



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGHALUSAN BUTIR MATERIAL KUNINGAN MELALUI
PROSES *EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING* DENGAN
SUDUT CETAKAN 120°**

SKRIPSI

KUSWARINI
0806331651

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGHALUSAN BUTIR MATERIAL KUNINGAN MELALUI
PROSES *EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING* DENGAN
SUDUT CETAKAN 120°**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

KUSWARINI
0806331651

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Kuswarini

NPM : 0806331651

Tanda Tangan : 

Tanggal : Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Kuswarini
NPM : 0806331651
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi :

PENGHALUSAN BUTIR MATERIAL KUNINGAN MELALUI PROSES *EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING* DENGAN SUDUT CETAKAN 120°

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

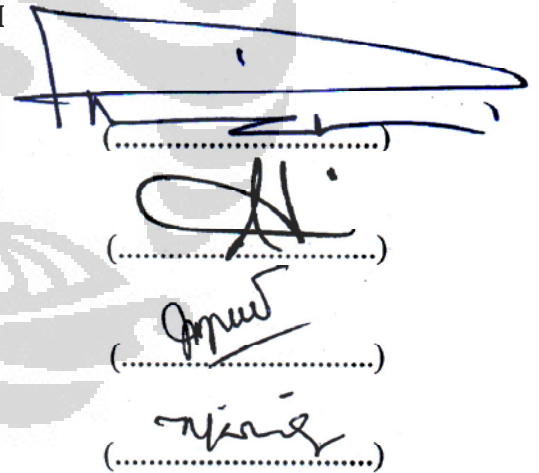
DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Prof. Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA

Pembimbing 2 : Ir. Suryadi, MT

Penguji 1 : Dr. Myrna Ariati Mochtar MS

Penguji 2 : Ir. Rini Riastuti, M.Sc



(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan anugerahNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi tanpa kekurangan suatu apapun. Kegiatan skripsi ini merupakan mata kuliah wajib yang merupakan persyaratan kelulusan mahasiswa S1 Fakultas Teknik UI.

Dalam melakukan penelitian dan penulisan, penulis sadar penuh bahwa penulis tidak akan mampu mengerjakan sendiri dengan baik dan tepat waktu tanpa dukungan dan bantuan dari banyak pihak. Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada:

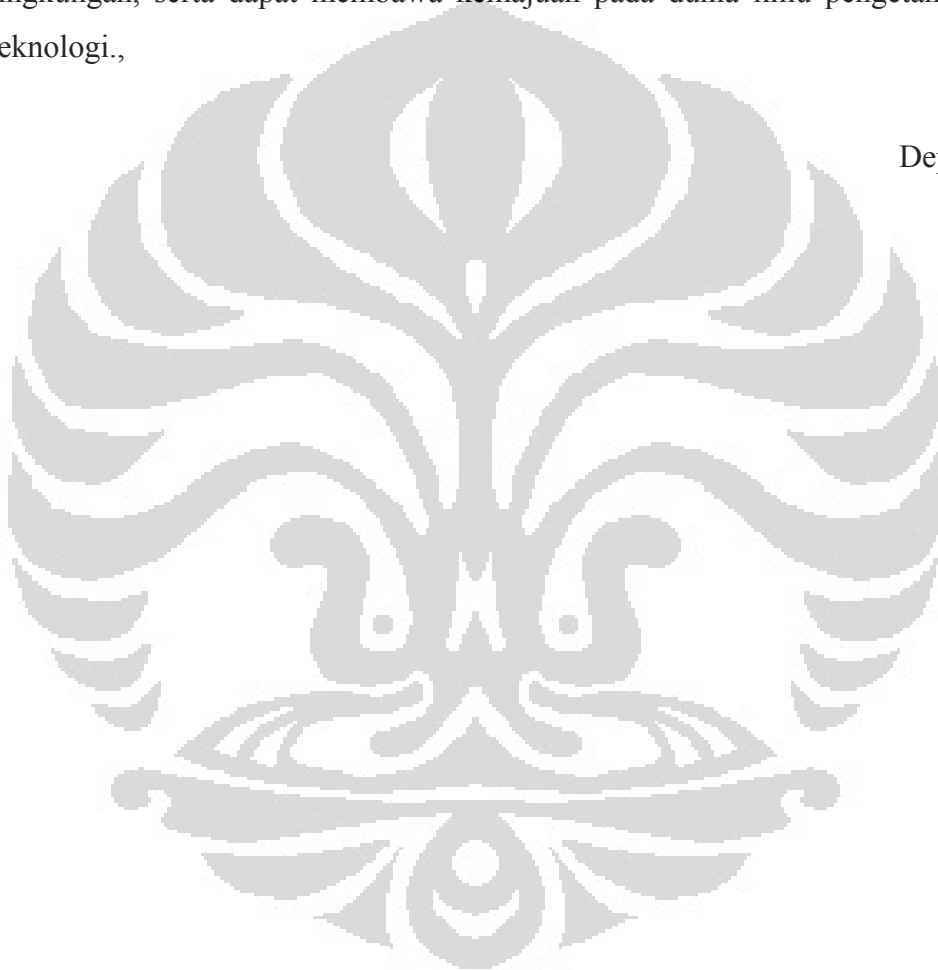
1. Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA, selaku dosen pembimbing 1 yang telah bersedia memberikan waktu dan kesempatannya dalam memberikan bimbingan, arahan, pemikiran dan bantuan yang tak terhitung besarnya pada penulis, sehingga penulis dapat mengerjakan hingga selesai skripsi ini.
2. Ir. Suryadi, MT, selaku pembimbing 2 yang telah bersedia memberikan waktu dan kesempatannya dalam memberikan arahan dan bantuan serta menjadi tempat bertanya setiap saat, hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Prof. Dr. –Ing. Ir. Bambang Suharno selaku Ketua Departemen yang turut memberi dukungan selama penulis menjalani perkuliahan di DMM FTUI;
4. Kedua orang tua dan keluarga penulis yang senantiasa memberikan semangat, waktu, dan juga mendukung secara finansial perjalanan pembuatan skripsi ini sejak dimulai hingga akhir penyelesaian skripsi ini.
5. Aditya Indra Bayu, pacar dan sahabat baik yang selalu setia setiap saat membantu penulis selama proses pengerjaan skripsi.
6. M. Aqil Mustaqbal, rekan seperjuangan dalam melaksanakan penelitian ini yang selalu membantu penulis dan berbagi semangat dalam suka duka melakukan penelitian dan penulisan.
7. Seluruh staf LIPI dan MEPPPO yang membantu dalam pengerjaan dies dan senantiasa membagi ilmu untuk membantu penulisan laporan.

8. Seluruh teman-teman penulis yang senantiasa memberikan semangat untuk menyelesaikan penyusunan skripsi.
9. Penulis juga berterima kasih untuk setiap komponen masyarakat yang telah menjadikan skripsi ini dapat dikerjakan

Penulis mungkin tidak akan pernah dapat membalas seluruh kebaikan dari seluruh pihak, kiranya Tuhan sendiri yang akan membalasnya melalui caraNya yang ajaib. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi banyak orang dan berdampak pada lingkungan, serta dapat membawa kemajuan pada dunia ilmu pengetahuan dan teknologi.,

Depok, Juli

Penulis



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

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

Nama : Kuswarini
NPM : 0806331651
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

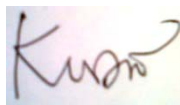
**PENGHALUSAN BUTIR MATERIAL KUNINGAN MELALUI
PROSES *EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING* DENGAN
SUDUT CETAKAN 120°**

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

Demikian pernyataan ini penulis buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : Juli 2012

Yang menyatakan,



(Kuswarini)

ABSTRAK

Nama : Kuswarini
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul :

PENGHALUSAN BUTIR MATERIAL KUNINGAN MELALUI PROSES *EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING* DENGAN SUDUT CETAKAN 120°

Salah satu teknik perubahan bentuk yang dapat digunakan untuk menghaluskan butir adalah teknik *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP), salah satu dari metode *Severe Plastic Deformation* (SPD). Dalam penelitian ini ECAP dilakukan pada material kuningan alfa atau *cartridge brass*, material yang memiliki ketangguhan dan mampu bentuk yang baik. ECAP dilakukan melalui penekanan pada material dalam *dies* untuk meningkatkan sifat mekanis dari material. Deformasi plastik yang terjadi pada material saat proses penekanan sangat dipengaruhi oleh geometri dari cetakan, oleh karena itu dipilih sudut 120° pada *dies* ECAP. Hasil dari studi ini adalah didapaknya peningkatan kekerasan dari 73 HV menjadi 210 HV, dan penurunan diameter butir dari 34 μm menjadi 6,85 μm melalui ECAP sebanyak 3 kali laluan dengan besar peregangan 1,90.

Kata kunci:

Kuningan alfa, SPD, ECAP, mikrostruktur

ABSTRACT

Name : Kuswarini
Study Program : Metallurgy and Material Science Engineering
Title :

BRASS MATERIAL GRAIN REFINING THROUGH *EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING PROCESSING* BY 120° OF DIES ANGLE

To hugely increase mechanical properties of metal, grain refining can be applied. One of the most popular and old way to acquire fine grain is Equal Channel Angular Pressing (ECAP), one of Severe Plastic Deformation (SPD) method. In this experiment, alpha brass or cartridge brass is used because it has a good toughness and formability. ECAP is performed by pressing a sample inside dies to increase mechanical properties without losing its formability. The plastic deformation within material during pressing is mainly governed by geometry, therefore 120 degree is chosen as dies angle. The results of this study indicate hardness increasing from 73 HV to 210 HV, and grain refining from 34 μm to 6.85 μm under ECAP with three times of passing by 1.90 straining

Keywords:

Alpha brass, SPD, ECAP, microstructure

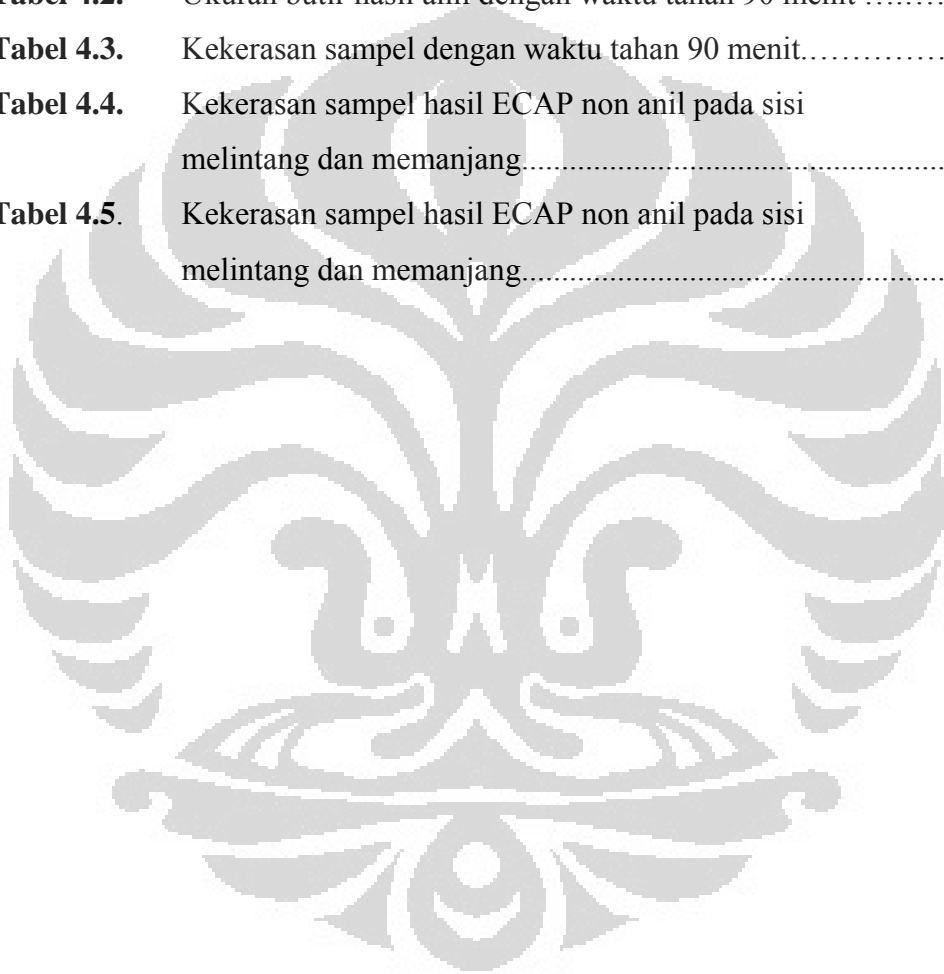
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR SINGKATAN.....	xiv
DAFTAR RUMUS.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.4.1 Material.....	3
1.4.2 Parameter Penelitian.....	3
1.4.3 Tempat Penelitian.....	4
1.5 Hipotesis.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 DASAR TEORI.....	7
2.1 CuZn (Kuningan).....	7
2.2 Pengaruh Anil Pada Sifat Mekanis.....	8
2.3 Recovery, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir.....	10
2.3.1 Recovery.....	10
2.3.2 Rekristalisasi.....	11
2.3.3 Pertumbuhan Butir.....	12
2.4 SPD (Severe Plastic Deformation).....	12
2.5 ECAP (Equal Channel Angular Pressing) pada CuZn.....	13
2.6 ECAP dengan Sudut 120°.....	16
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	17
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	17
3.2 Alat dan Bahan.....	18
3.3 Prosedur Penelitian.....	18
3.3.1 Material.....	18
3.3.2 Proses Anil Pra ECAP.....	19
3.3.3 Pengujian ECAP.....	19

