysis of 1008 Steel at 0.01/s Strain Rate, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol.25, Issue 1, Nov 2007

- [15] Rahmat Saptono, Kuliah Pertama Pembentukan Logam, FTUI, 2005
- [16] R.E. Smallman, Metalurgi Fisik Modern, 1985
- [17] Roland Kiessling, N. Lange, Non-Metallic Inclusions in Steel, The Metals Society, 1978
- [18] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, Manufacturing Engineering and Technology, Fifth Edition, Prentice Hall, 2006
- [19] Taylan Altan, Soo Ik Oh, Metal Forming - Fundamentals and Applications, American Society for Metals
- [20] William D. Callister Jr., Fundamentals of Materials Science and Engineering, New York, John Wiley & Sons, 2001
- [21] William F Smith, Javad Hashemi, Foundations of Materials Science and Engineering, Fourth Edition, New York, McGraw Hill, 2006

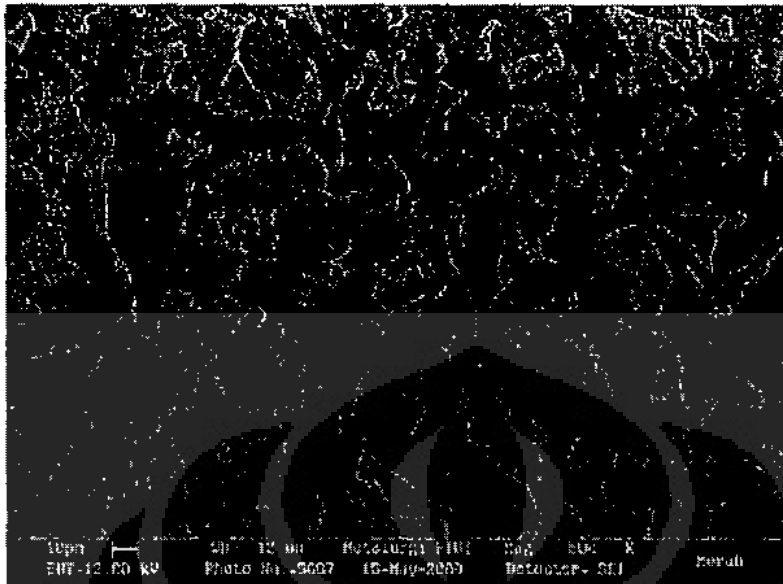




Gambar A.1 Hasil pengujian SEM sampel diameter 16 mm pada temperatur pembentukan 600 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



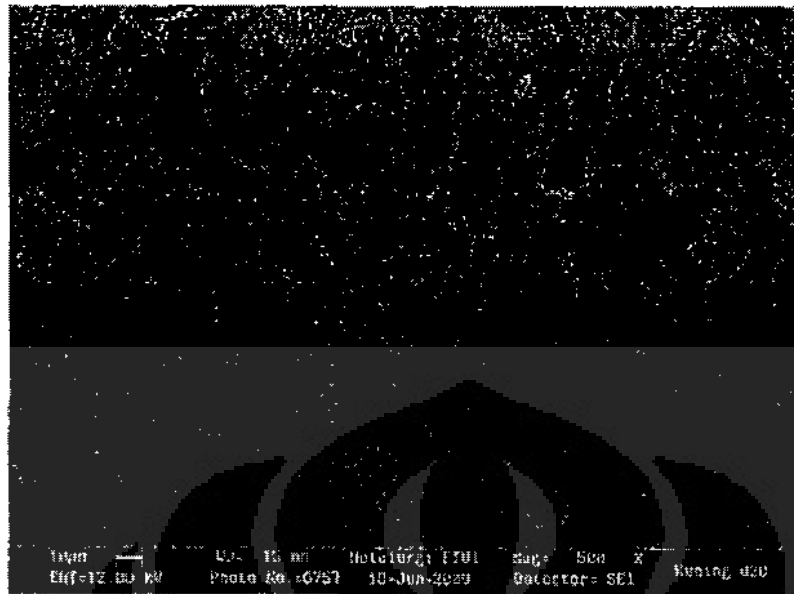
Gambar A.2 Hasil pengujian SEM sampel diameter 16 mm pada temperatur pembentukan 700 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



Gambar A.3 Hasil pengujian SEM sampel diameter 16 mm pada temperatur pembentukan 800 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



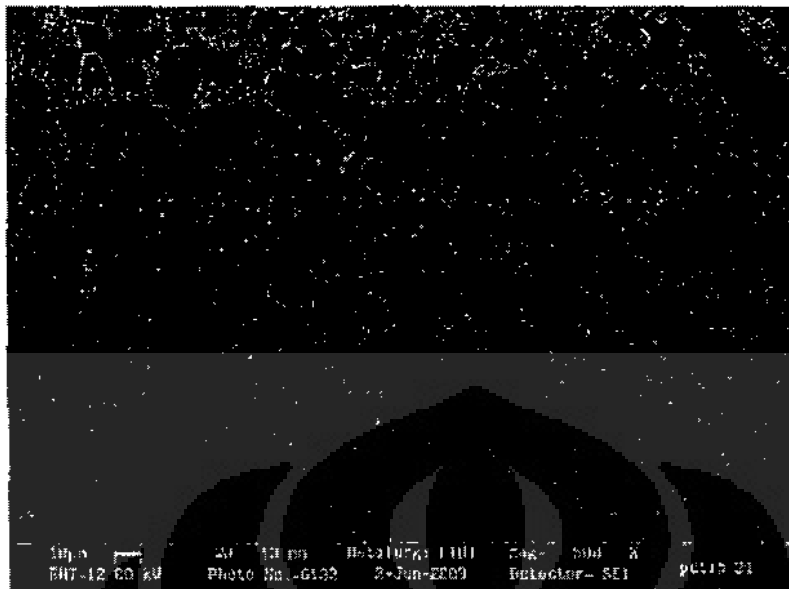
Gambar A.4 Hasil pengujian SEM sampel diameter 20 mm pada temperatur pembentukan 600 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



Gambar A.5 Hasil pengujian SEM sampel diameter 20 mm pada temperatur pembentukan 700 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



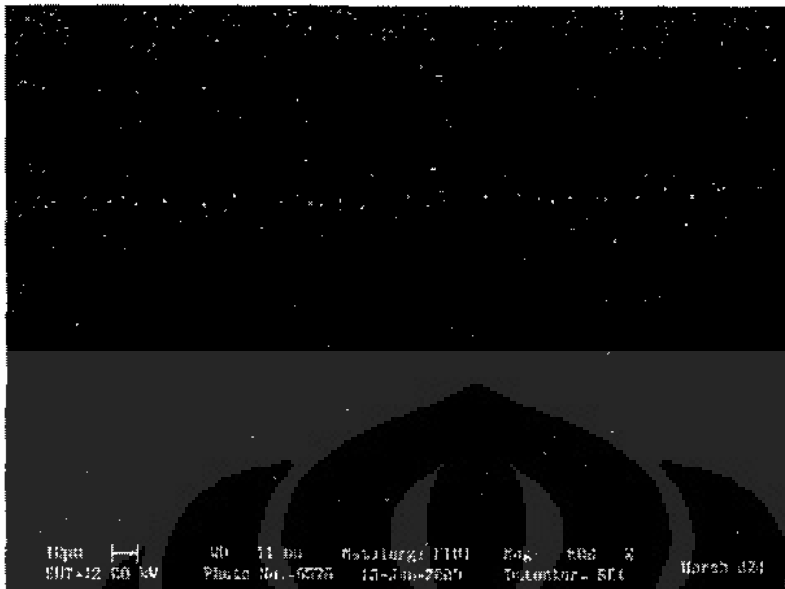
Gambar A.6 Hasil pengujian SEM sampel diameter 20 mm pada temperatur pembentukan 800 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



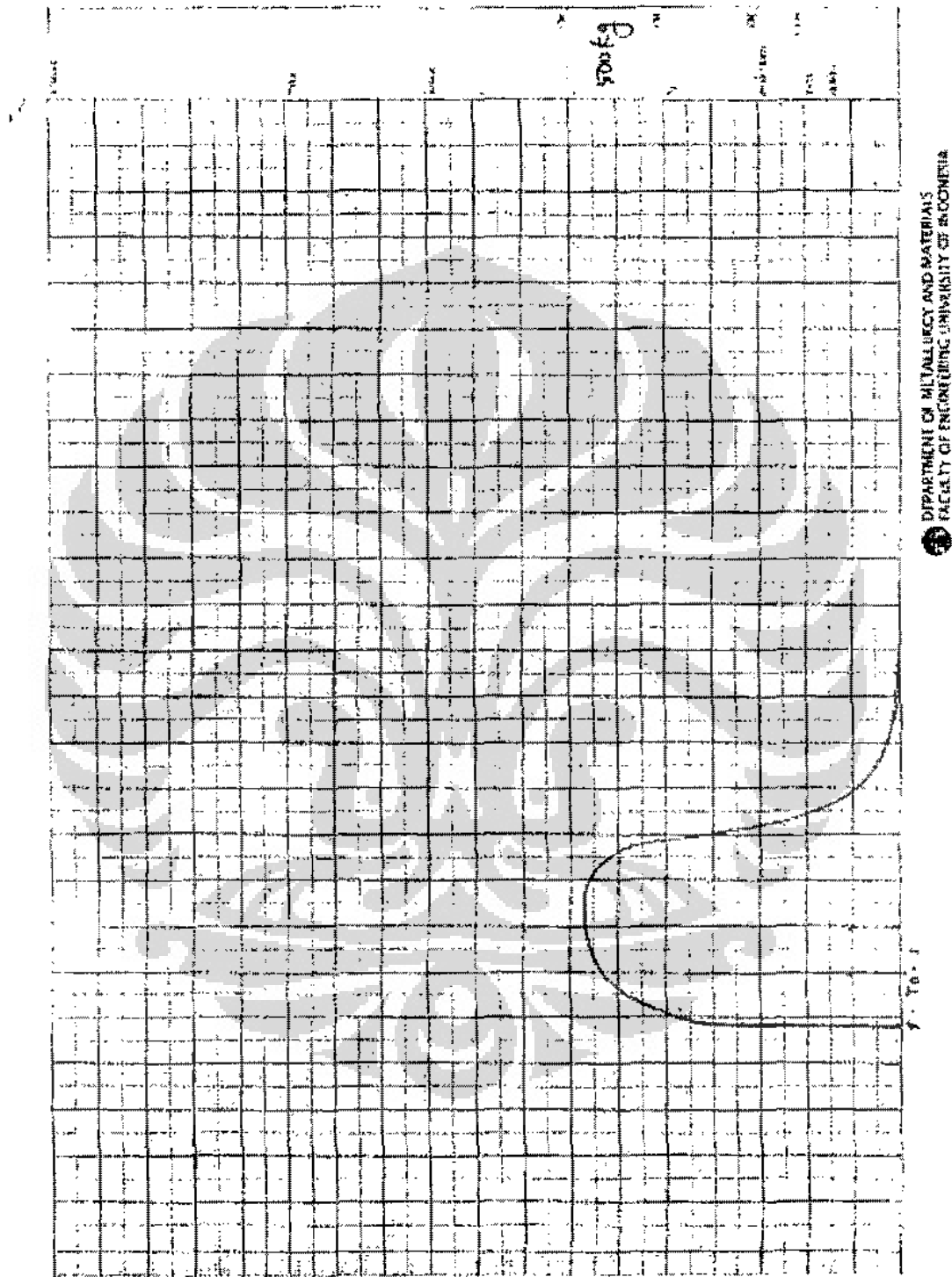
Gambar A.7 Hasil pengujian SEM sampel diameter 24 mm pada temperatur pembentukan 600 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