3.3.4	Anil Pasca ECAP.....	20
3.4	Pengamatan Metalografi.....	20
3.4.1	Persiapan Benda Uji	20
3.4.2	Pengamatan Mikrostruktur	23
3.4.3	Perhitungan Ukuran Butir	23
3.5	Pengujian Kekerasan Mikro	24
BAB 4	PEMBAHASAN	26
4.1	Proses Anil Pra ECAP	26
4.1.1	Analisis Struktur Mikro	27
4.1.2	Perhitungan Ukuran Butir.....	29
4.1.3	Pengukuran Kekerasan Mikro	30
4.2	Pengujian ECAP 120°	32
4.2.1	Analisis Visual	32
4.2.1.1	ECAP 1 kali passing	33
4.2.1.2	ECAP 2 kali passing	34
4.2.1.3	ECAP 3 kali passing	34
4.2.2	Analisis Struktur Mikro	35
4.2.2.1	Sampel Non Anil	37
4.2.2.2	Sampel Anil.....	38
4.2.3	Perhitungan Ukuran Butir	38
4.2.3.1	Sampel Non Anil	39
4.2.3.2	Sampel Anil	39
4.2.4	Analisis Kekerasan Mikro	39
4.2.4.1	Sampel Non Anil	41
4.2.4.2	Sampel Anil	45
4.3	Hubungan Regangan dengan Diameter Butir.....	46
4.4	Hubungan Diameter Butir dengan Kekerasan.....	47
4.5	Hubungan Diameter Butir dengan Tegangan Tarik.....	47
BAB 5	KESIMPULAN.....	48
	DAFTAR PUSTAKA.....	49

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Beberapa contoh metode proses SPD	13
Tabel 3.1. Komposisi kimia <i>dies</i> ECAP SKD 11.....	20
Tabel 4.1. Komposisi kimia <i>cartridge brass</i>	26
Tabel 4.2. Ukuran butir hasil anil dengan waktu tahan 90 menit	29
Tabel 4.3. Kekerasan sampel dengan waktu tahan 90 menit.....	31
Tabel 4.4. Kekerasan sampel hasil ECAP non anil pada sisi melintang dan memanjang.....	40
Tabel 4.5. Kekerasan sampel hasil ECAP non anil pada sisi melintang dan memanjang.....	41




DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Diagram fasa Kuningan	7
Gambar 2.2. Pengaruh temperatur anil pada kekuatan tarik keuletan, dan ukuran butir pada logam kuningan	9
Gambar 2.3. Pengaruh temperatur dan waktu tahan anil terhadap ukuran butir logam kuningan	10
Gambar 2.4. Skematik Proses <i>Recovery</i>	11
Gambar 2.5. Foto mikro dari beberapa tahapan rekristalisasi dan pertumbuhan butir dari kuningan.....	11
Gambar 2.6. Skema proses ECAP	14
Gambar 2.7. Perubahan butir pada proses ECAP	14
Gambar 2.8. Macam-macam rute <i>passing</i> pada proses ECAP	15
Gambar 2.9. ECAP dengan Sudut 120°	16
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	17
Gambar 3.2. Dapur Pemanas Naber (Laboratorium Teknik Pengubahan Bentuk DTMM FTUI).....	19
Gambar 3.3. Bagian Benda Uji yang akan Diamati Mikrostrukturnya.....	21
Gambar 3.4. Pantulan sinar dari material yang permukaannya telah dietsa	23
Gambar 3.5. Mikroskop Optik (DTMM FT UI).....	23
Gambar 3.6. Contoh gambar mikrostruktur dengan perhitungan butir menggunakan metode planimetri.....	24
Gambar 3.7. (a) Alat uji Vickers (Lab Uji Merusak DTMM FTUI) dan (b) metode uji Vickers.....	25
Gambar 4.1 Sampel anil setelah dikeluarkan dari <i>furnace</i>	26
Gambar 4.2. Sampel anil 500°C <i>holding</i> 90 menit.....	27
Gambar 4.3. Cacat pada mikrostruktur akibat permesinan.....	28
Gambar 4.4. Sampel anil <i>holding</i> 90 menit.....	29
Gambar 4.5. Skema pembesaran butir.....	30

Gambar 4.6.	Grafik hubungan temperatur dan diameter butir sampel hasil anil.....	30
Gambar 4.7.	Grafik hubungan temperatur dan kekerasan sampel hasil anil	31
Gambar 4.8.	Proses pengujian ECAP menggunakan mesin tekan hidrolik..	32
Gambar 4.9.	Sampel hasil ECAP dengan sudut 120°.....	33
Gambar 4.10.	Proses Pengujian ECAP 120°.....	33
Gambar 4.11.	Foto mikro sampel yang akan di-ECAP dengan perbesaran 500 x.....	34
Gambar 4.12.	Skematik pemotongan sampel hasil ECAP 120°.....	35
Gambar 4.13.	Foto mikro sampel hasil ECAP pada perbesaran 500 x.....	36
Gambar 4.14.	Hasil ECAP aluminium sudut cetakan 90° dengan rute C.....	37
Gambar 4.15.	Skematik sistem slip pada material ECAP dengan rute Bc.....	37
Gambar 4.16.	Struktur mikro sampel hasil ECAP 2 kali passing.....	37
Gambar 4.17.	Struktur mikro sampel hasil ECAP Al sudut 90° dengan rute 8C.....	38
Gambar 4.18.	Grafik diameter butir sampel sebelum dan sesudah ECAP.....	39
Gambar 4.19.	Grafik perbedaan diameter butir sampel sebelum dan sesudah ECAP.....	41
Gambar 4.20.	Grafik kekerasan sampel ECAP tanpa proses anil.....	42
Gambar 4.21.	Grafik kekerasan sampel ECAP setelah dianil.....	43
Gambar 4.22.	Cacat hasil ECAP.....	43
Gambar 4.23.	Grafik perbandingan kekerasan pada penampang melintang sampel tanpa dan dengan anil.....	44
Gambar 4.24.	Grafik perbandingan kekerasan pada penampang memanjang sampel tanpa dan dengan anil.....	45
Gambar 4.25.	Grafik perbandingan regangan dengan ukuran diameter butir..	45
Gambar 4.26.	Grafik hubungan diameter butir dengan kekerasan pada sampel pas 1, 2 dan 3 sebelum dan sesudah dianil.....	46
Gambar 4.27.	Grafik hubungan regangan dengan tegangan tarik.....	47

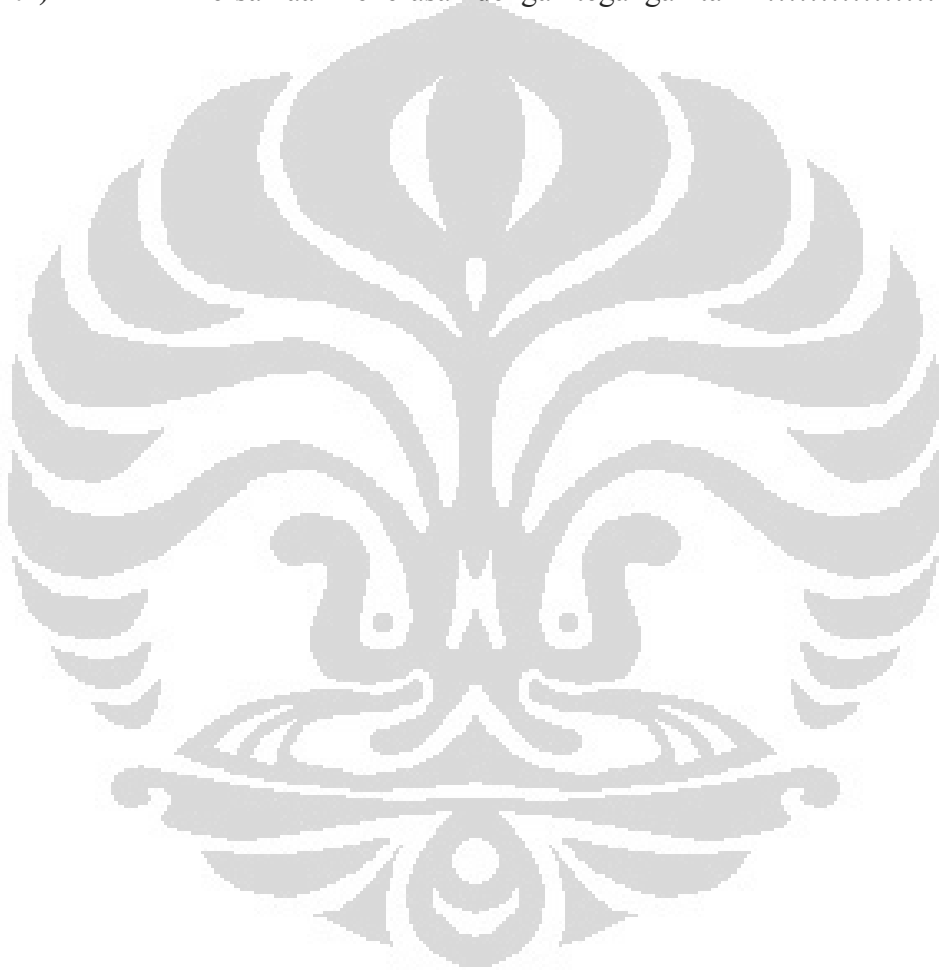
DAFTAR SINGKATAN



SPD	<i>Severe Plastic Deformation</i>
HPT	<i>High Pressure Torsion</i>
ARB	<i>Accumulatible Roll Bonding</i>
REC	<i>Reciprocating Extrusion-Compression</i>
CCDF	<i>Cyclic Close Die Forging</i>
RCS	<i>Repetitive Corrugation and Straightening</i>
ECAP	<i>Equal Channel Angular Pressing</i>
ECAE	<i>Equal Channel Angular Extrusion</i>
Cu	<i>Cooper</i>
Zn	<i>Zinc</i>
CuZn	<i>Cooper-Zinc</i>
mm	<i>milimeter</i>
Mpa	<i>Mega Pascal</i>
TS	<i>Tensile Strength</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
HB	<i>Hardness Brinnell</i>
CW	<i>Cold Work</i>
ASTM	<i>American Standard Testing Method</i>

DAFTAR PERSAMAAN

	Halaman
(2.1)	persamaan <i>Hall-Petch</i> 15
(3.1)	Rumus perhitungan kekerasan Vickers..... 25
(4.1)	Persamaan regangan dengan jumlah <i>passing</i> dan sudut <i>dies</i> .. 45
(4.2)	Persamaan kekerasan dengan tegangan tarik 47



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Contoh perhitungan butir.....	52
Lampiran 2 Contoh perhitungan regangan.....	55
Lampiran 3 Contoh perhitungan tegangan tarik.....	56



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan jaman yang begitu pesat hari ke hari, menuntut semakin meningkatnya sifat material, baik mekanik maupun fisiknya. Pada berbagai aplikasi, material-material kini harus dapat beradaptasi dengan permintaan konsumen yang semakin tinggi. Material logam, contohnya, dituntut untuk memiliki kekuatan yang besar namun juga harus memiliki keuletan dan ketangguhan yang tinggi.

Untuk memenuhi tuntutan jaman itu, bermacam penelitian dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanik material logam yang lebih baik. Bererapa proses seperti *Heat Treatment* atau perlakuan panas semakin dikembangkan untuk mendapat kekuatan dan ketangguhan secara bersamaan. Selain itu salah satu usaha peningkatan sifat mekanik juga dilakukan dengan cara mendapatkan superplastisitas material. Superplastisitas adalah proses difusi terkontrol yang terjadi pada temperatur tinggi dalam material dimana ukuran butir mencapai 1-10 μm .

Material yang memiliki butir halus akan memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan material dengan butir kasar. Material dengan butir yang lebih halus, pergerakan atomnya akan lebih cepat berhenti akibat sulitnya pergerakan atom oleh karena banyaknya batas butir yang dengan kata lain deformasi yang terjadi lebih kecil. Deformasi pada material, dalam skala mikro, merupakan perubahan bentuk akibat adanya pergerakan atom-atom yang berakhir pada permukaan.

Semakin banyak batas butir, energi yang diperlukan untuk melewatinya akan semakin besar sehingga dibutuhkan lebih banyak tenaga untuk mendeformasi material tersebut, atau dengan kata lain material tersebut semakin keras. Dengan adanya penghalusan butir juga akan menurunkan rasio berat terhadap kekuatan, yang akan berguna dalam aplikasi kuningin tersebut.

Salah satu cara penghalusan butir yang tetap memiliki kontrol dimensi yang baik dan tidak banyak berpengaruh pada mikrostruktur adalah dengan pengerjaan dingin seperti *Severe Plastic Deformation* (SPD). SPD adalah metode yang digunakan untuk merubah logam dengan butir yang kasar menjadi material dengan butir yang sangat halus. Selain untuk mendapatkan logam dengan butir yang sangat halus, SPD juga memperbaiki sifat mekanik dan fisik material sehingga dapat digunakan untuk banyak aplikasi.

Ada beberapa teknik SPD yang telah dikembangkan. Teknik SPD yang tertua dan terpopuler adalah *Equal Channel Angular* (ECA). ECA sendiri terdiri dari dua macam, ECAP (*Equal Channel Angular Pressing*) dan ECAE (*Equal Channel Angular Extrusion*). Selain ECA ada juga *High Pressure Torsion* (HPT), *Accumulatible Roll Bonding* (ARB), *Reciprocating Extrusion-Compression* (REC), *Cyclic Close Die Forging* (CCDF), dan *Repetitive Corrugation and Straightening* (RCS).

Pada penelitian kali ini, SPD akan dilakukan menggunakan teknik ECAP. Dengan ECAP, material akan mengalami penghalusan butir dengan cara memasukan sampel pada *dies* dan diberi penekanan. Namun, sebelum di ECAP material akan terlebih dulu mengalami perlakuan panas anil.

1.2. Perumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui proses yang paling efektif untuk mendapatkan butir yang halus dan cara meningkatkan fraksinya hingga berukuran nano, pada material kuningan. Proses yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pemanasan anil kemudian pengamatan mikrostruktur dan pengujian kekerasan butir. Setelah melakukan anil kemudian akan dilakukan proses SPD menggunakan teknik ECAP pada sudut 120° . Secara khusus akan dilakukan variabel terhadap pelumasan pada proses SPD, yaitu pelumas padat dan cair, dan kecepatan dan beban tarik. Dari percobaan tersebut akan diamati perubahan mikrostrukturnya, ukuran butir, dan kekuatan mikronya.

Berdasarkan studi pada banyak jurnal-jurnal penelitian yang telah ada belum ditemukan bagaimana cara meningkatkan fraksi butir berukuran nano

dari suatu material, hanya menjelaskan cara mendapatkan butir berukuran nano.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

- a) Mendapatkan suhu dan waktu anil paling efektif untuk mendapatkan butir berukuran halus.
- b) Mempelajari relasi dari ukuran butir dan kekuatannya secara mikro sebelum dan sesudah anil.
- c) Mempelajari metode-metode dan mekanisme penghalusan butir dengan proses SPD.
- d) Mempelajari mekanisme perubahan strukturmikro (butir, sub butir, kerapatan dislokasi, kerapatan twining, tekstur) selama proses SPD (ECAP) logam kuningan.

1.4. Batasan Masalah

1.4.1. Material

Material yang digunakan pada penelitian kali ini adalah material kuningan alfa atau *cartridge brass* hasil *rolling* yang telah dibubut menjadi bentuk batangan dengan komposisi sebagai berikut:

1.4.2. Parameter Penelitian

Parameter penelitian yang divariabelkan dalam penelitian ini adalah:

- a. Temperatur anil
Temperatur anil yang dilakukan pra proses ECAP adalah 500°, 550°, 600°, dan 700°.
- b. Waktu tahan anil
Waktu tahan pada proses anil adalah 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit.
- c. Sudut ECAP
Sudut ECAP yang digunakan adalah 120°.
- d. Jumlah *passing*

Jumlah *passing* pada penelitian ini adalah 3 kali *passing*.

e. Rute *passing*

Rute *passing* yang digunakan pada proses ECAP adalah 90°, dimana sampel akan diputar searah jarum jam setiap kali *passing*.

1.4.3. Tempat Penelitian

1. Preparasi sampel dan pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
2. Pembuatan *dies* dan penyelesaiannya dilakukan di MEPPPO BPPT.
3. Proses anil dilakukan di Laboratorium Teknologi Perubahan Bentuk Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
4. Pengujian ECAP dilakukan di Laboratorium Teknologi Manufaktur Logam di BPPT.
5. Proses *hardening dies* dilakukan di Laboratorium Metalurgi LIPI.
6. Pengamatan mikrostruktur dilakukan di Laboratorium B2TKS BPPT.

Ruang lingkup penelitian ini meliputi pemanasan anil dan ECAP. Anil dilakukan dengan menggunakan variabel temperatur dan waktu tahan. Temperatur anil adalah 500°, 550°, 600°, dan 700°. Sedangkan waktu tahannya bervariasi dari 30 menit, 60 menit, 90 menit dan sampai 120 menit. Setelah mendapat parameter temperatur dan waktu tahan yang paling efektif, maka akan dilakukan proses ECAP. ECAP dilakukan pada sudut 120° menggunakan pelumas oli Tonna T-64. Setelah anil dan ECAP dilakukan, maka akan dilakukan pengamatan pada mikrostruktur sebelum dan sesudah proses dan juga kekerasan sebelum dan sesudahnya.

1.5. Hipotesis

Logam kuningan, dengan komposisi 30% Cu dan 70% Zn, dianil dan diberikan proses deformasi plastis besar. Kuningan dianil pada suhu dan waktu yang paling efektif yang dapat memberikan nukleasi butir sebelum terjadi pertumbuhan butir dengan hasil yang paling homogen. Setelah dianil,

kuningan kemudian diberikan proses pengerjaan dingin melalui proses ECAP hingga mengalami penghalusan butir yang besar, dan diharapkan hingga dapat mencapai butir berukuran nano.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan pada karya tulis ini adalah sebagai berikut.

Bab 1 : Pendahuluan

Menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

Bab 2 : Dasar Teori

Menjelaskan tentang tentang logam kuningan alfa, karakteristik, sifat mekanik dan fisiknya dan karakteristik butirnya. Sebelum masuk ke proses juga dijelaskan mengenai pra proses ECAP, yaitu perlakuan panas pada logam kuningan dan proses pembentukan butir yaitu *recovery*, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir. Pada dasar teori ini juga dijelaskan mengenai proses SPD dan berbagai metode SPD secara umum, dan metode ECAP serta proses ECAP dengan sudut 120° secara khususnya.

Bab 3 : Metodologi Penelitian

Menjelaskan tentang diagram alir penelitian, parameter penelitian, peralatan penelitian, bahan penelitian, dan prosedur penelitian.

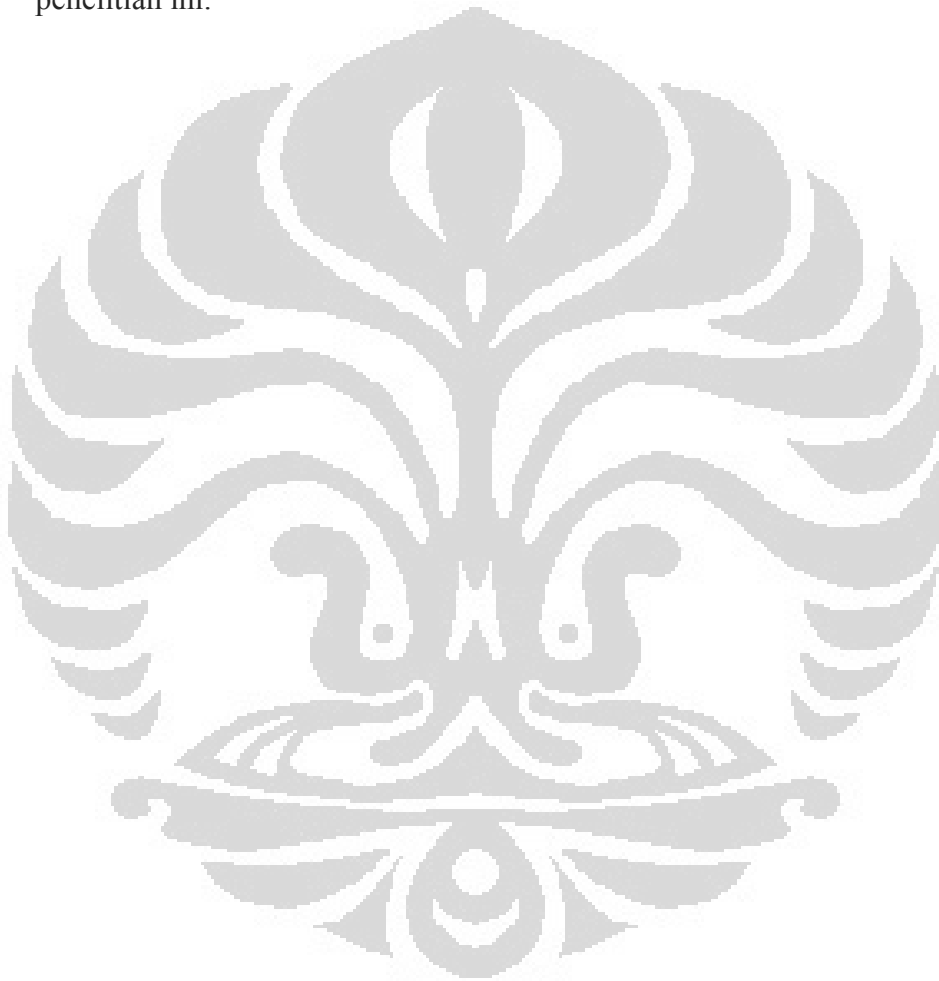
Bab 4 : Hasil Penelitian dan Pembahasan

Menjelaskan hasil yang didapat selama penelitian dan menganalisanya. Hasil penelitian tersebut terdiri dari penghalusan butir melalui proses ECAP 120° , perubahan struktur mikro (cacat, twinning, dan kehomogenan), perubahan sifat mekanik yang meliputi kekerasan kekuatan luluh, pelumasan, dan kekuatan tarik. Penghalusan butir melalui proses ECAP dilakukan dengan 3 kali pas banyaknya, dimana di setiap kali passing akan dilakukan pemutaran

sampel sesuai dengan rute dan diamati perubahan struktur mikro dan sifat mekaniknya. Proses ECAP yang dilakukan dengan beda pelumas cair dan padat juga akan dibandingkan perubahan butir, mikrostruktur dan sifat mekaniknya.

Bab 5 : Kesimpulan

Menjelaskan mengenai kesimpulan secara keseluruhan yang didapat pada penelitian ini.

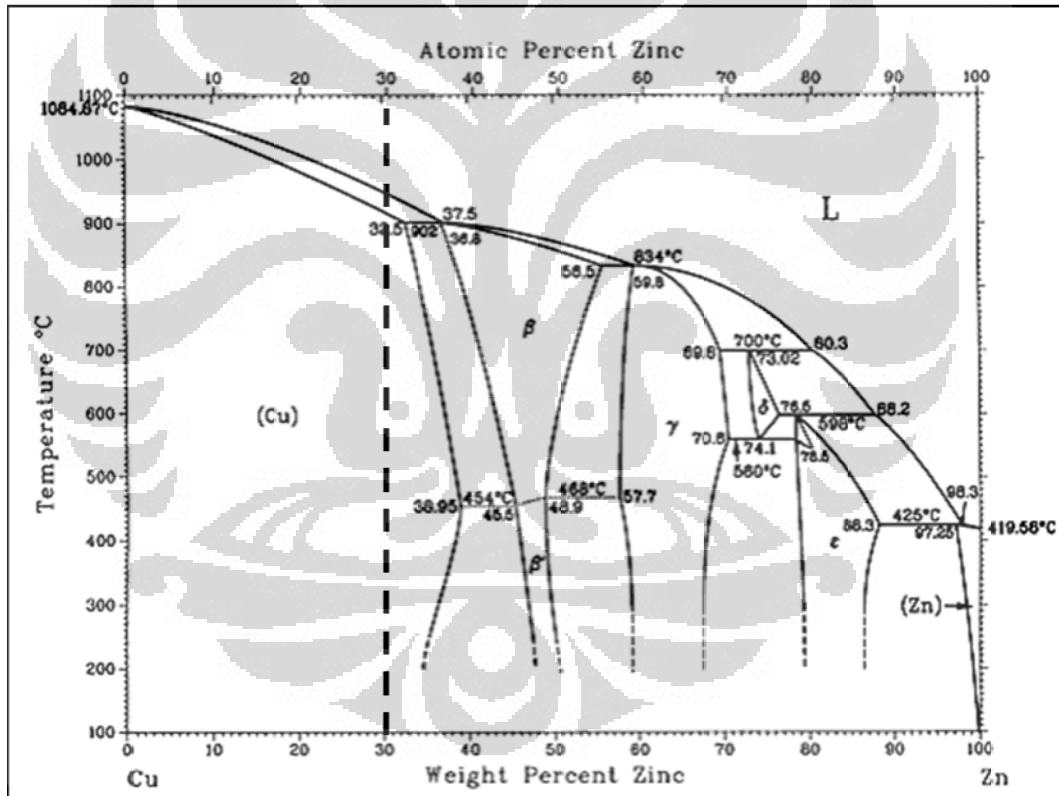


BAB II

DASAR TEORI

2.1. CuZn (Kuningan)

Logam kuningan merupakan salah satu logam non ferrous paduan dari tembaga dan seng. Jenis dan aplikasinya bergantung pada kadar tembaga (Cu) dan kadar seng (Zn) yang dikandungnya. Warna kuningan bervariasi dari coklat kemerahan gelap hingga ke cahaya kuning keperakan tergantung pada jumlah kadar seng. Seng lebih banyak mempengaruhi warna kuningan tersebut menjadi lebih kuning.



Gambar 2.1. Diagram fasa Kuningan^[13].

Tembaga atau Cu adalah salah satu unsur kimia dengan nomor atom 29 yang biasa ditemukan di alam dalam bentuk senyawa. Tembaga termasuk logam berat non *ferrous* karena tidak memiliki kandungan Fe. Tembaga merupakan konduktor listrik dan panas yang baik dan memiliki keuletan serta ketahanan

korosi yang baik. Tembaga biasanya dipergunakan dalam bentuk paduan, karena dapat dengan mudah membentuk paduan dengan logam – logam lain diantaranya dengan logam Pb dan logam Sn (Van Vliet,et.all.,1984).

Seng atau Zn adalah salah satu unsur kimia dengan nomor atom 1 lebih banyak dari Cu, yaitu 30. Produksi seng merupakan salah satu yang terbesar setelah besi karena kemudahannya dicetak dengan permukaan yang halus dan daya tahan korosinya yang baik. Seng juga biasa digunakan sebagai anoda korban untuk besi pada proses galvanisasi.