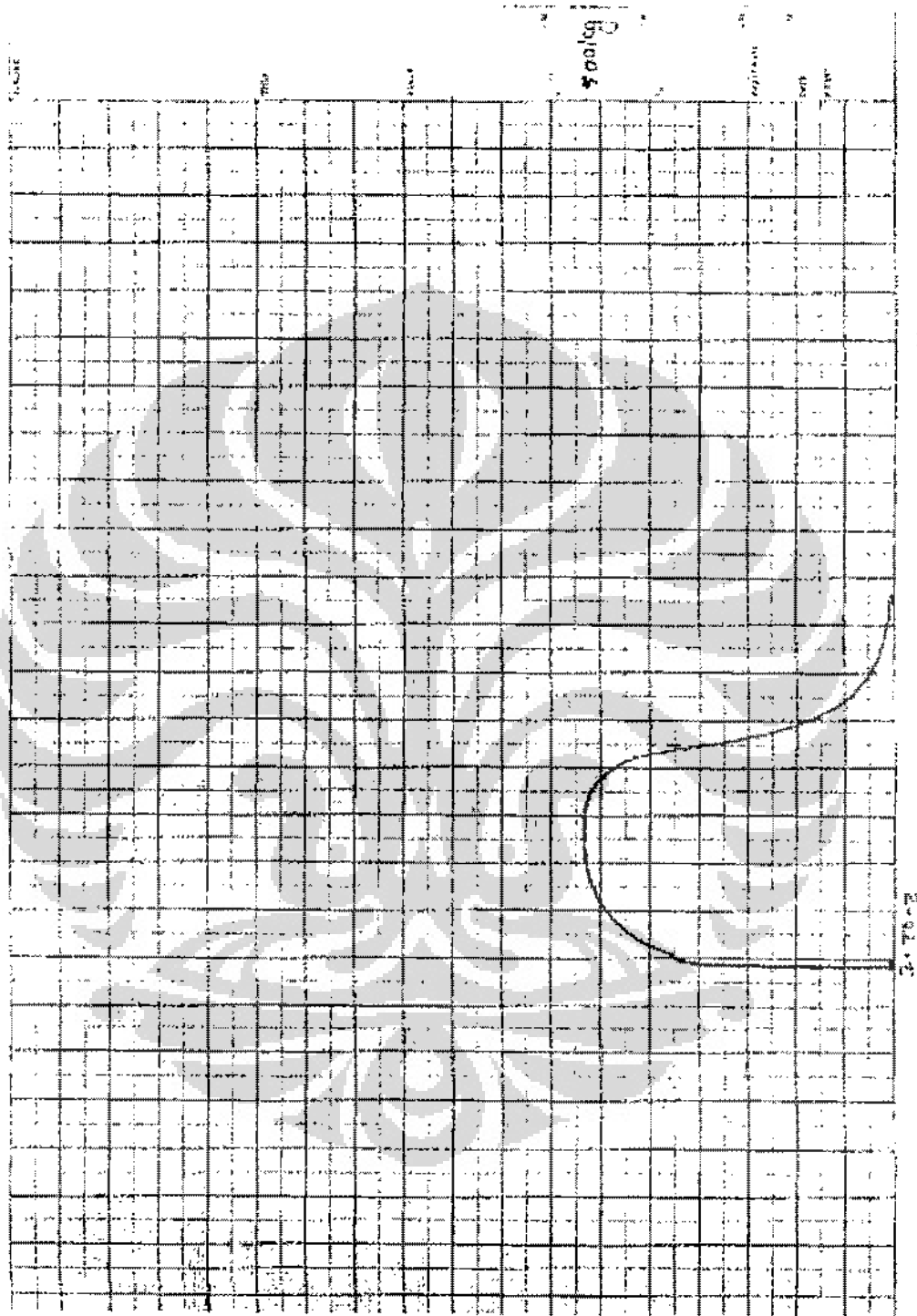
Gambar A.8 Hasil pengujian SEM sampel diameter 24 mm pada temperatur pembentukan 700 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



Gambar A.9 Hasil pengujian SEM sampel diameter 24 mm pada temperatur pembentukan 800 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)