Dengan memadukan tembaga dan seng, yaitu kuningan, maka akan didapat sifat mekanis yang lebih baik dari tembaga dan seng. Kuningan memiliki sifat mekanis yang baik, kuningan lebih kuat dan lebih keras daripada tembaga, tetapi tidak sekuat atau sekeras seperti baja. Kuningan sangat mudah untuk dibentuk ke dalam berbagai bentuk, Kuningan merupakan konduktor panas yang baik, dan umumnya tahan terhadap korosi dari air garam. Kuningan juga tahan terhadap percikan api, sehingga sering digunakan di lingkungan eksplosif. Selain sifat mekaniknya, kuningan juga memiliki tampilan yang menyerupai emas, sehingga seringkali diaplikasikan untuk dekorasi.

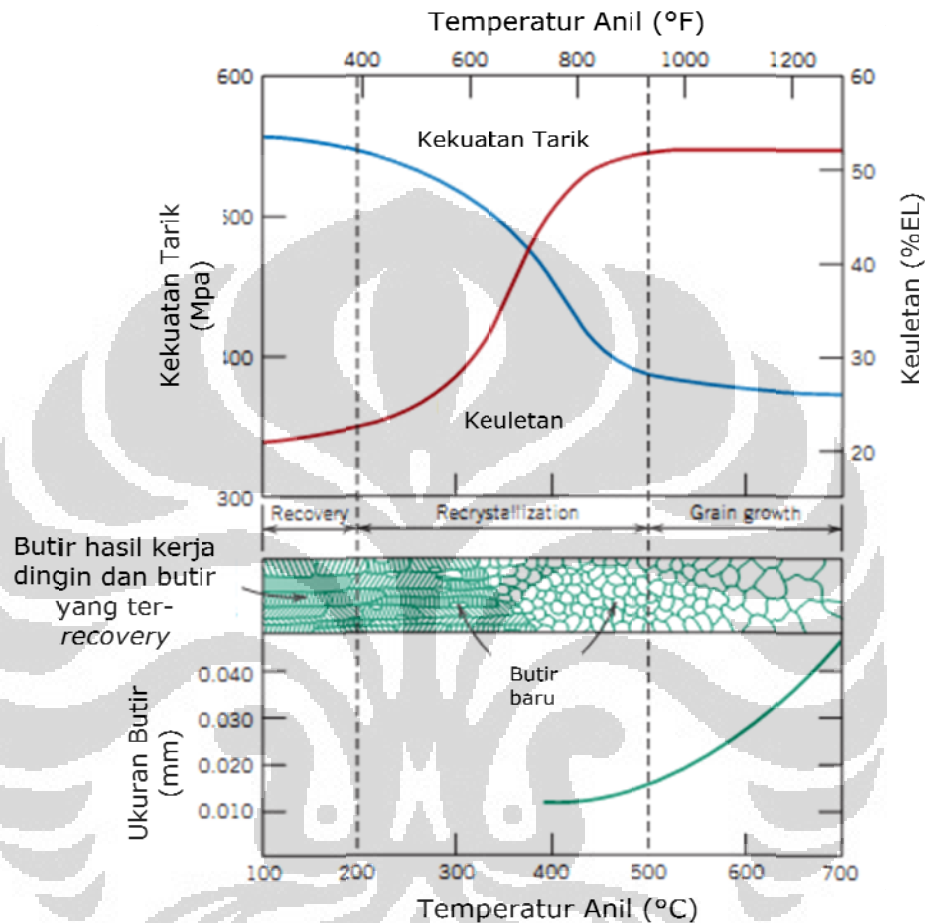
Salah satu jenis logam kuningan adalah kuningan alfa dengan kadar seng tidak lebih dari 32%. Salah satunya adalah kuningan jenis cartridge brass yaitu kuningan dengan kadar Cu 70% dan kadar Zn 30%. Pada diagram diatas, perubahan fasa kuningan alfa ditandai dengan garis putus-putus, dimana pada suhu tinggi fasa alfa akan berubah menjadi fasa liquid.

Cartridge brass dengan sifat mampu bentuk dan sifat mampu tarik yang baik, dapat diaplikasikan dalam berbagai macam industri. Salah satunya adalah sebagai bahan baku industri hankam (selongsong peluru), industri transportasi, serta industri migas.

2.2. Pengaruh Anil Pada Sifat Mekanis

Anil adalah perlakuan panas dimana material dipaparkan pada suhu elevasi selama periode waktu yang cukup lama dan kemudian didinginkan perlahan.

Biasanya anil dilakukan untuk menghilangkan tegangan sisa, meningkatkan kelunakan, keuletan dan ketangguhan, dan menghasilkan mikrostruktur tertentu. Anil yang dilakukan pada percobaan kali ini berfungsi untuk menghomogenkan butir dan menghilangkan tegangan sisa hasil pengerjaan dingin.

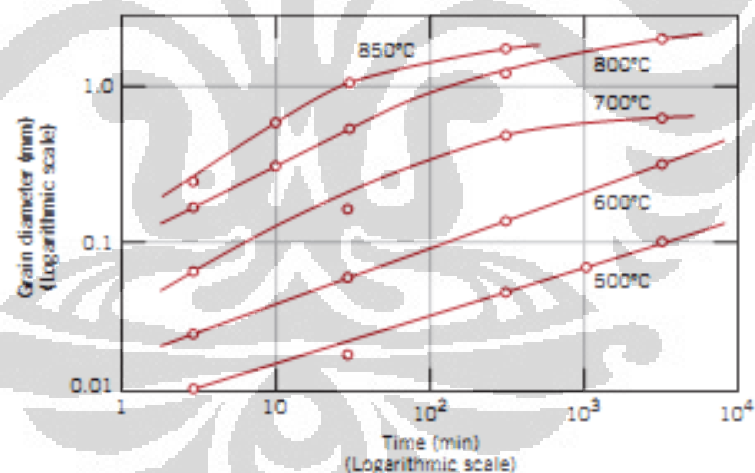


Gambar 2.2. Pengaruh temperatur anil pada kekuatan tarik, keuletan, dan ukuran butir pada logam kuningan^[1].

Ada dua parameter yang mempengaruhi hasil dari anil yaitu temperatur, dan waktu tahan. Kedua parameter tersebut akan mempengaruhi ukuran butir, keuletan dan kekuatan tarik, seperti pada Gambar 2.2. Pada temperatur anil 100°-200° terdapat keadaan pemulihan atau *recovery*, setelah itu terdapat keadaan rekristalisasi atau pembentukan butir baru setelah proses nukleasi pada suhu 200°-500°, sedangkan pada suhu 500°-700° terjadi pertumbuhan butir yang semakin besar.

Dari gambar diatas dapat terlihat bahwa terjadi perubahan ukuran butir dengan adanya peningkatan temperatur anil mulai dari temperatur anil 400°. Pada suhu diatas 500° terjadi pertumbuhan butir sekaligus peningkatan keuletan dan penurunan kekuatan tarik. Dari gambar diatas juga dapat terlihat bahwa pada pembentukkan butir baru terdapat keseimbangan antara kekuatan tarik dan keuletan, yaitu pada suhu anil sekitar 400°.

Pengaruh temperatur dan waktu tahan anil terhadap ukuran butir yang lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 2.3 dibawah. Pada gambar tersebut terlihat jelas bahwa peningkatan temperatur anil akan meningkatkan ukuran butir dari material, begitu pula dengan peningkatan waktu tahannya. Temperatur yang tinggi akan memberi ruang yang lebih besar untuk atom-atom logam bergerak menyusun diri menjadi butir yang lebih besar. Sedangkan, waktu tahan yang semakin panjang akan memberi waktu yang cukup untuk butir semakin berkembang.



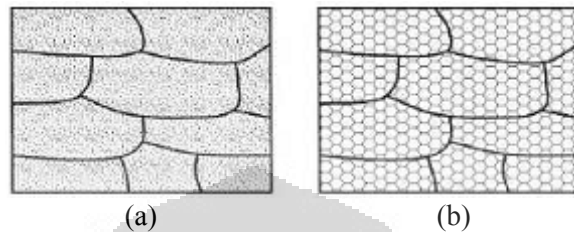
Gambar 2.3. Pengaruh temperatur dan waktu tahan anil terhadap ukuran butir logam kuning^[1].

2.3. Recovery, Rekristalisasi, dan Pertumbuhan Butir

2.3.1. Recovery

Pada tahapan ini, butir yang telah terdeformasi dapat melepaskan tegangan sisa melalui penyusunan ulang cacat pada struktur kristalnya akibat pergerakan

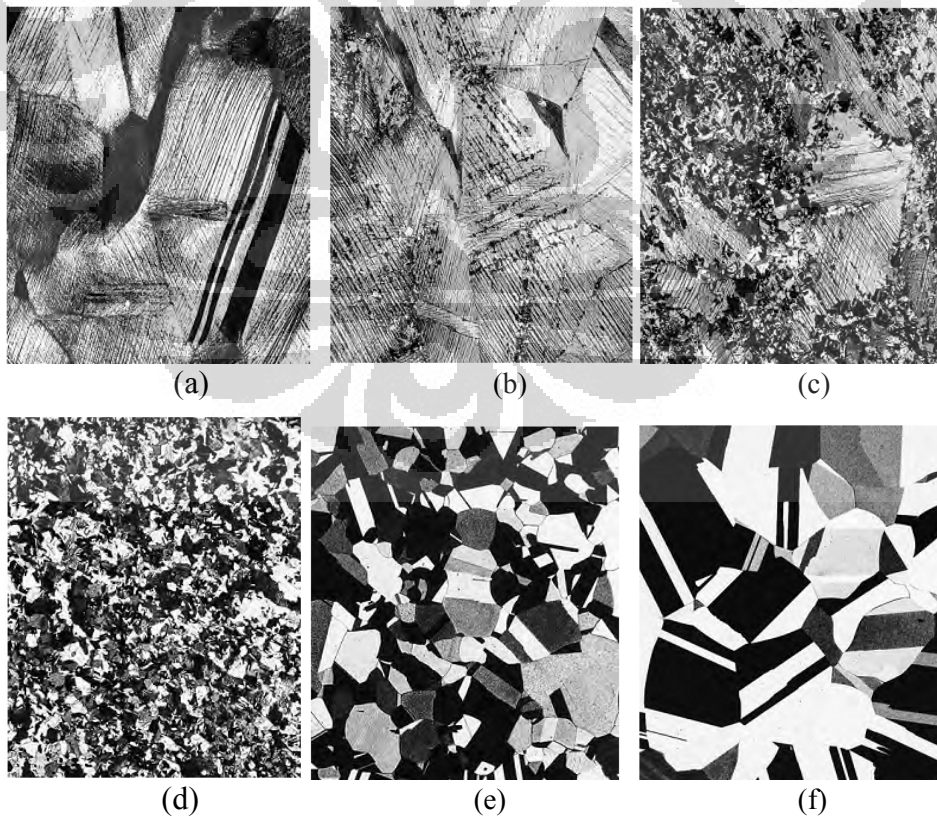
dislokasi, sebagai hasil dari perluasan difusi atom pada suhu elevasi. Pada gambar 2.4 dapat dilihat bahwa butir yang terdeformasi berbentuk sangat pipih dan tidak beraturan, namun ketika *recovery* bentuk butir sudah beraturan akibat pelepasan tegangan sisa internal.



Gambar 2.4. Skematik Proses *Recovery* a) Butir yang Terdeformasi, b) *Recovery*

2.3.2. Rekristalisasi

Rekristalisasi merupakan proses dimana butir terdeformasi digantikan dengan butir baru bebas regangan yang berbentuk *equiaxe* dan memiliki kerapatan dislokasi rendah. Butir baru tersebut terbentuk dari nukleus kecil dan bertumbuh sempurna hingga menggantikan butir yang asli seluruhnya.



Gambar 2.5. Foto mikro dari beberapa tahapan rekristalisasi dan pertumbuhan butir dari kuningan. (a) Struktur butir *cold-worked* (33%CW). (b) Tahap awal dari rekristalisasi; butir yang sangat kecil merupakan butir yang terekristalisasi. (c) Penggantian sebagian butir yang *cold-worked* oleh rekristalisasi. (d) Rekristalisasi sempurna (e) Pertumbuhan butir setelah 15 menit pada suhu 580°. (f) Pertumbuhan butir setelah 10 menit pada suhu 700^o[1].

Nukleasi dari butir baru dapat dilihat pada gambar 2.5 (b), nukleasi butir tersebut kemudian akan terus berlangsung hingga terjadi di semua bagian menggantikan butir asli seperti pada gambar 2.5 (c) dan (d). Sifat mekanik dan fisik dari logam, pada tahap rekristalisasi akan kembali sama seperti sebelum diberikan deformasi, lebih lemah dan lembut namun juga lebih ulet.

2.3.3. Pertumbuhan Butir

Pertumbuhan butir merupakan penambahan ukuran butir yang terjadi pada temperatur tinggi setelah proses recovery dan rekristalisasi selesai dan pengurangan energi internal hanya dapat didapat dengan mengurangi luas area total dari batas butir, atau dengan kata lain, dengan cara mengurangi jumlah butirnya atau memperbesar ukuran butir. Pertumbuhan butir yang lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.3 (d) dan (e).dimana difusi atom lebih banyak terjadi pada suhu tinggi.

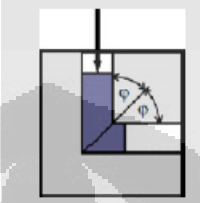
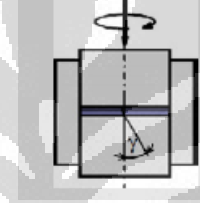
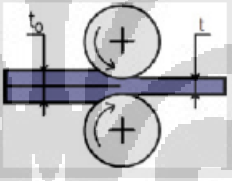
2.4. SPD (Severe Plastic Deformation)

SPD adalah metode yang digunakan untuk merubah logam dengan butir yang kasar menjadi material dengan butir yang sangat halus. Selain untuk mendapatkan logam dengan butir yang sangat halus, SPD juga memperbaiki sifat mekanik dan fisik material sehingga dapat digunakan untuk banyak aplikasi.

Ada beberapa teknik SPD yang telah dikembangkan. Teknik SPD yang tertua dan terpopuler adalah *Equal Channel Angular* (ECA). ECA sendiri terdiri dari dua macam, ECAP (*Equal Channel Angular Pressing*) dan ECAE (*Equal Channel Angular Extrusion*). Selain ECA ada beberapa metode lain juga *High Pressure Torsion* (HPT), *Accumulatible Roll Bonding* (ARB), *Reciprocating*

Extrusion-Compression (REC), Cyclic Close Die Forging (CCDF), dan Repetitive Corrugation and Straightening (RCS).

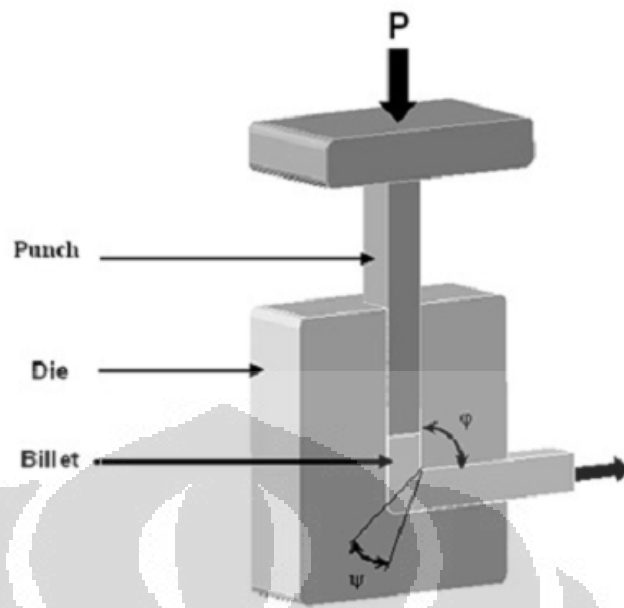
Tabel 1.1 Beberapa contoh metode proses SPD^[8].

Nama Proses	Skema representasi	Regangan plastis ekuivalen
Equal channel angular extrusion (ECAE) (segel, 1977)		$\varepsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \cot(\varphi)$
High-pressure torsion (HPT) (Valev at al, 1989)		$\varepsilon = \frac{\gamma(r)}{\sqrt{3}}, \gamma(r) = n \frac{2\pi r}{l}$
Accumulative roll-bonding (ARB) (Saito, Tsuji, Utsunomiya, Sakai)		$\varepsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{h_0}{t}\right)$

Pada penelitian kali ini, SPD akan dilakukan dengan menggunakan teknik ECAP. Dengan ECAP, material akan mengalami penghalusan butir dengan melalui proses penekanan material di dalam *dies*. Namun, sebelum di ECAP material akan terlebih dulu mengalami perlakuan panas anil.

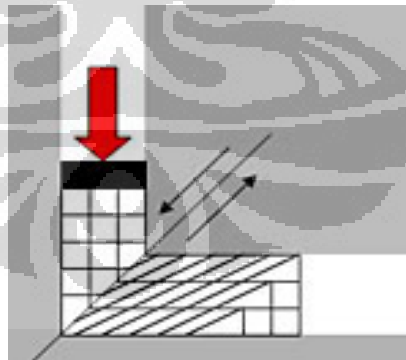
2.5. ECAP (Equal Channel Angular Pressing) pada CuZn

ECAP merupakan alat yang berguna untuk mencapai penghalusan butir yang luar biasa dan material berstruktur nano. Biasanya, ukuran butir yang diproduksi melalui ECAP adalah dalam skala submikrometer, dan lebih kecil dari ukuran butir yang dicapai melalui perlakuan termomekanik yaitu rata-rata ukuran butirnya kurang dari 1 μ m.



Gambar 2.6. Skema proses ECAP^[26].

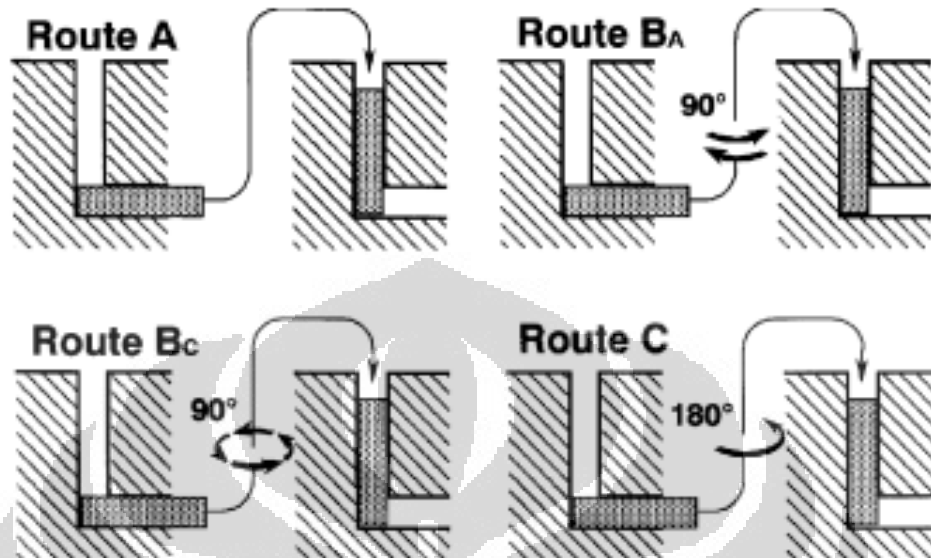
Perubahan bentuk butir pada proses ECAP dapat dilihat pada Gambar 2.5. pada gambar tersebut terlihat proses pemipihan dan penghalusan butir akibat tekanan dan perubahan bentuk mengikuti *dies* secara paksa pada logam. Akibat perubahan bentuk butir tersebut, logam kuningan akan memiliki anisotropi dan bentuk butir yang miring seperti gambar diatas, sehingga akan dilakukan perubahan rute pada *passing* berikutnya seperti Gambar 2.6.



Gambar 2.7. Perubahan butir pada proses ECAP.

Untuk mendapatkan keseragaman bentuk butir, terdapat 4 macam rute pada proses ECAP. Rute tersebut merupakan perubahan arah atau sisi yang dilakukan pada *passing* berikutnya. Pada penelitian kali ini, rute yang digunakan

adalah rute Bc, dimana sampel akan diputar 90° searah jarum jam pada passing berikutnya dan seterusnya.



Gambar 2.8. Macam-macam rute *passing* pada proses ECAP^[15].

Tegangan luluh dari logam polikristalin seperti kuningan berhubungan dengan diameter butir (d) seperti persamaan *Hall-Petch* berikut ini:

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

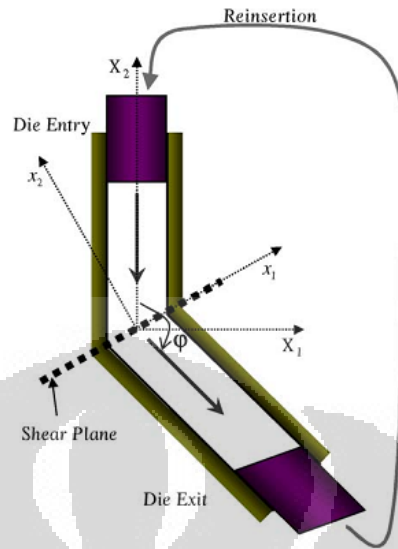
dimana σ_0 adalah tegangan gesek dan A adalah konstanta.

Persamaan diatas berarti bahwa tegangan luluh bertambah dengan berkurangnya akar pangkat dari ukuran butir. Penurunan ukuran butir juga berarti meningkatnya tegangan tarik tanpa mengurangi ketangguhan.

Sebagai konsekuensi dari butir yang ultra halus, logam yang telah mengalami penekanan akan memperlihatkan keuletan yang superplastik dengan laju peregangan lebih besar dari logam super plastik konvensional.

Pada penelitian kali ini ECAP dilakukan dengan cetakan atau *dies* yang terbuat dari *tool steel*. Penekanan ECAP dilakukan pada sudut 120°. Setelah logam mengalami perlakuan panas atau anil, sampel akan dimasukkan kedalam *dies* dan diberi penekanan hingga sampel keluar dari lubang keluar.

2.6. ECAP dengan Sudut 120°



Gambar 2.9. ECAP dengan Sudut 120°.

Pada percobaan yang menggunakan metode penekanan, ada tiga parameter yang sangat mempengaruhi hasil percobaan, yaitu:

1. Geometri dari *dies* yang meliputi *dies clearance*, sudut *dies*, dan ukuran dies.
2. Sifat material yang meliputi kekuatan dan perilaku pengerasan.
3. Variabel proses yang meliputi temperatur, pelumasan, dan kecepatan deformasi.

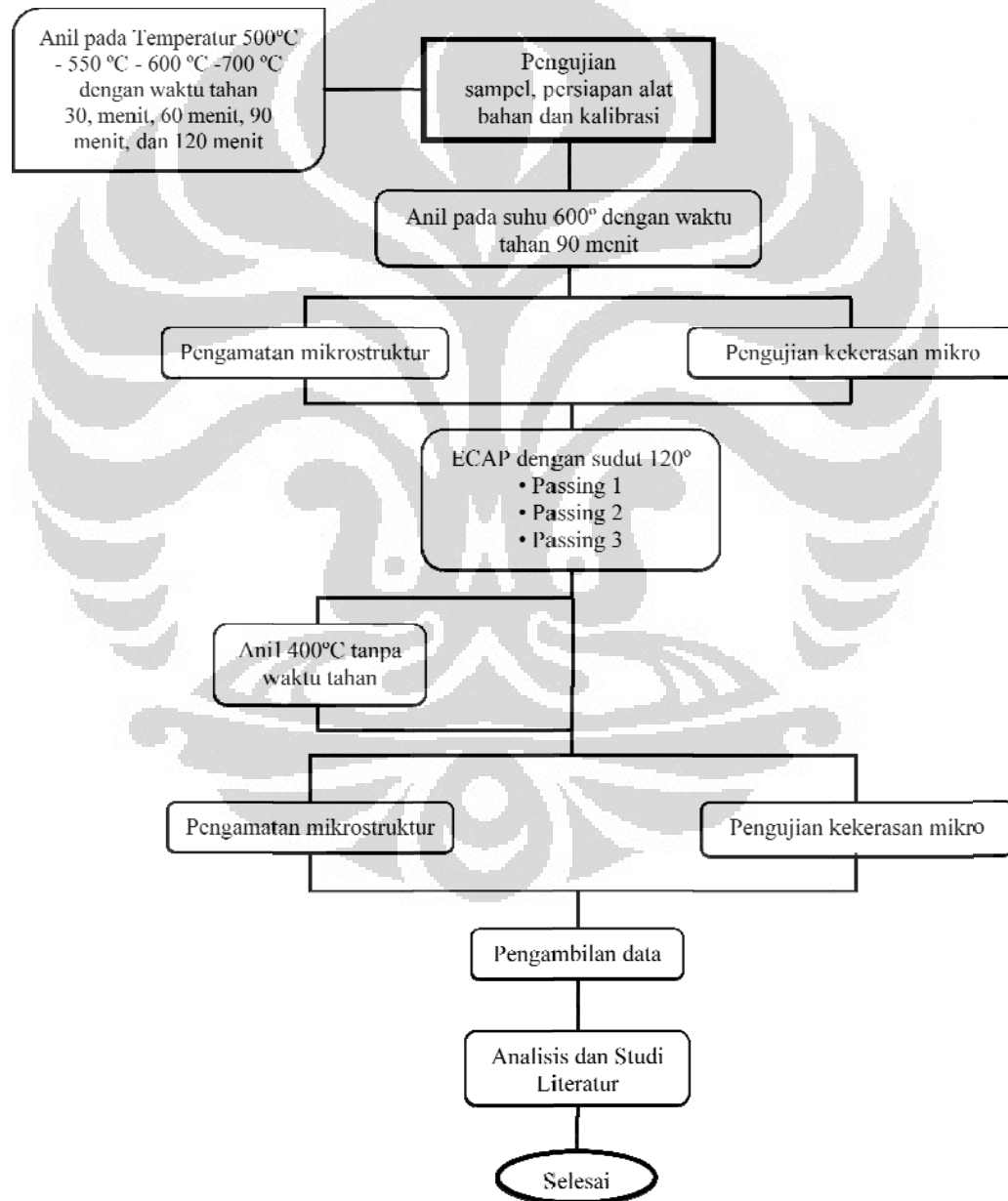
Dalam percobaan ECAP kali ini, dipilih sudut *dies* 120° karena merupakan sudut tumpul, sehingga tekanan yang digunakan tidak terlalu besar, namun tetap menghasilkan penghalusan butir yang baik, meskipun tidak sebesar proses ECAP dengan sudut 60° dan 90°.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

penelitian ini dibagi menjadi tiga tahapan proses, percobaan anil pra ECAP, percobaan ECAP, dan anil pasca ECAP. Di setiap tahapan akan dilakukan pengamatan mikrostruktur dan pengujian kekerasan mikro.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