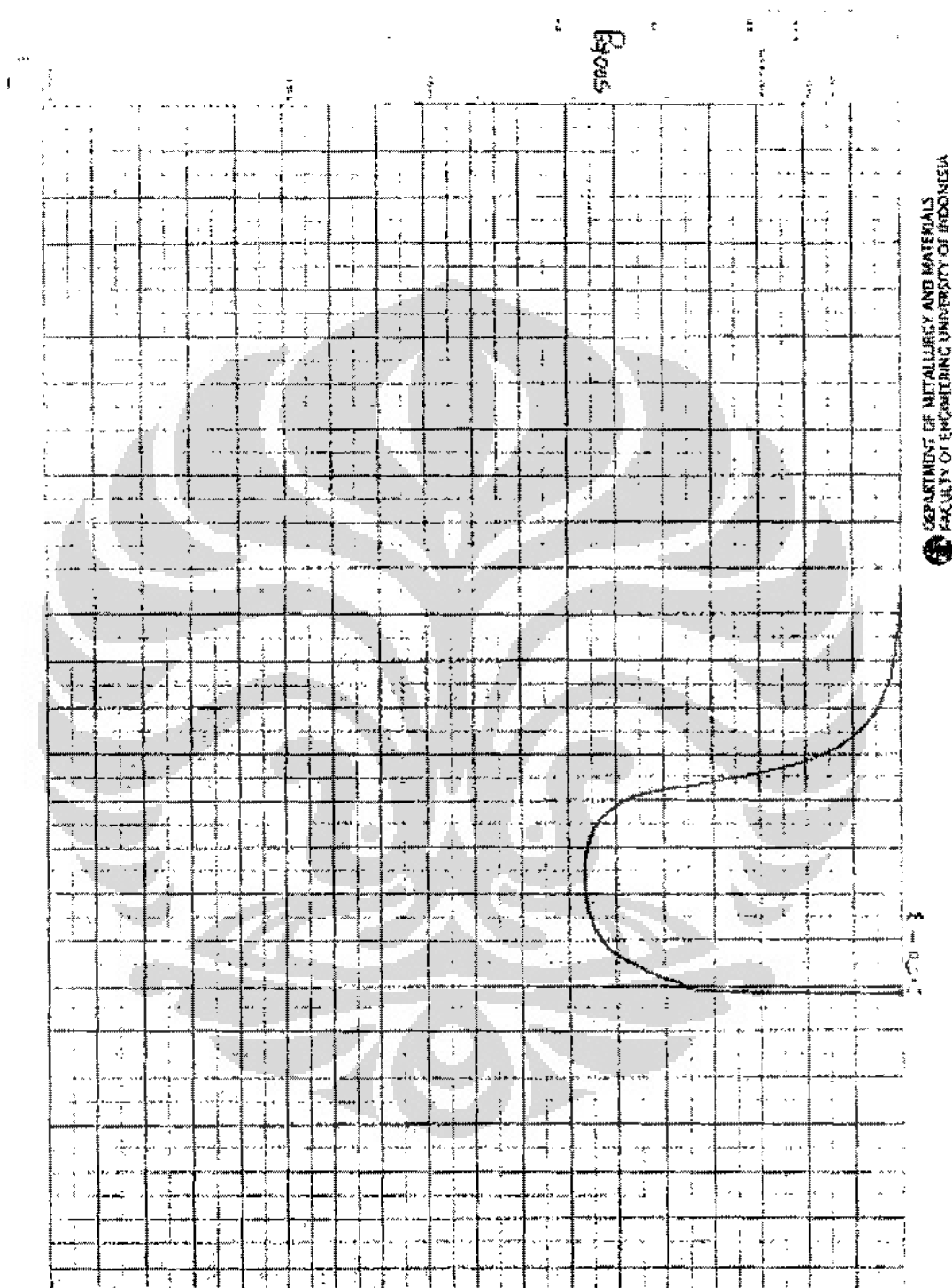


Gambar B.1 Hasil uji tarik temperatur ruang pada benda uji T0-1

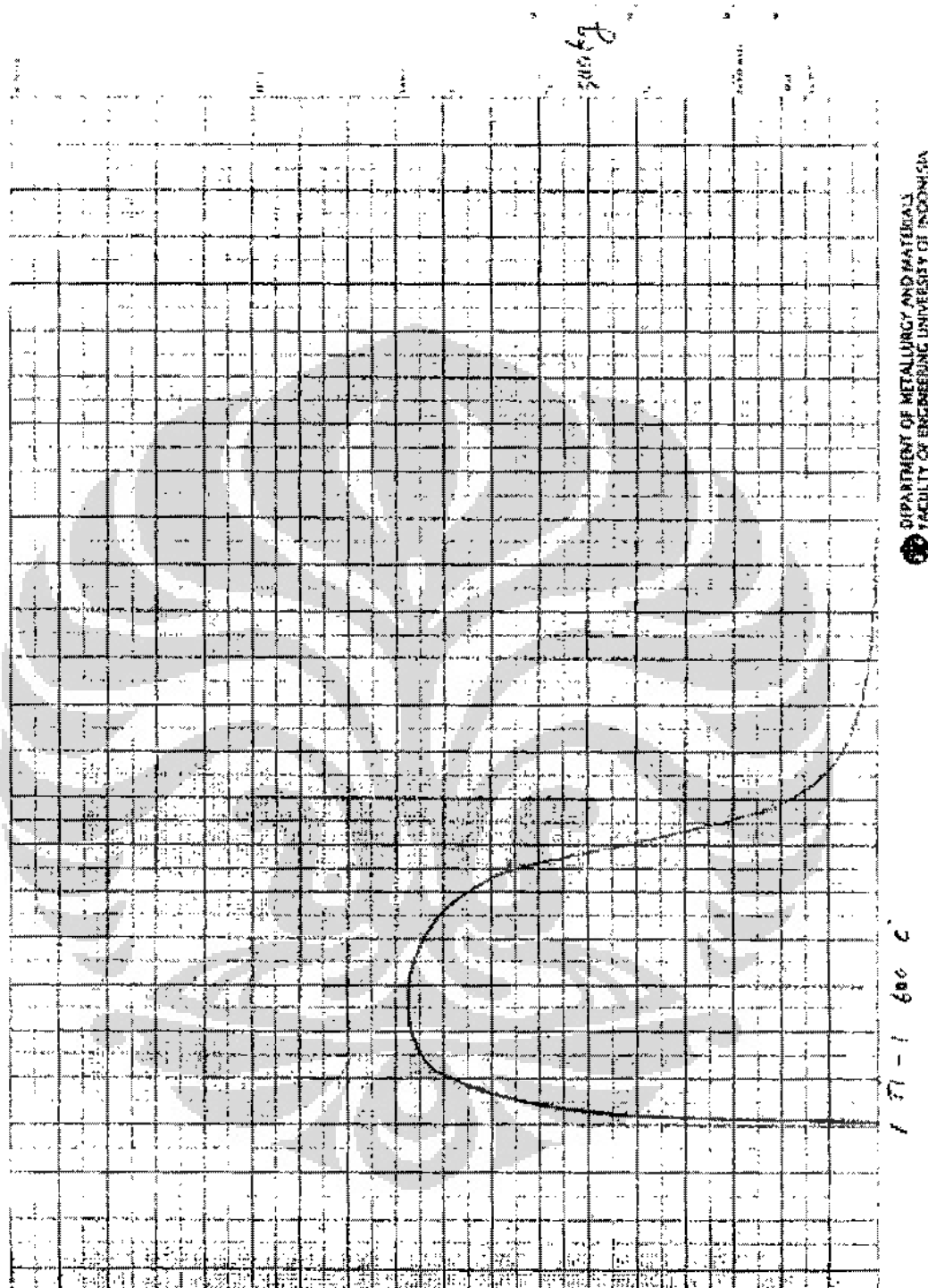


DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

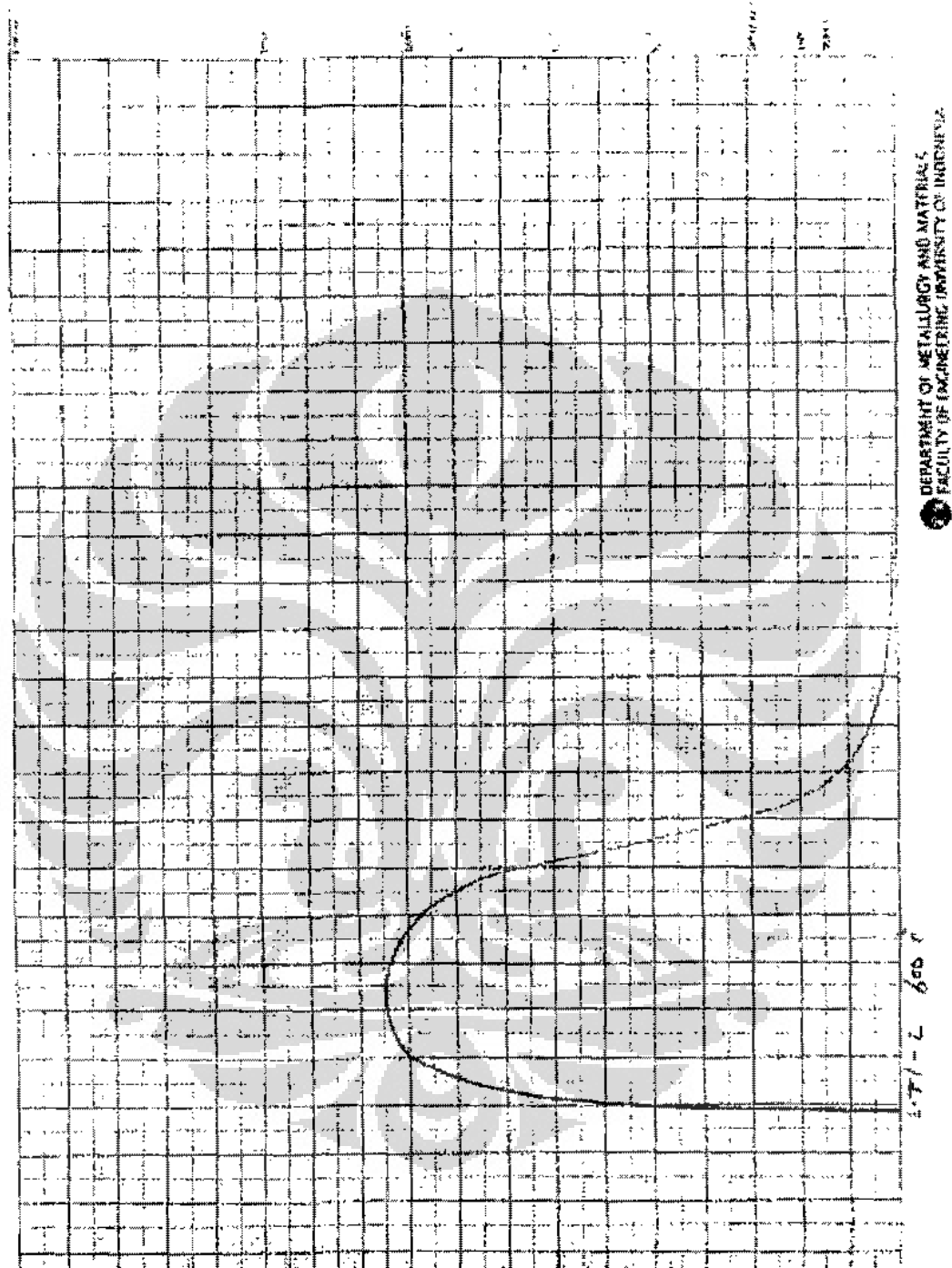
Gambar B.2 Hasil uji tarik temperatur ruang pada benda uji T0-2



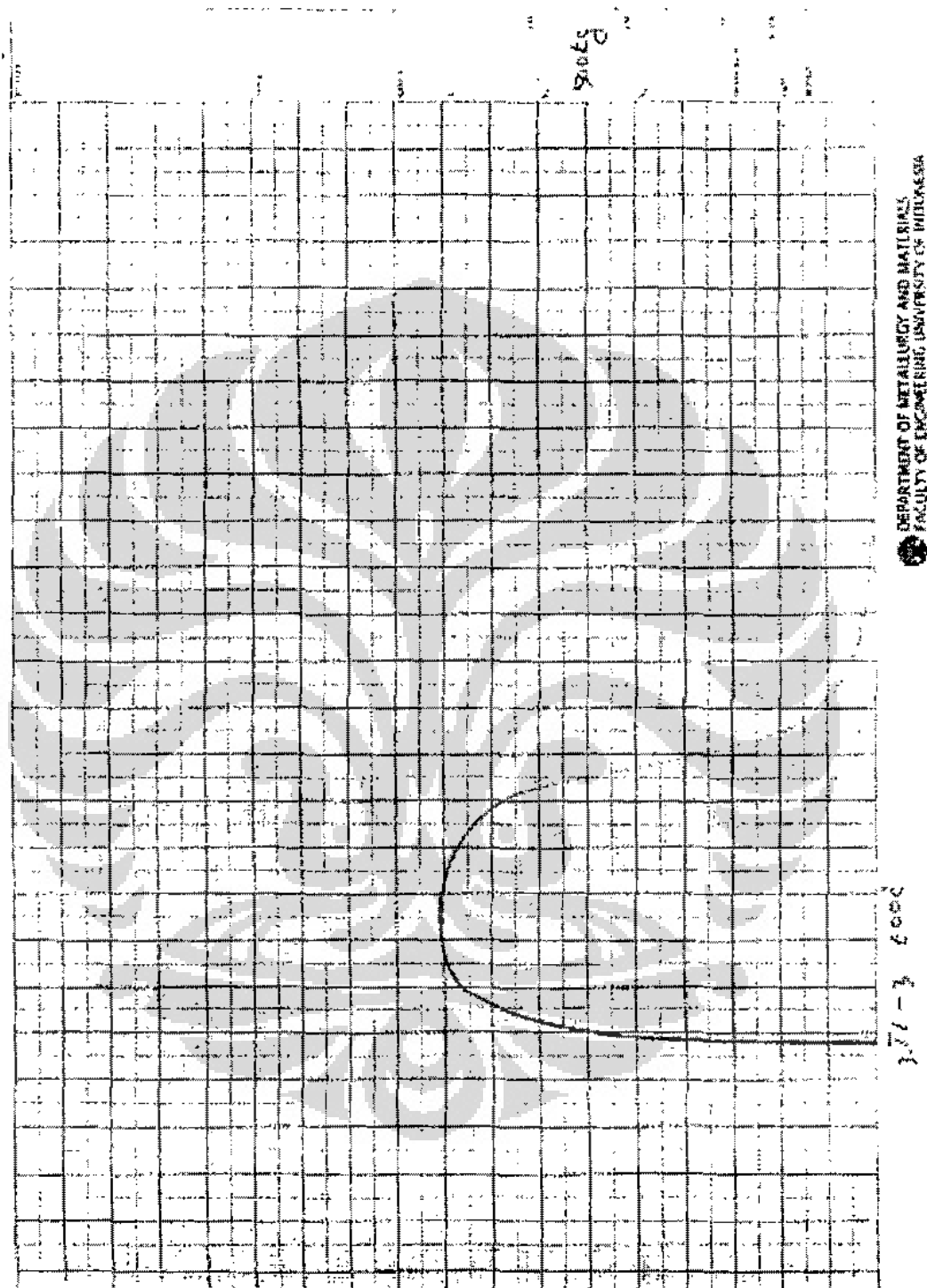
Gambar B.3 Hasil uji tarik temperatur ruang pada benda uji T0-3



Gambar B.4 Hasil uji tarik temperatur 600°C pada benda uji T1-1

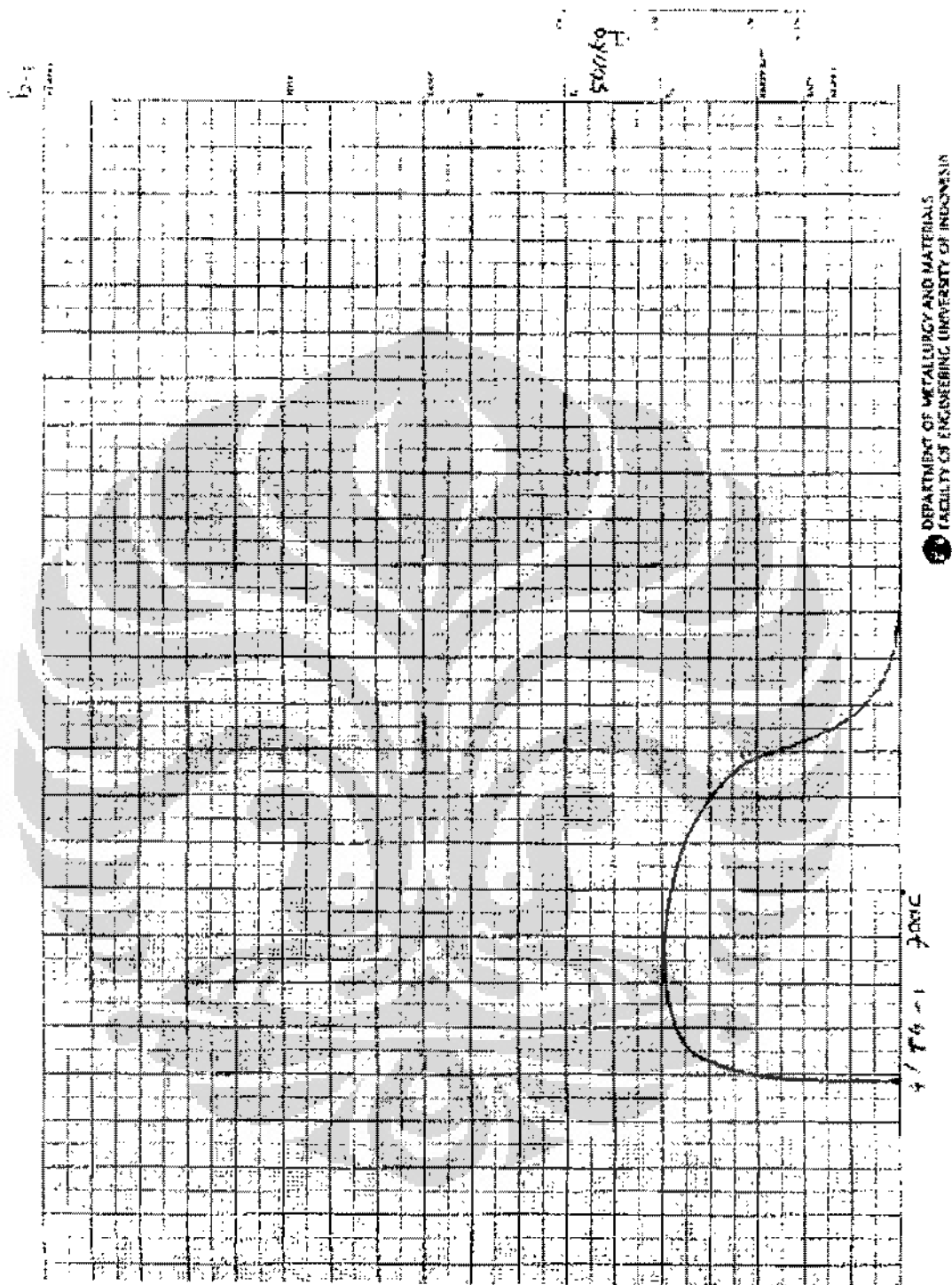


Gambar B.5 Hasil uji tarik temperatur 600°C pada benda uji T1-2

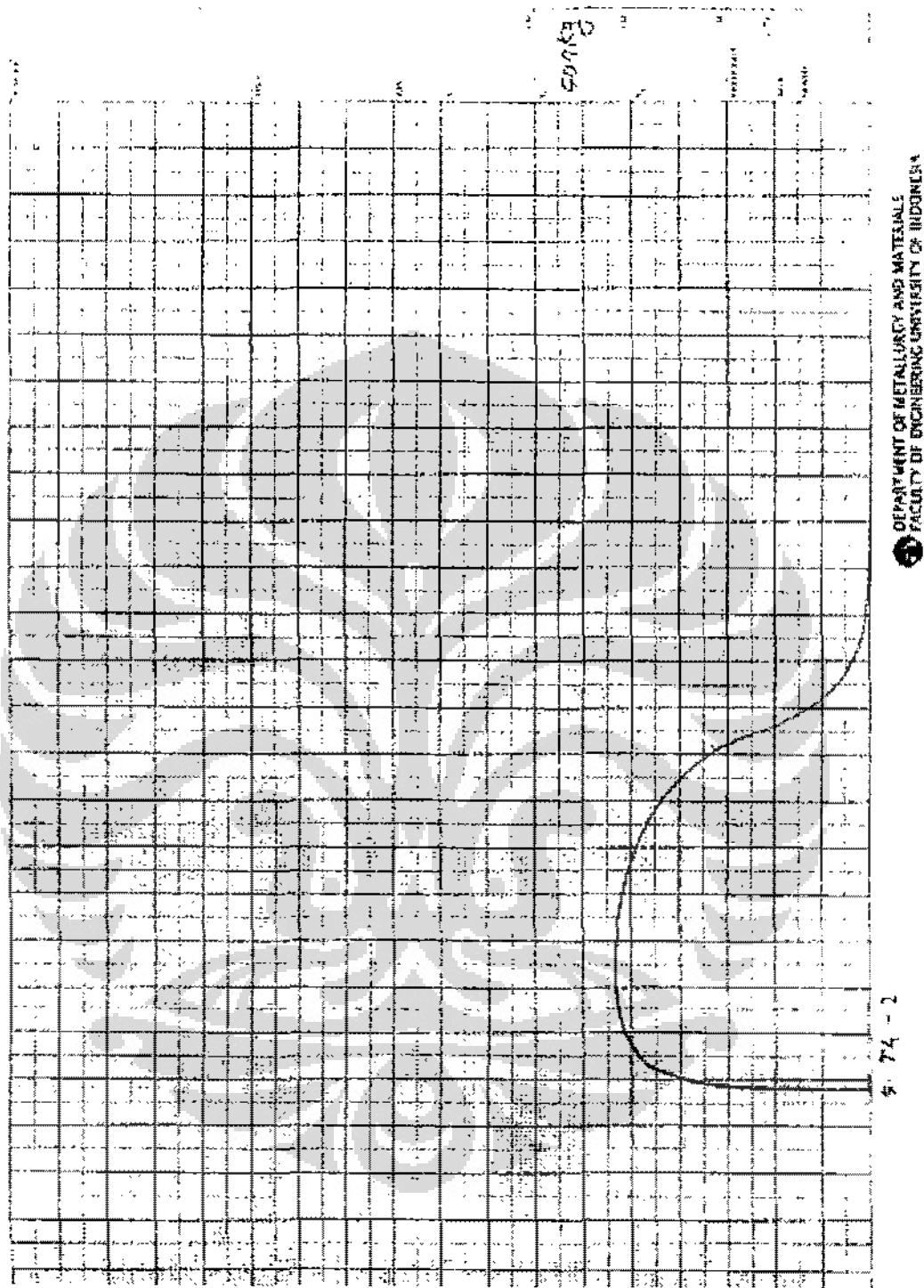


DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

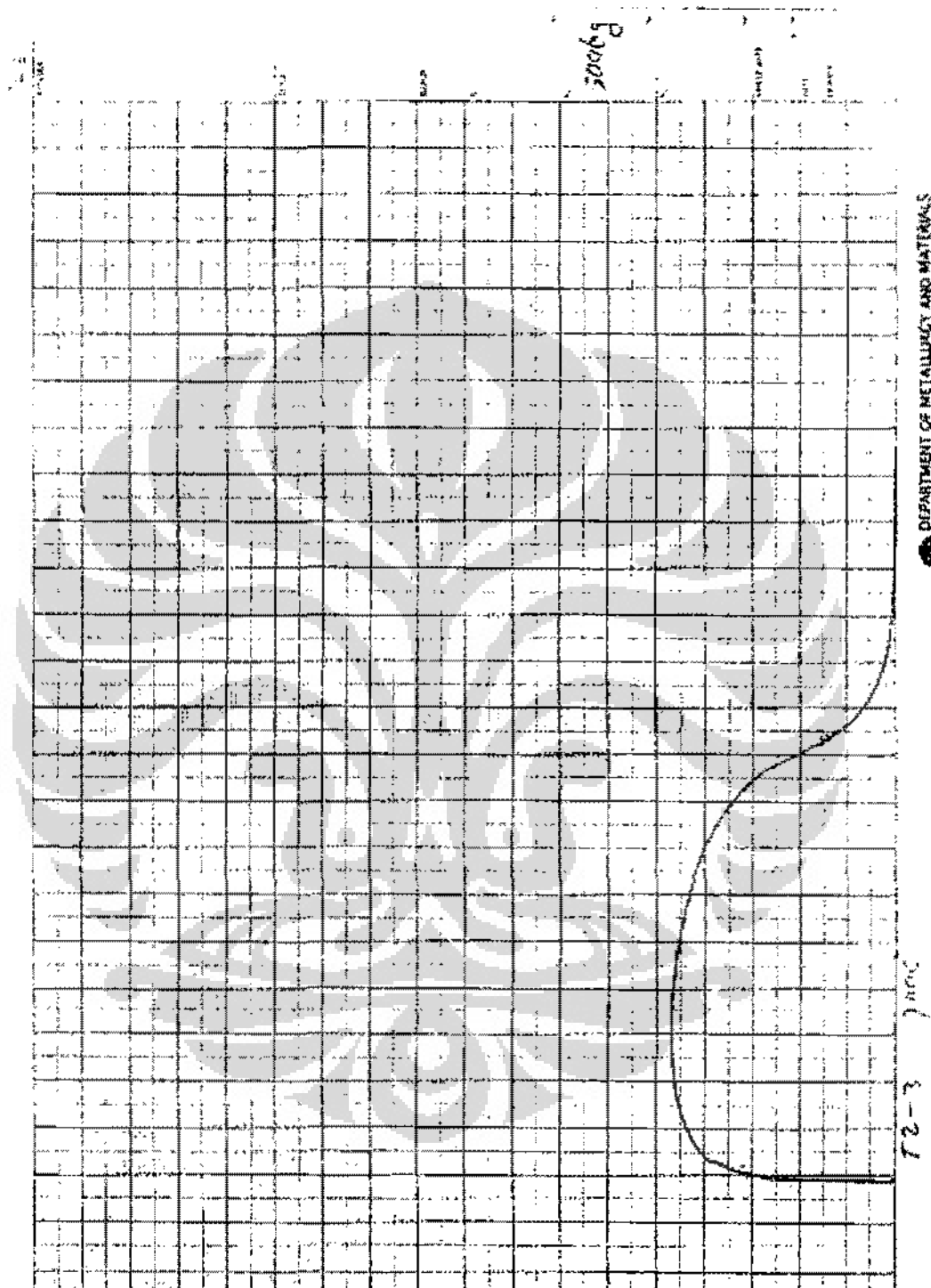