1. Mesin Tekan Hidrolik dengan kapasitas 40 ton
2. Alat Uji Kekerasan Mikro
3. Dapur Pemanas *Naber* dan *Carbolite*
4. Termokopel
5. Jangka Sorong
6. Mesin Poles
7. Mesin Amplas
8. Mikroskop Optik
9. Wire-Cut Machine CW 32gs
10. Gergaji
11. Gerinda

3.2.2 Bahan

1. Batangan Kuningan
2. Resin dan *Hardener*
3. Kertas Amplas Grid #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000, #1200, dan #1500
4. Kain Beludru
5. Oli Mesin Tonna T-64
6. Larutan Etsa

3.3 Prosedur Penelitian

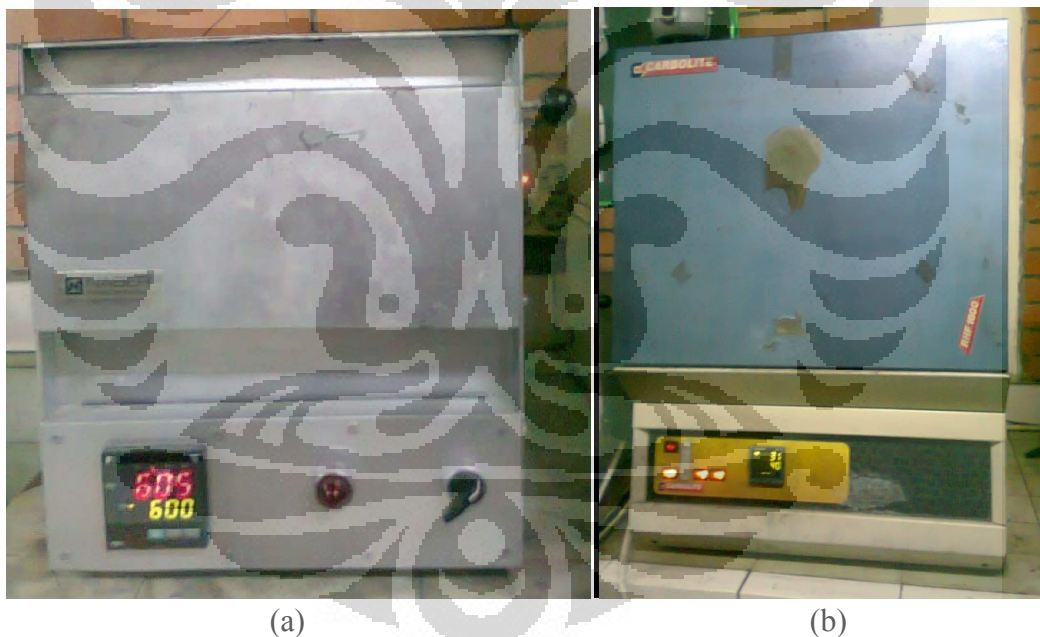
3.3.1 Material

Material yang digunakan pada penelitian kali ini adalah material kuningan alfa atau *cartridge brass* hasil *rolling*. Untuk pengamatan ukuran butir melalui proses pemanasan, material kuningan yang digunakan berbentuk batangan, sedangkan material yang digunakan untuk proses ECAP adalah material batang yang telah di-*machining* sehingga berbentuk *rod*. Standard material yang digunakan adalah standard *Cartridge Brass* C26000 dengan ASTM B36.

3.3.2 Proses Anil Pra ECAP

Sebelum dilakukan proses ECAP, spesimen diberi perlakuan panas untuk menghilangkan *residual stress* akibat proses pengerjaan dingin pencanaian dan untuk meratakan ukuran butir. Untuk mendapatkan temperatur dan waktu tahan terbaik untuk selanjutnya dilakukan proses ECAP, dilakukan percobaan anil dengan variabel temperatur dan waktu tahan terhadap 16 sampel. Variasi temperatur yang diberikan adalah 500°, 550°, 600°, dan 700°. Sedangkan variabel waktunya adalah 30 menit, 60 menit, 90 menit dan 120 menit.

Setelah ditentukan suhu dan waktu tahan anil terbaik, maka anil akan dilakukan lagi untuk sampel yang akan di ECAP. Selain itu, anil juga akan dilakukan setelah ECAP sebagai variabel dalam pengamatan mikrostruktur hasil ECAP.



Gambar 3.2. Dapur Pemanas (a) anil pra ECAP, Naber dan (b) anil pasca ECAP, Carbolite (Laboratorium Teknik Pengubahan Bentuk DTMM FTUI).

3.3.3 Pengujian ECAP

Pengujian ECAP dilakukan menggunakan *dies* dari *tool steel* berjenis SKD 11 yang telah dihardening untuk meningkatkan ketangguhannya dan di-*machining* untuk mendapatkan kerataan permukaan yang sangat baik.

Kekerasannya setelah di-*hardening* adalah 58 HRC. Komposisi dari SKD 11 dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Komposisi kimia *dies* ECAP SKD 11.

Komposisi Kimia	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
	1.50-1.60	0.15-0.45	0.1-0.40	11.0-12.0	0.60-0.80	0.90-1.10	≤0.03	≤0.03

Mesin untuk penekanan *plunger* adalah mesin tekan hidrolik dengan kapasitas beban sebesar 40 ton. Ketika dilakukan pengujian ECAP pelumas yang digunakan pada material dan *dies* adalah pelumas cair. Pelumas cair tersebut adalah oli mesin Tonna T-64.

3.3.4 Anil Pasca ECAP

Setelah melakukan proses ECAP, dilakukan pemanasan anil pada beberapa sampel sebagai pembandingan dengan sampel tanpa anil. Anil ini dilakukan agar sampel yang telah di-ECAP mengalami *stress relieved* dan penghomogenan butir untuk mencapai sifat mekanik yang lebih baik.

Anil pasca ECAP ini dilakukan pada temperatur 400° tanpa waktu tahan. Temperatur 400° dipilih karena merupakan temperatur awal rekristalisasi (dapat dilihat pada gambar 2.2) dimana butir belum mengalami pembesaran.

3.4 Pengamatan Metalografi

Pengujian metalografi bertujuan untuk mengamati mikrostruktur dari benda uji. Preparasi benda uji berdasarkan ASTM E 3 – 01 “Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens”

3.4.1 Persiapan Benda Uji

Pada penelitian ini bagian benda uji yang akan diamati mikrostrukturnya dibagi menjadi dua yaitu penampang melintang dan memanjang. Penampang melintang berbentuk tabung dan penampang memanjang merupakan tabung yang dibelah vertikal.



Gambar 3.3. Bagian Benda Uji yang akan Diamati Mikrostrukturnya, (a) memanjang dan (b) melintang.

Untuk mengamati mikrostruktur perlu dilakukan proses metalografi. Metalografi adalah suatu pengetahuan yang khusus mempelajari struktur logam dan mekanismenya. Langkah-langkah metalografi adalah sebagai berikut.

1. Cutting (Pemotongan)

Pemilihan sampel yang tepat dari suatu benda uji studi mikroskopik merupakan hal yang sangat penting. Pemilihan sampel tersebut didasarkan pada tujuan pengamatan yang hendak dilakukan. Pengambilan sampel harus direncanakan sedemikian sehingga menghasilkan sampel yang sesuai dengan kondisi rata-rata bahan atau kondisi di tempat-tempat tertentu (kritis), dengan memperhatikan kemudahan pemotongan pula.

2) Mounting

Spesimen yang berukuran kecil atau memiliki bentuk yang tidak beraturan akan sulit untuk ditangani khususnya ketika dilakukan pengamplasan dan pemolesan akhir. Sebagai contoh adalah spesimen yang berupa kawat, spesimen lembaran metal tipis atau yang dipotong tipis. Media mounting yang dipilih haruslah sesuai dengan material dan jenis reagen etsa yang akan digunakan. Sampel yang akan digunakan pada penelitian kali ini sudah cukup besar sehingga tidak membutuhkan mounting.

3) Grinding (Pengamplasan)

Sampel yang baru saja dipotong, atau sampel yang telah terkorosi memiliki permukaan yang kasar. Permukaan yang kasar ini harus diratakan agar pengamatan struktur mudah untuk dilakukan. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang ukuran butir abrasifnya dinyatakan

dengan mesh. Hal yang harus diperhatikan pada saat pengamplasan adalah pemberian air. Air berfungsi sebagai pemindah geram, memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul yang dapat merubah struktur mikro sampel dan memperpanjang masa pemakaian kertas amplas. Hal lain yang harus diperhatikan adalah ketika melakukan perubahan arah pengamplasan, maka arah yang baru adalah 45^0 atau 90^0 terhadap arah sebelumnya.

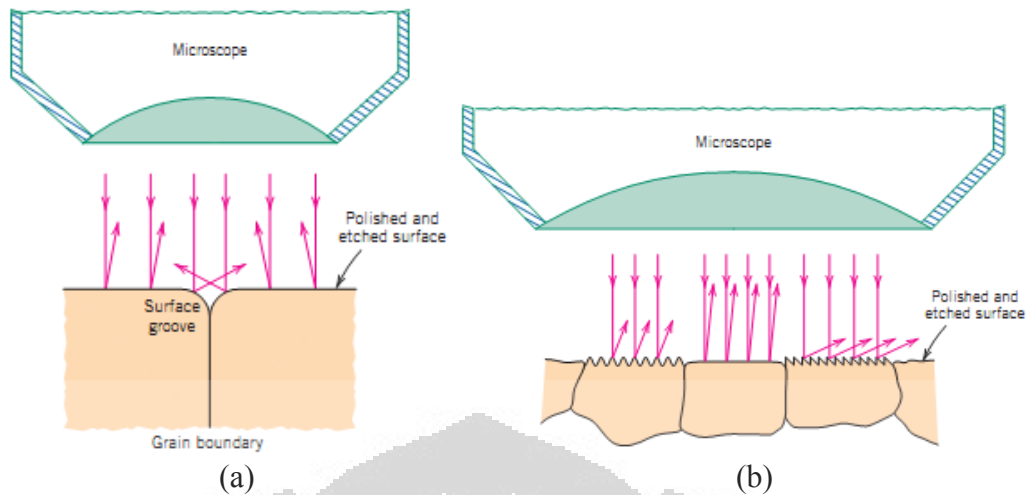
4) Polishing (Pemolesan)

Setelah diampelas sampai halus (1500#), sampel harus dilakukan pemolesan. Pemolesan bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus bebas goresan dan mengkilap seperti cermin dan menghilangkan ketidakteraturan sampel hingga orde $0.01 \mu\text{m}$. Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata. Apabila permukaan sampel kasar atau bergelombang, maka pengamatan struktur mikro akan sulit untuk dilakukan karena cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan secara acak oleh permukaan sampel.

5) Etching (Etsa)

Etsa merupakan proses penyerangan atau pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan pencelupan ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak ke permukaan sampel sehingga detail struktur yang akan diamati akan terlihat dengan jelas dan tajam. Untuk beberapa material, mikrostruktur baru muncul jika diberikan zat etsa. Sehingga perlu pengetahuan yang tepat untuk memilih zat etsa yang tepat.

Pengaruh poles dan etsa pada pantulan sinarnya di bawah mikroskop dapat dilihat pada gambar 3.3. Pada gambar tersebut dapat terlihat bahwa jika permukaan sampel tidak rata maka sampel tidak dapat memantulkan cahaya dengan baik sehingga tidak dapat diamati melalui mikrostruktur. Pada gambar 3.3 (b) dapat terlihat pengaruh zat etsa pada permukaan sampel. Setelah di etsa akan terlihat beda permukaan pada beda fasa, hanya permukaan yang ingin diamatilah yang dapat terlihat di bawah mikroskop.



Gambar 3.4. (a) Pantulan sinar dari material yang permukaannya telah dietsa dan dipoles, dan (b) bermacam karakteristik dan tekstur permukaan material setelah dietsa.

3.4.2 Pengamatan Mikrostruktur

Setelah dilakukan proses pengetsaan, maka dilakukan pengamatan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 100 x, 200 x, dan 500 x.



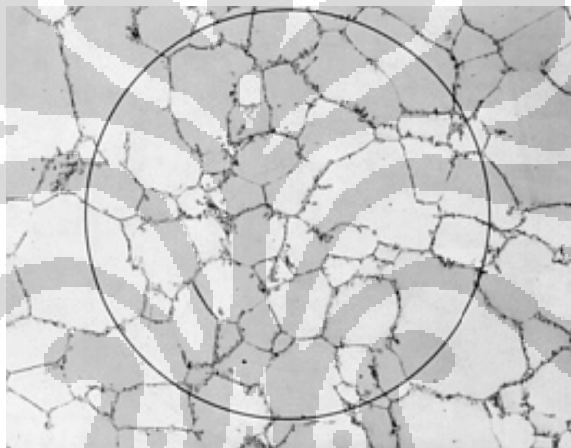
Gambar 3.5. Mikroskop Optik (DTMM FT UI)

3.4.3 Perhitungan Ukuran Butir

Perhitungan ukuran butir dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112 (*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*). Dalam ASTM ini, ada beberapa metode dasar pengujian untuk perhitungan ukuran butir

yaitu metode planimetri (Jefferies), *intercept* (Heyne), dan perbandingan (*comparison*). Masing-masing metode memiliki kekhususannya dalam penggunaan. Metode planimetri

Pada penelitian ini, perhitungan besar butir dilakukan pada hasil foto mikro dari benda uji dengan perbesaran 500 x. Perhitungan ukuran butir dilakukan dengan menggunakan metode planimetri (Jefferies). Perhitungan ukuran butir menggunakan metode planimetri diawali dengan membuat lingkaran dengan diameter 79,8 mm pada luas area 5000 mm², kemudian membagi 2 macam perhitungan butir yaitu butir dalam butir dan butir yang bersinggungan dengan garis lingkaran.