Gambar B.6 Hasil uji tarik temperatur 600 °C pada benda uji T1-3



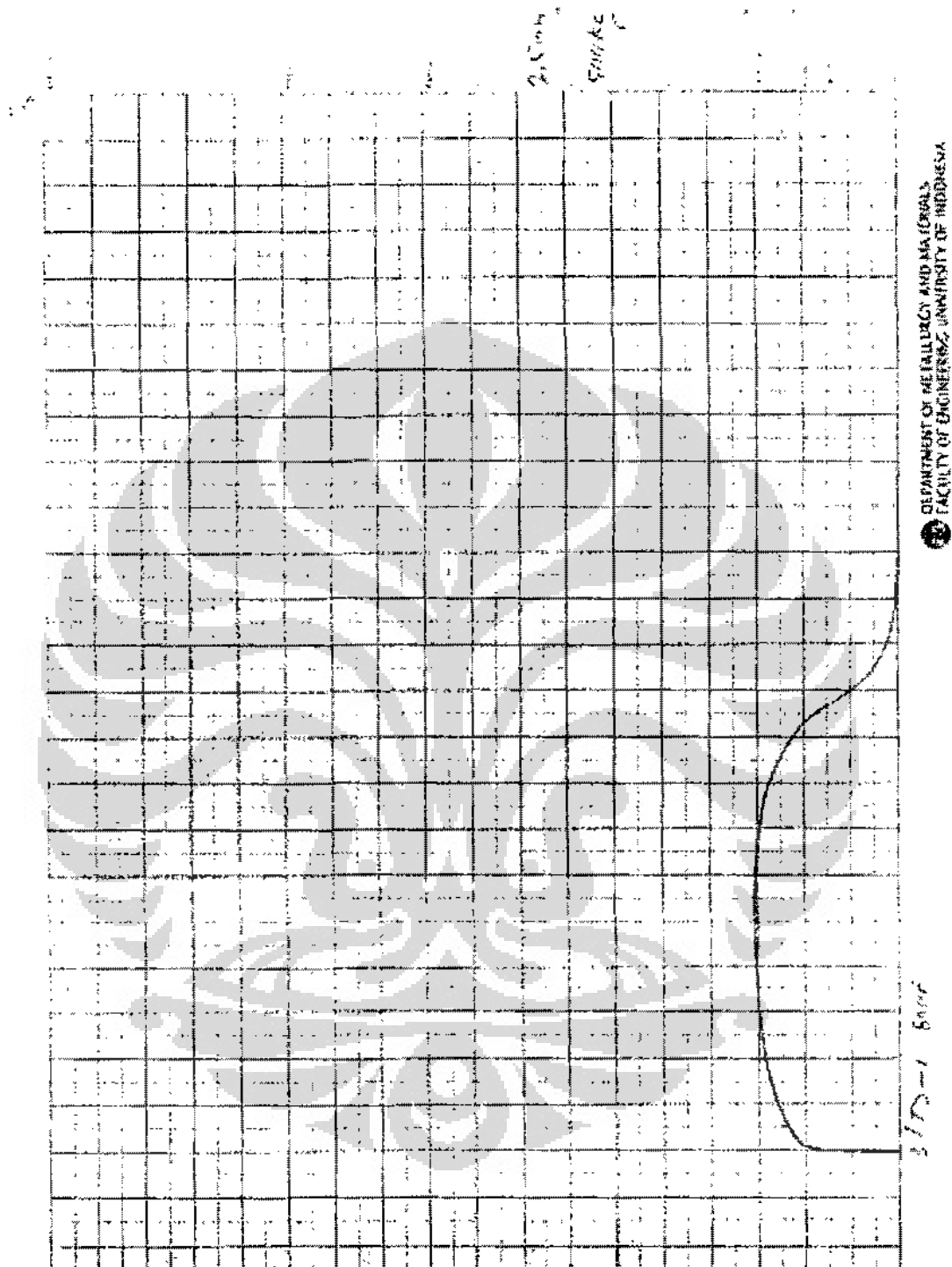
Gambar B.7 Hasil uji tarik temperatur 700 °C pada benda uji T2-1



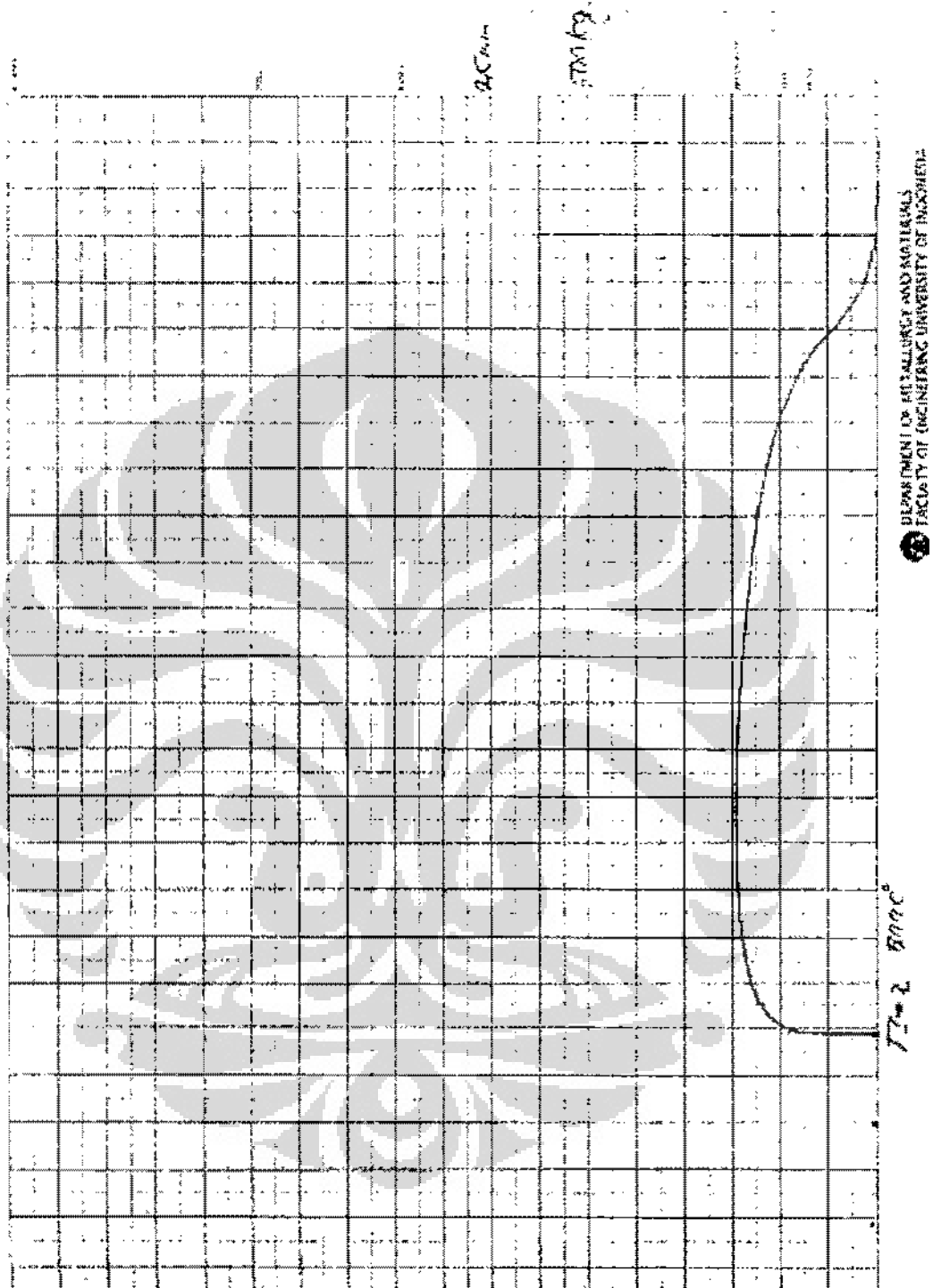
Gambar B.8 Hasil uji tarik temperatur 700 °C pada benda uji T2-2



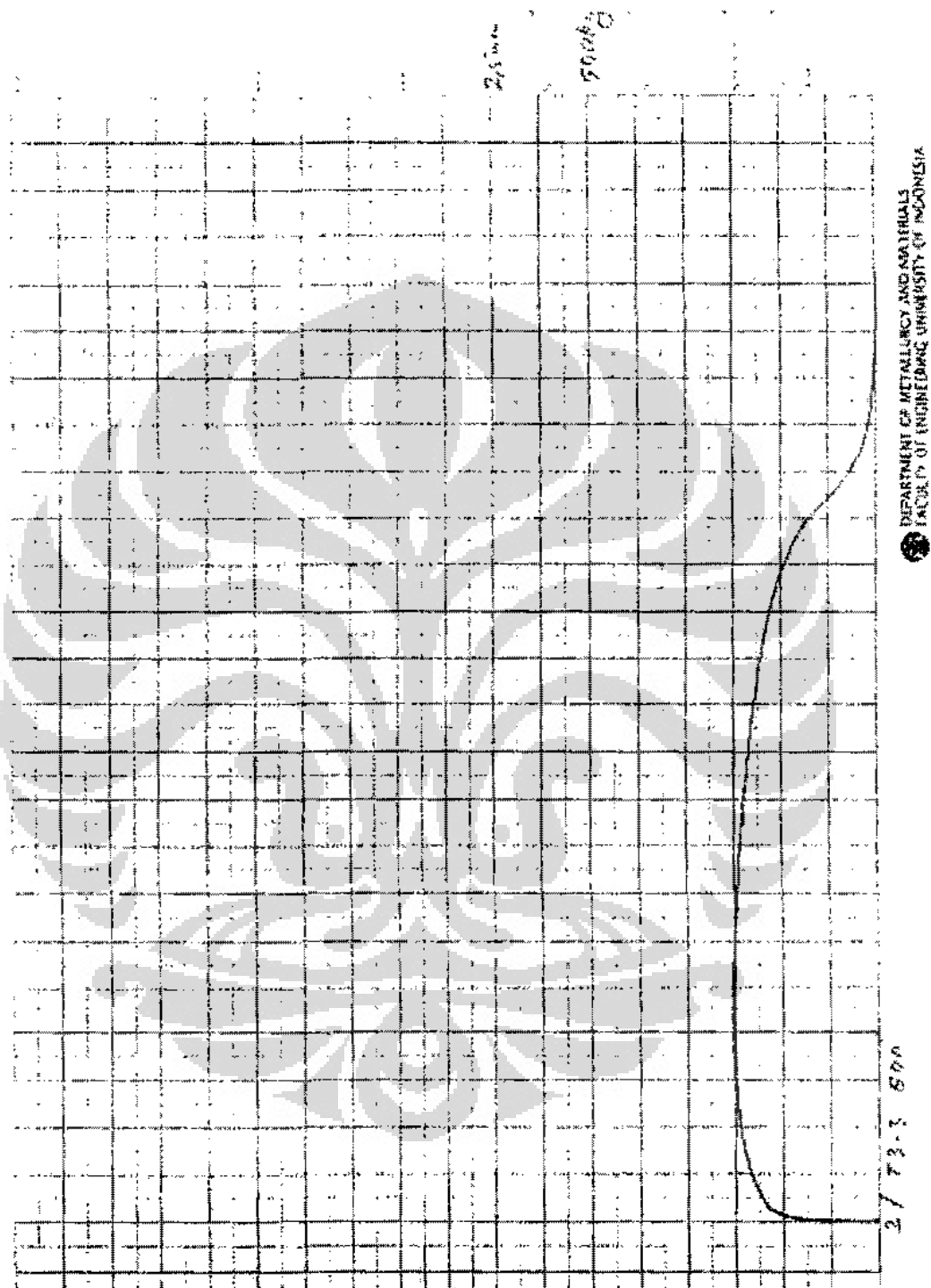
Gambar B.9 Hasil uji tarik temperatur 700 °C pada benda uji T2-3



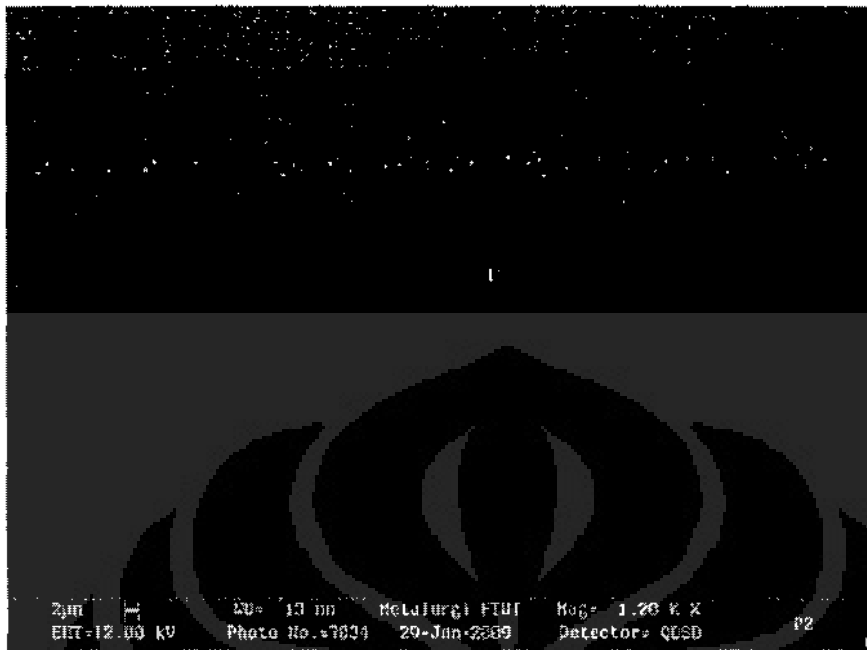
Gambar B.10 Hasil uji tarik temperatur 800°C pada benda uji T3-1



Gambar B.11 Hasil uji tarik temperatur 800 °C pada benda uji T3-2



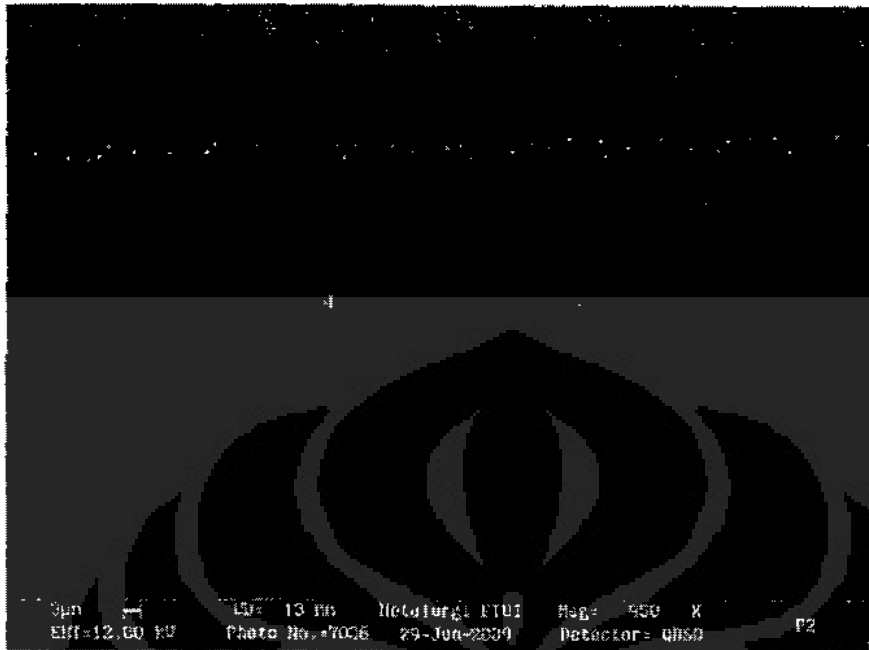
Gambar B.12 Hasil uji tarik temperatur 800 °C pada benda uji T3-3



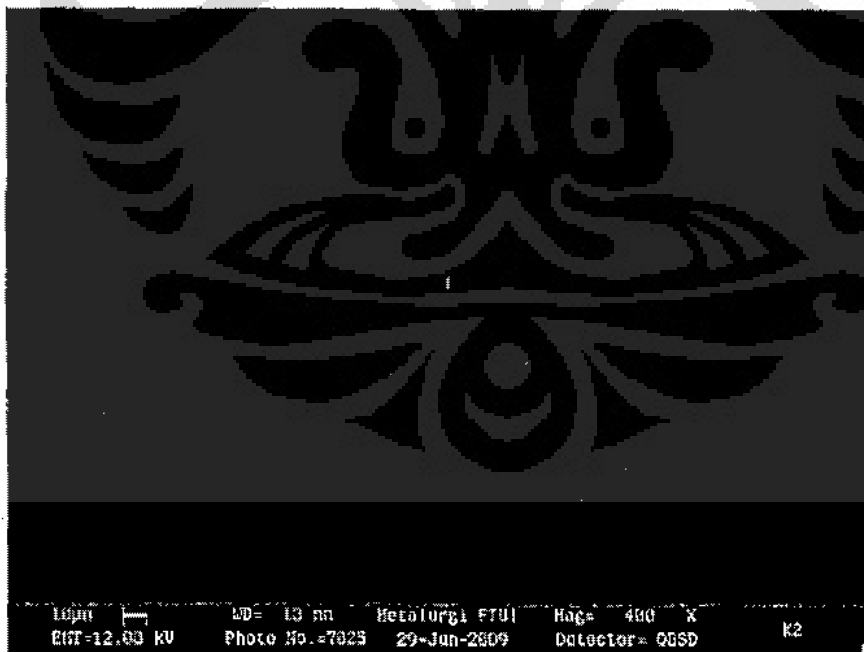
Gambar C.1 Inklusi 1 pada sampel P2 hasil pembentukan temperatur 600 °C.