Gambar 3.6. Contoh gambar mikrostruktur dengan perhitungan butir menggunakan metode planimetri.

3.5 Pengujian Kekerasan Mikro

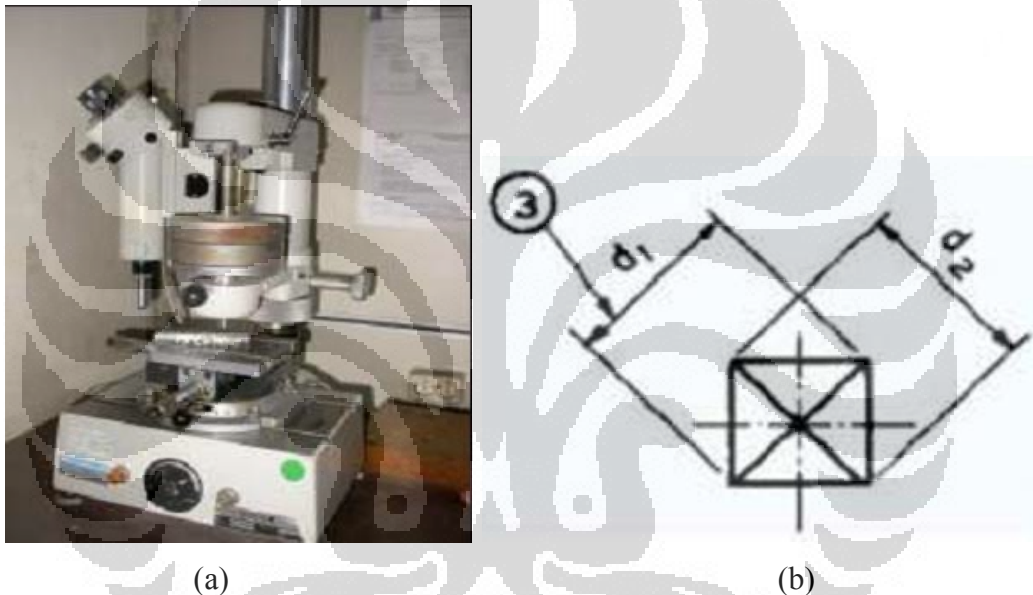
Pengujian kekerasan dilakukan sebagai parameter peningkatan sifat mekanik dari spesimen uji. Peningkatan sifat mekanik merupakan salah satu dari tujuan dilakukannya pengujian. Kekerasan dari material juga akan dipengaruhi oleh struktur mikro dan ukuran butir spesimen uji.

Metode pengujian kekerasan yang dipakai yaitu metode kekerasan Vickers yang menggunakan standar ASTM E92. Prinsip pengujiannya yaitu dengan melakukan penjejakan atau indentasi pada sampel dengan indenter intan berbentuk piramida dengan kemiringan sekitar 136°. Jejak indentasi yang terdapat

pada sampel akan berbentuk segi empat atau belah ketupat. Sampel diberikan penjeakan dengan pada tiga titik sampel. Dari penjeakan tersebut maka didapat panjang diagonal dari intan, baik diagonal yang vertikal maupun yang horisontal. Dari kedua diagonal tersebut maka akan dicari panjang rata-ratanya dan dihitung menggunakan rumus seperti berikut:

$$HV = \frac{1,854 P}{d^2} \quad (3.1)$$

dimana, P adalah beban uji, yaitu 5 Kg dan d adalah diameter rata-rata hasil penjeakan.



Gambar 3.7. (a) Alat uji Vickers (Lab Uji Merusak DTMM FTUI) dan (b) metode uji Vickers

BAB IV

PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dibahas hasil-hasil yang diperoleh selama pelaksanaan penelitian, yang meliputi proses anil pra ECAP dengan variabel temperatur dan waktu tahan, proses ECAP beserta karakterisasinya terkait dengan pengamatan mikrostruktur, pengukuran butir, kekerasan mikro dan pengaruh anil pada mikrostruktur hasil ECAP.

Benda uji pada penelitian ini adalah kuningan alfa hasil *roll* atau dari bentuk awal *slab*, dengan komposisi seperti pada tabel dibawah.

Tabel 4.1. Komposisi kimia *cartridge brass*

Komposisi	Cu	Zn	Pb	Fe	Ni	Al
% Berat	70.25	29.57	0.02	0.10	0.03	0.022
	P	Si	Mn	S	Sb	Sn
	0	0.007	0.0094	-	-	<0.0009

4.1 Proses Anil Pra ECAP

Proses anil dilakukan pada 16 spesimen uji kuningan, material yang sama dengan yang akan dilakukan ECAP. Anil dilakukan pada temperatur 500°C, 550°C, 600°C, dan 700°C dengan variasi waktu tahan 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit. Pemberian variabel suhu dan waktu tahan pada proses anil pra ECAP adalah untuk mencari ukuran butir yang paling seragam agar menghasilkan mikrostruktur yang baik setelah di-ECAP.



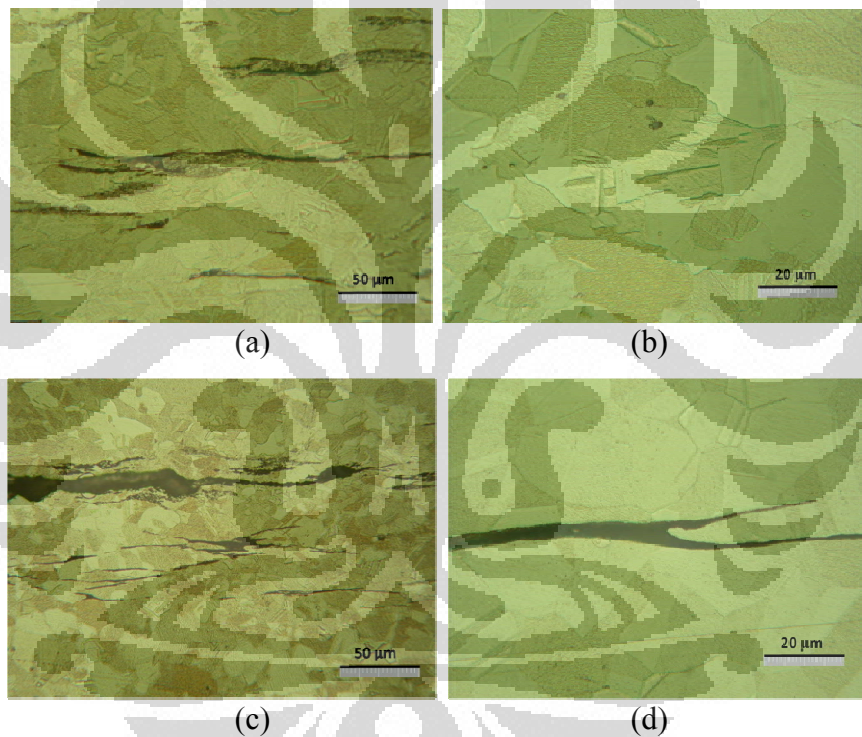
(a) (b)

Gambar 4.1 Sampel anil setelah dikeluarkan dari *furnace* (a) sampel yang masih merah beberapa detik setelah dikeluarkan (b) kondisi sampel setelah beberapa menit didiamkan.

Pada saat dianil spesimen masih berbentuk batang dan dipotong-potong sehingga berukuran kecil. Spesimen kemudian dimasukkan ke dapur pemanas dengan 2 variabel uji, yaitu temperatur dan waktu tahan.

Kondisi sampel setelah di anil dapat dilihat pada gambar 4.1. Dari gambar tersebut terlihat sampel yang masih memerah akibat panas pada *furnace*, dan setelah didiamkan beberapa saat sampel terlihat berwarna gelap dan jika dipegang akan terasa kotor seperti abu pada permukaan sampel akibat oksidasi dari permukaan sampel.

4.1.1 Analisis Struktur Mikro

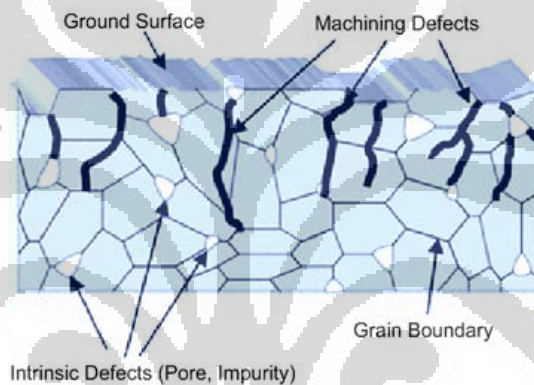


Gambar 4.2. Sampel anil 500°C *holding* 90 menit (a) perbesaran 200 x dan (b) perbesaran 500 x, (c) sampel anil 550°C *holding* 120 menit perbesaran 200 x dan (d) sampel anil 500°C *holding* 30 menit perbesaran 500 x.

Pada pengamatan struktur mikro sampel anil didapat beberapa cacat dalam logam kuningan berupa goresan, retakan kecil, dan juga pengotor seperti dapat terlihat pada gambar 4.2. Goresan pada sampel seperti pada gambar 4.2 (d) dapat terjadi kemungkinannya akibat beberapa hal seperti goresan partikel bekas

amplas, sisa pemotongan gergaji yang belum sempurna perataannya saat diampas, ataupun akibat kesalahan cara pemegangan sampel.

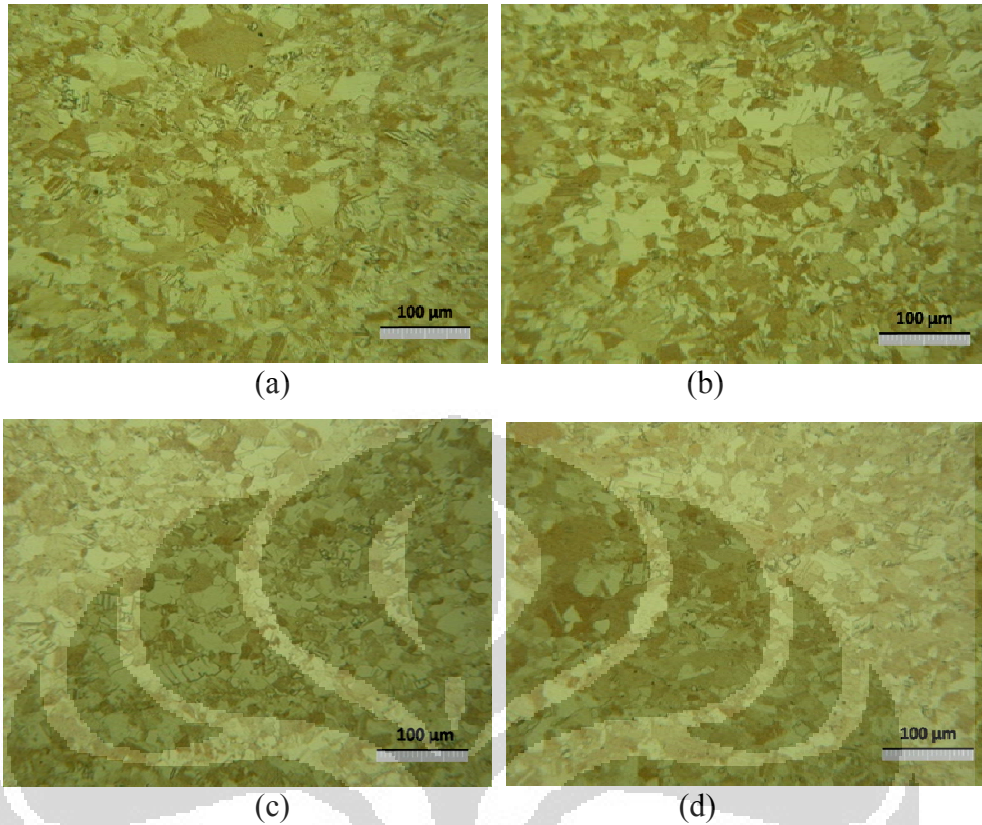
Retakan pada sampel seperti terlihat di gambar 4.2 (a), (c), dan (d) merupakan retakan yang telah ada pada sampel akibat tegangan internal yang terjadi akibat pengerjaan dingin sebelum dianil, yaitu sesuai dengan sejarah sampel yang awalnya berbentuk plat hasil *rolling*. Sedangkan pada gambar 4.2 (b) terlihat adanya titik hitam pada sampel, titik hitam tersebut mungkin berasal dari pengotor, cacat-cacat tersebut dapat dilihat pada gambar 4.3. Cacat-cacat tersebut dapat berakibat kurang baik jika dilakukan percobaan ECAP karena dapat menjadi penyebab kegagalan.



Gambar 4.3. Cacat pada mikrostruktur akibat permesinan^[16].

Selain cacat, dari pengamatan mikrostruktur juga dapat dilihat penyebaran ukuran butir sampel. Penyebaran ukuran butir merupakan hal yang penting karena berpengaruh pada sifat mekanis, distribusi ukuran butir yang merata akan memberikan sifat mekanik yang baik di seluruh sisi sampel. Persebaran ukuran butir sampel dapat dilihat pada gambar 4.4. Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa sampel dengan temperatur anil 600°C dengan waktu tahan 90 menit menghasilkan distribusi ukuran butir yang lebih merata dibandingkan dengan temperatur anil lainnya.

Dari hasil pengamatan visual tersebut, maka temperatur yang dipilih untuk percobaan ECAP adalah 600°C dengan waktu tahan 90 menit. Hal tersebut juga berdasarkan studi literatur beberapa jurnal yang juga memulai ECAPnya dengan diameter awal yang tidak terlalu kecil melalui hasil anil pada temperatur 600°C.