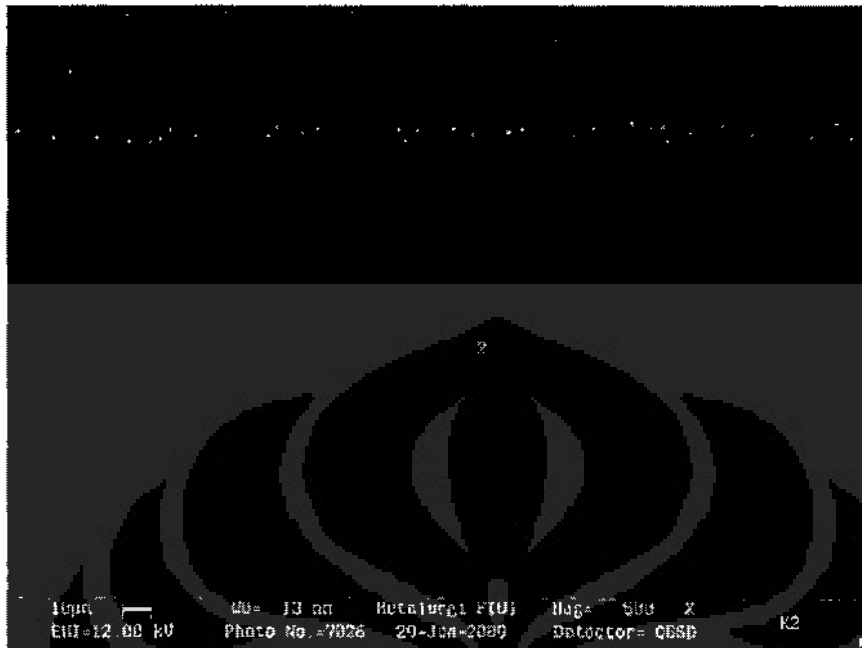
Gambar C.2 Inklusi 2 dan 3 pada sampel P2 hasil pembentukan temperatur 600 °C.



Gambar C.3 Inklusi 4 pada sampel P2 hasil pembentukan temperatur 600 °C.



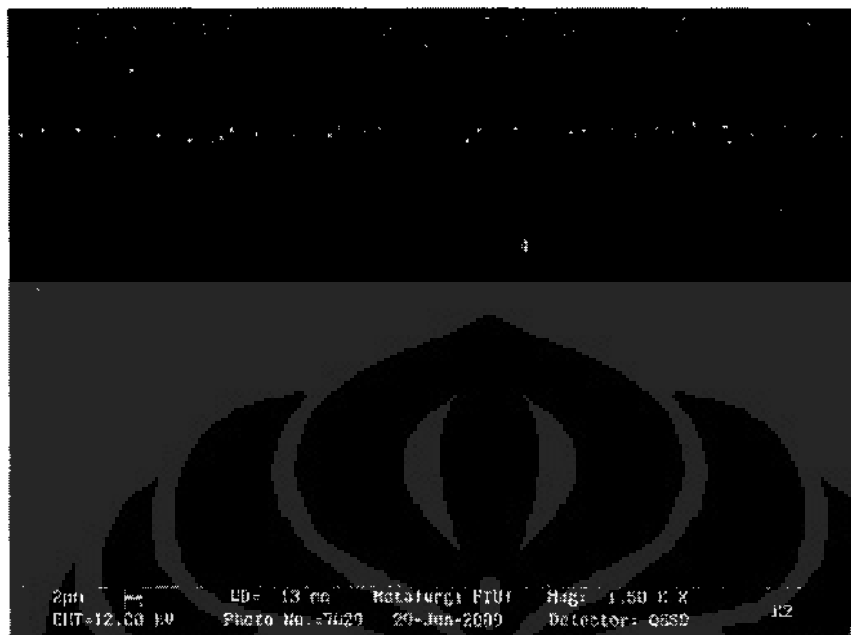
Gambar C.4 Inklusi 1 pada sampel K2 hasil pembentukan temperatur 700 °C.



Gambar C.5 Inklusi 2 pada sampel K2 hasil pembentukan temperatur 700 °C.



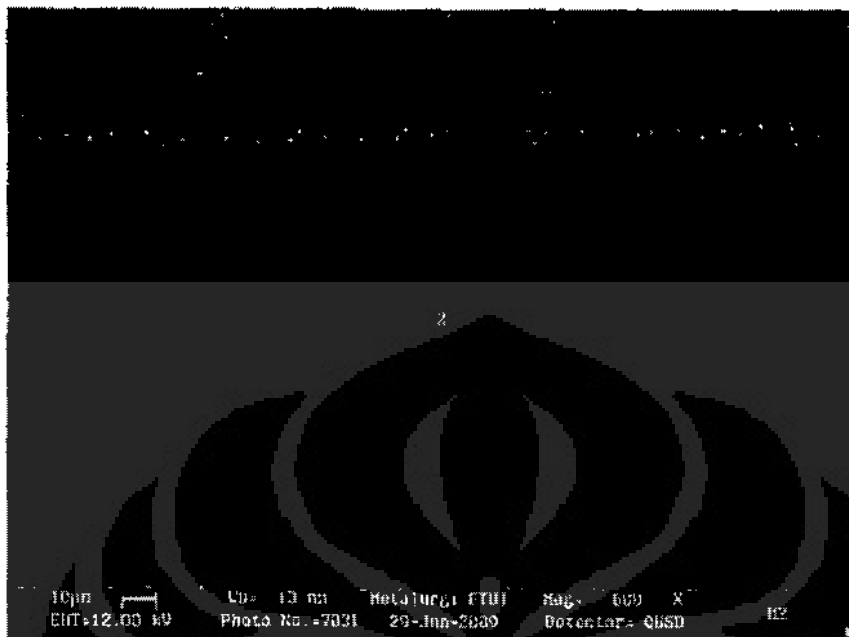
Gambar C.6 Inklusi 3 pada sampel K2 hasil pembentukan temperatur 700 °C.



Gambar C.7 Inklusi 4 pada sampel K2 hasil pembentukan temperatur 700 °C.



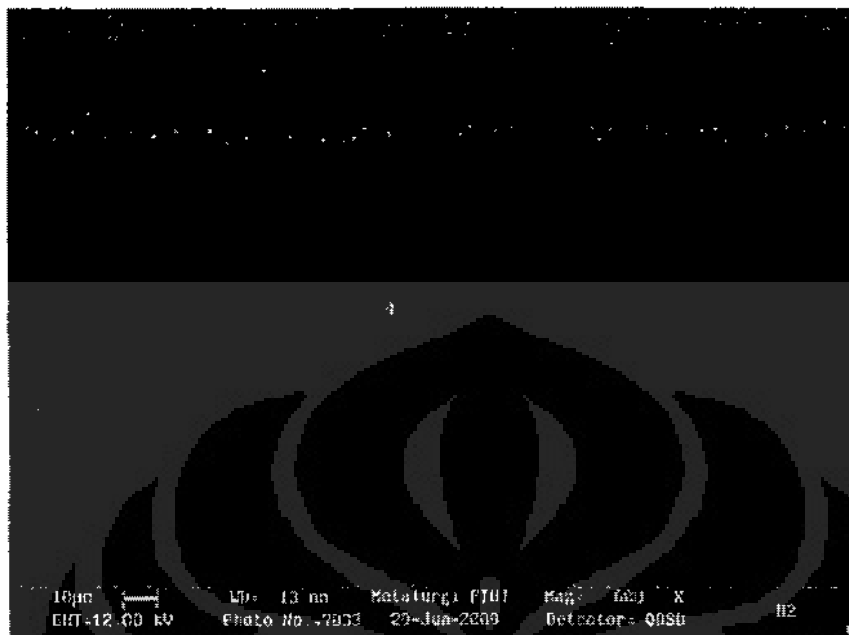
Gambar C.8 Inklusi 1 pada sampel M2 hasil pembentukan temperatur 800 °C.



Gambar C.9 Inklusi 2 pada sampel M2 hasil pembentukan temperatur 800 °C.



Gambar C.10 Inklusi 3 pada sampel M2 hasil pembentukan temperatur 800 °C.



Gambar C.11 Inklusi 4 pada sampel M2 hasil pembentukan temperatur 800 °C.

SEMQuant results. Listed at 15:00:37 on 29/06/09
 Operator: Bain
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: P2 inklusi - 01

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (1 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
S K	ED	11.79	18.83
Mn K	ED	18.23	16.99
Fe K	ED	69.98	64.17
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 15:05:26 on 29/06/09
 Operator: Bain
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: P2 inklusi - 02

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K AL2O3 22/03/06
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	11.02	25.28
Si K	ED	4.53	5.92
S K	ED	25.96	29.72
Mn K	ED	58.49	39.08
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Universitas Indonesia

SEMQuant results. Listed at 15:09:01 on 29/06/09
 Operator: BaIm
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: P2 inklusi - 03

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
S K	ED	26.56	38.36
Mn K	ED	55.44	46.72
Fe K	ED	18.00	14.92
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 15:11:27 on 29/06/09
 Operator: BaIm
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: P2 inklusi - 04

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (1 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
S K	ED	22.58	33.86
Mn K	ED	45.19	39.02
Fe K	ED	31.93	27.12
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Universitas Indonesia

SEMQuant results. Listed at 15:26:23 on 29/06/09
 Operator: Ezim
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: K2 inklusi - 01.

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K AL2O3 22/03/06
 S K FeS2 22/03/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	26.23	53.66
S K	ED	7.17	7.32
Fe K	ED	66.60	39.02
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 15:39:22 on 29/06/09
 Operator: Balm
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: K2 inklusi - 02.

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K AL2O3 22/03/06
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	35.08	57.17
Si K	ED	15.28	14.70
S K	ED	15.01	12.21
Mn K	ED	34.63	16.44
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Universitas Indonesia

SEMQuant results. Listed at 15:11:01 on 29/06/09
 Operator: BaIm
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: K2 inklusi - 03.

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (1 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K AL2O3 22/03/06
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	6.09	16.67
Si K	ED	1.68	2.63
S K	ED	13.97	19.08
Mn K	ED	21.37	17.03
Fe K	ED	56.98	44.60
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 15:51:59 on 29/06/09
 Operator: BaIm
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: K2 inklusi - 04.

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (1 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K AL2O3 22/03/06
 S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	5.66	15.31
S K	ED	19.56	26.37
Mn K	ED	32.37	25.48
Fe K	ED	42.41	32.84
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Universitas Indonesia

SEMQuant results. Listed at 14:47:35 on 29/06/09
 Operator: Baim
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: M2 inklusi - 01

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K AL2O3 22/03/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	36.08	55.19
Fe K	ED	73.92	44.81
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 14:52:07 on 29/06/09
 Operator: Baim
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: M2 inklusi - 02

System resolution = 112 eV

Quantitative method: ZAF (1 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
S K	ED	16.40	25.34
Mn K	ED	32.43	29.25
Fe K	ED	51.18	45.41
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Universitas Indonesia

SEMQuant results. Listed at 14:55:23 on 29/06/09
 Operator: Esim
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: M2 inklusi - 03

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
S K	ED	38.59	51.84
Mn K	ED	61.41	48.16
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 14:57:24 on 29/06/09
 Operator: Bain
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: M2 inklusi - 04

System resolution = 111 eV

Quantitative method: ZAF (1 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

S K FeS2 22/03/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
S K	ED	15.02	23.45
Mn K	ED	24.05	21.92
Fe K	ED	60.93	54.63
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Universitas Indonesia

14Sep06 8:42

TEST CERTIFICATE

No: 1 77



0612043

KREHER
STEEL COMPANY, LLC

P/O No 0060823

Rel

S/O No 1 152613-001

B/L No 1 124444-001

Inv No

Shp 196sp

Inv

Sold To: (7878)
PT BINDER INDONESIA
BINDER GROUP
JL. PANGERAN DIPONEGORO
NO. 108 DEGA JATI MULYA
TAMBUN-BEKASI INDONESIA 17510

Ship To: (000)
CPU

Tel: 62218822150 Fax: 62218807334

CERTIFICATE of ANALYSIS and TESTS

Cert. No: 1 778
14Sep

Part No
HOT ROLLED ROUNDS 1021
1.0000 X 20'

ASTM A36-01

CHEMICAL REQUIREMENTS:

	TO .750"	OVER .750" TO 1.500"	OVER 1.500" TO 4.000"
C	.180	-.26	-.27
Mn	.56	-.60/.90	-.60/.90
P	.011	-.040	-.040
S	.024	-.050	-.050
Si	.27	-.40	-.40

Heat Number
S02058

*** Chemical Analysis ***
C<.18> Mn<.66> P<.011> S<.024> Si<.27> Cu<.19> Ni<.076>
Cr<.174> Mo<.035> Al<.006> V<.037> Sn<.012> Cb<.015>
B<.0002> Nb<.0024> Ti<.0028> GR<.8> Ca<.0012>

*** Jominy Tests ***

1=	2=	3=	4=	5=	6=	7=	8=
9=	10=	12=	14=	16=	18=	20=	24=
28=	32=						

I hereby certify that this data is correct as
contained in the records of this company.

Page: 1 Last

Gambar D.1. Komposisi kimia berdasarkan Mill Certificate dari supplier



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, 736 3510 Fax : 021 - 7868 111 E-mail : cmf@metall.u.ac.id

LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA COMPOSITION TEST REPORT

(Hal 1 dari 1)

No Laporan	0281	Ribuan	Steel
Report by		Ahmad Ivan	
Pemakai Jasa	Bpk. Herry Oktadinata	Identitas Bahan	ASTM A 36
Customer		Material Identity	
Akreditasi	S2 Teknik Stearnbergi FTUI	Tanggal Terima	13 Mei 2009
Address		Receiving Date	
No Kontrak	0474/PT/02/PT04/P/2009	Standar	ASTM A 751
Contract No.		Standards	
Tanggal Uji	7 Mei 2009	Media Uji	Optical Emission Spectrometer
Date of Test		Testing machine	

Kode Sampel Sample Code	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Cu (%)
ASTM A 36	0.163	0.113	< 0.003	0.008	0.468	0.135	0.190
	Mo (%)	Ni (%)	Al (%)	Nb (%)	V (%)		
	0.023	< 0.001	0.232	< 0.002	< 0.002	< 0.001	98.602

ASTM A 36 Standard	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Cu (%)
	0.25 max.	0.60 - 0.90	0.04 max.	0.05 max.	0.40 max.	0.40 max.	0.40 max.

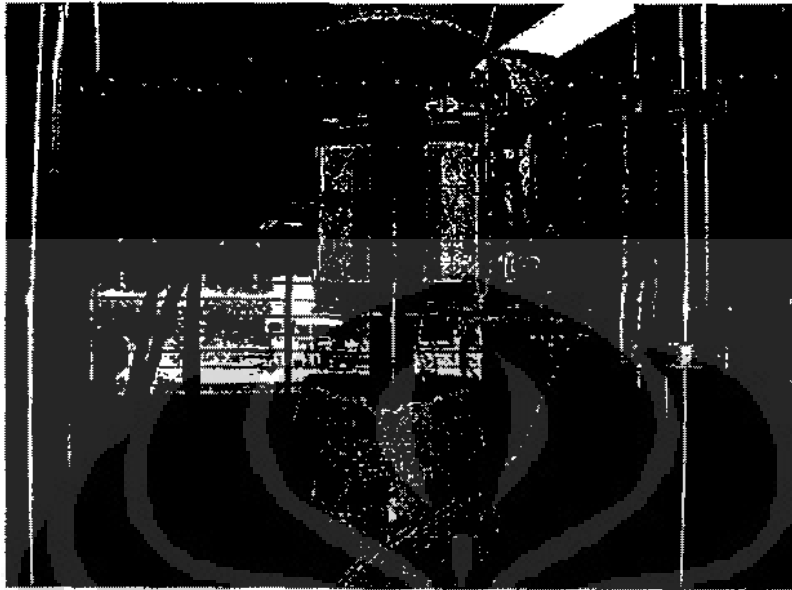
The chemical composition of this tested material does not conform to the ASTM A 36 standard.

Depok, 8 Mei 2009
LABORATORIUM UJI MATERIAL
Manajer Teknis,

(Ahmad Ivan Karuyon, ST, M.Eng)

Laporan hasil pengujian ini hanya berlaku untuk sampel yang diuji di Laboratorium Uji Material; periksa seri pengujian dan tanggal terbitnya sebagai bagian dari pedoman lain yang diterbitkan dari Laboratorium Uji Material.

Gambar D.2 Komposisi kimia hasil pengujian



Gambar E.1 Mesin uji tarik dan dapur pemanas



Gambar E.2 Mesin uji SEM



Gambar E.3 Sampel uji tarik temperatur tinggi.



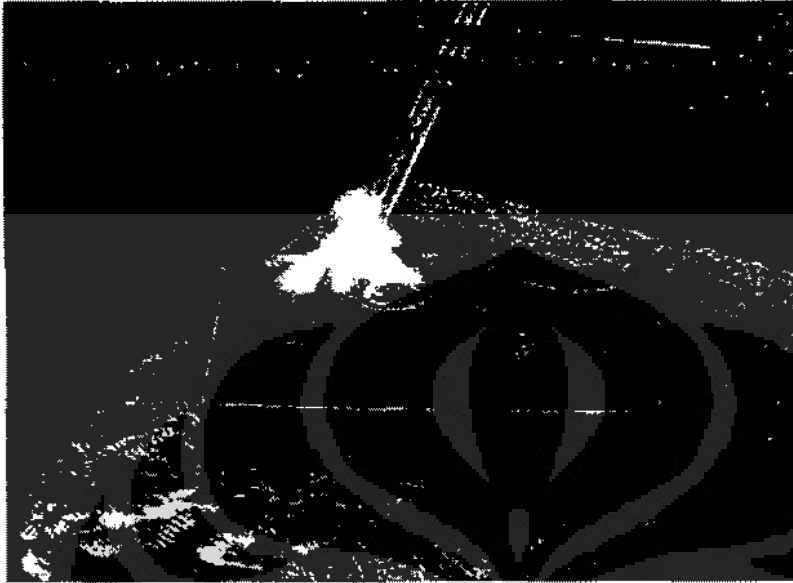
Gambar E.4 Patahan sampel uji tarik temperatur 600, 700, 800 °C.



Gambar E.5 Pemotongan bahan baku dengan mesin *bandsaw*



Gambar E.6 Perlengkapan oksigen dan *acetylene* untuk pembakaran



Gambar E.7 Proses pembentukan *welded eye bolt*



Gambar E.8 Pengontrolan temperatur pembentukan



Gambar E.9 Sampel pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C



Gambar E.10 Cuplikan sampel uji SEM



Gambar E.11 Sampel analisa EDX