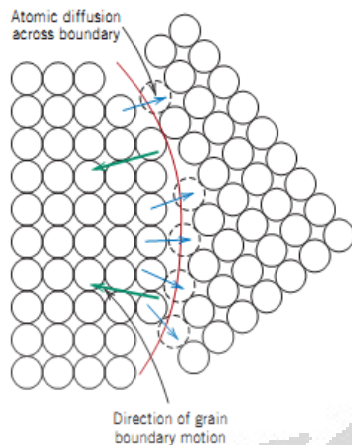
Gambar 4.4. Sampel anil *holding* 90 menit dengan temperatur anil (a) 500°C, (b) 550°C, (c) 600°C, dan (d) 700°C.

4.1.2 Perhitungan Ukuran Butir

Tabel 4.2. Ukuran butir hasil anil dengan waktu tahan 90 menit

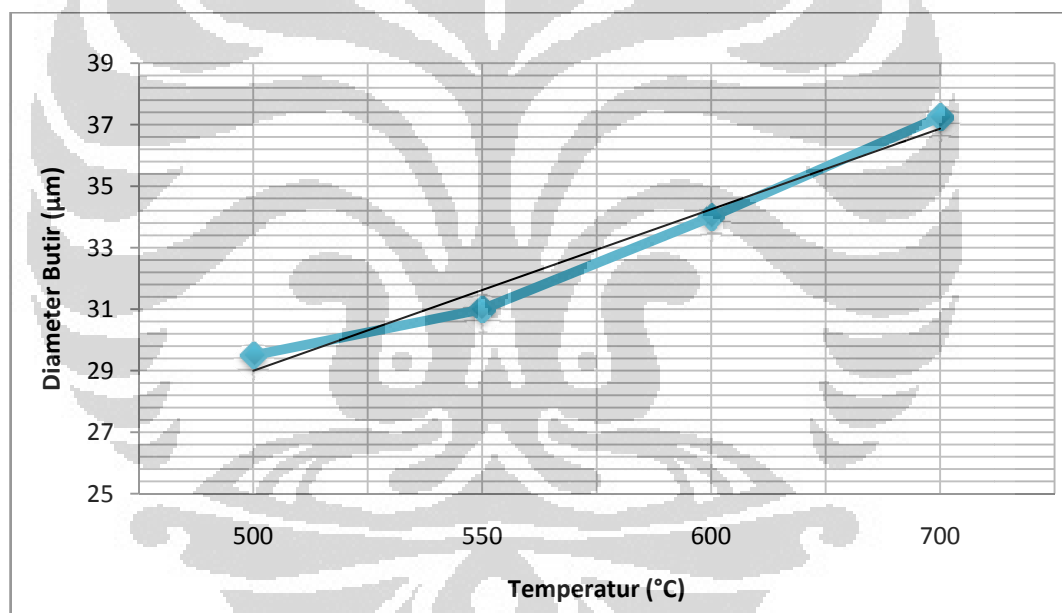
No.	Temperatur Anil (°C)	Diameter Butir (μm)
1	500	29.5
2	550	31
3	600	34
4	700	37.25

Dari foto mikro maka dapat dilakukan perhitungan ukuran butir sampel. Perhitungan butir kali ini dilakukan dengan metode planimetri (Jefferies). Perhitungan butir tidak dilakukan pada ke 16 sampel melainkan hanya beberapa sampel. Ukuran butir dari empat sampel yang mendapat waktu tahan anil 90 menit dengan temperatur anil 500°C, 550°C, 600°C, dan 700°C dapat dilihat pada tabel di bawah ini.



Gambar 4.5. Skema pembesaran butir^[1].

Dari tabel 4.2, maka dapat kita lihat adanya kenaikan ukuran butir pada sampel yang temperatur anilnya lebih tinggi. Hal tersebut sesuai dengan literatur^[1], semakin tinggi temperatur anil maka semakin besar butir yang dihasilkan. Grafik kenaikan ukuran butir pada kenaikan temperatur anil dapat dilihat pada gambar 4.6. Pembesaran butir pada temperatur tinggi disebabkan oleh meningkatnya pergerakan atom yang menyebabkan difusi yang mengakibatkan pembesaran ukuran butir. Skema dari difusi atom pada pembesaran butir dapat dilihat pada gambar 4.5.



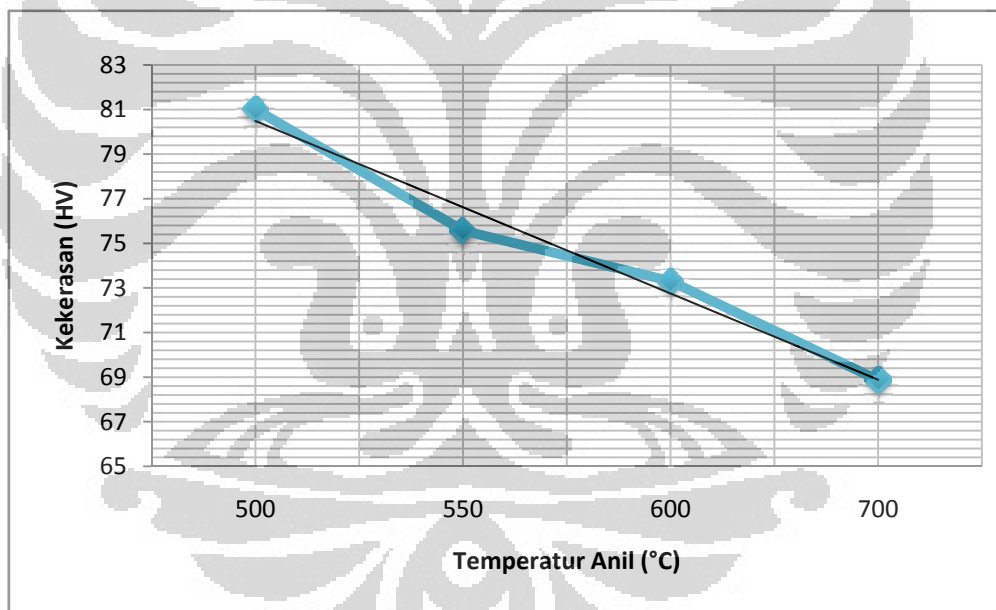
Gambar 4.6. Grafik hubungan temperatur dan diameter butir sampel hasil anil.

4.1.3 Pengukuran Kekerasan Mikro

Pengukuran kekerasan mikro sampel anil pra ECAP dilakukan menggunakan metode Vickers. Hasil pengukuran kekerasan mikro dari sampel yang telah dianil pada empat macam temperatur dapat dilihat pada tabel 4.3. Sedangkan grafik penurunan kekerasan mikro juga dapat dilihat pada gambar 4.7. Pada tabel dapat dilihat nilai dari 3 penjejakkan dan nilai kekerasan rata-ratanya.

Tabel 4.3. Kekerasan sampel dengan waktu tahan 90 menit

Temperatur Anil	Kekerasan Vickers (HV)	
	Kekerasan 1 Titik	Rata-rata
500°C	80.2	81
	82.6	
	80.2	
550°C	77.0	76
	74.0	
	75.7	
600°C	73.2	73
	71.0	
	75.7	
700°C	68.1	69
	67.0	
	71.5	



Gambar 4.7. Grafik hubungan temperatur dan kekerasan sampel hasil anil.

Dari hasil tersebut maka dapat dilihat adanya penurunan nilai kekerasan dengan bertambahnya temperatur anil. Penurunan nilai kekerasan merupakan akibat dari pembesaran butir seperti terlihat pada pembahasan sebelumnya dan sesuai dengan literatur^[1]. Pembesaran butir mengakibatkan penurunan kekerasan akibat pergerakan dislokasi yang semakin bebas dengan semakin berkurangnya batas butir. Dengan adanya peningkatan pergerakan dislokasi maka deformasi

akan lebih mudah terjadi, atau dengan kata lain menurunkan kekerasan dari suatu material.

4.2 Pengujian ECAP 120°

Proses pengujian ECAP dilakukan secara manual seperti dilihat pada gambar 4.8 menggunakan mesin tekan hidrolik yang berkapasitas 40 ton. ECAP dilakukan dengan 3 sampel dimana ada sampel yang dikenakan 1, 2, dan 3 kali *passing*. Proses ECAP dilakukan menggunakan pelumas cair mesin, tonna T-64 dengan rute Bc. Pelumasan dilakukan untuk mengurangi gesekan dan memudahkan masuk sampel dengan toleransi ukuran dengan *dies* yang rendah.



Gambar 4.8. Proses pengujian ECAP menggunakan mesin tekan hidrolik.

4.2.1 Analisis Visual

4.2.1.1 ECAP 1 kali *passing*

Pada ECAP dengan 1 kali *passing* percobaan dilakukan dengan lebih mudah dan beban yang lebih rendah. Sampel hasil percobaan memiliki panjang tidak jauh berbeda dengan sampel awal namun terlihat pembulatan menyerupai *doom* pada ujung-ujungnya. Pembulatan ujung sampel terjadi akibat pembelokan paksa sampel pada *dies*. Selain pada ujung, pada pinggiran sampel juga terjadi

penyiripan akibat pemasangan baut pada *dies* yang kurang kencang dan tidak dapat menahan tekanan dari sampel yang berbelok.



Gambar 4.9. Sampel hasil ECAP dengan sudut 120°.

4.2.1.2 ECAP 2 kali *passing*



Gambar 4.10. Proses Pengujian ECAP 120°.

terjadi penggendutan atau penambahan diameter dari sampel sehingga perlu dilakukan pengecilan diameter agar sampel dapat dimasukkan ke dalam *dies* untuk *passing* berikutnya. Pengecilan diameter dilakukan dengan cara tradisional yaitu dengan cara menggerinda pinggiran-pinggiran sampel sekaligus untuk menghilangkan sirip pada pinggir sampel. Pada *passing* kedua, prosesnya sama dengan *passing* pertama namun dilakukan pemutaran 90° searah jarum jam.

Pada *passing* pertama proses ECAP terjadi penggendutan atau penambahan diameter dari sampel sehingga perlu dilakukan pengecilan diameter agar sampel dapat dimasukkan ke dalam *dies* untuk *passing* berikutnya. Pengecilan diameter dilakukan dengan cara tradisional yaitu dengan cara menggerinda pinggiran-pinggiran sampel sekaligus untuk menghilangkan sirip pada pinggir sampel. Pada *passing* kedua, prosesnya sama dengan *passing* pertama namun dilakukan pemutaran 90° searah jarum jam.

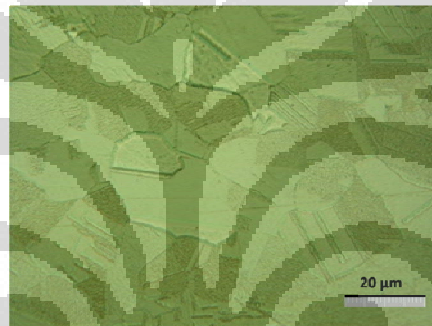
Hasil dari sampel ECAP 2 kali *passing* lebih pendek dari ketika dari 1 kali *passing*. Kondisi geometri dari sampel sendiri menyerupai bentuk buncis karena mengalami pendorongan dari sampel berikutnya, sehingga sampel dapat dikeluarkan tanpa membongkar kembali *dies* seperti dapat dilihat pada gambar 4.10. Dengan dilakukan pemasukkan sampel berikutnya maka proses ECAP akan dapat dilakukan lebih cepat namun sampel yang mendorong dari atas akan

memiliki perbedaan ukuran butir karena terjadinya penambahan diameter yang tidak seharusnya dan pemendekan, meskipun hanya sedikit.

4.2.1.3 ECAP 3 kali *passing*

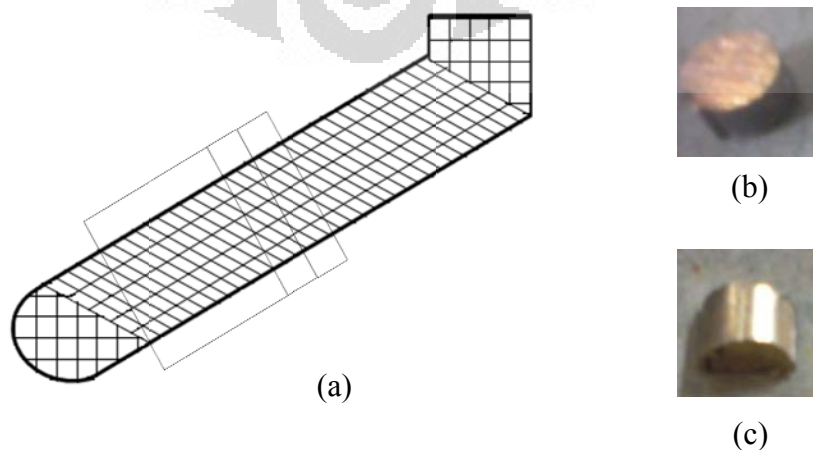
Sebelum *passing* ketiga sampel harus dikurangi ukuran diameternya seperti pada *passing* kedua. Proses pengujian masih sama, namun penekanan yang dilakukan secara manual terasa lebih berat dari *passing* pertama dan kedua. Untuk hasil sampelnya merupakan yang terpendek namun tidak terlalu jauh berbeda. Bentuk *doom* pada ujung dan penyiripan pada sampel juga masih terjadi namun tidak jauh berbeda dengan *passing* pertama dan kedua.

4.2.2 Analisis Struktur Mikro



Gambar 4.11. Foto mikro sampel yang akan di-ECAP dengan perbesaran 500 x.

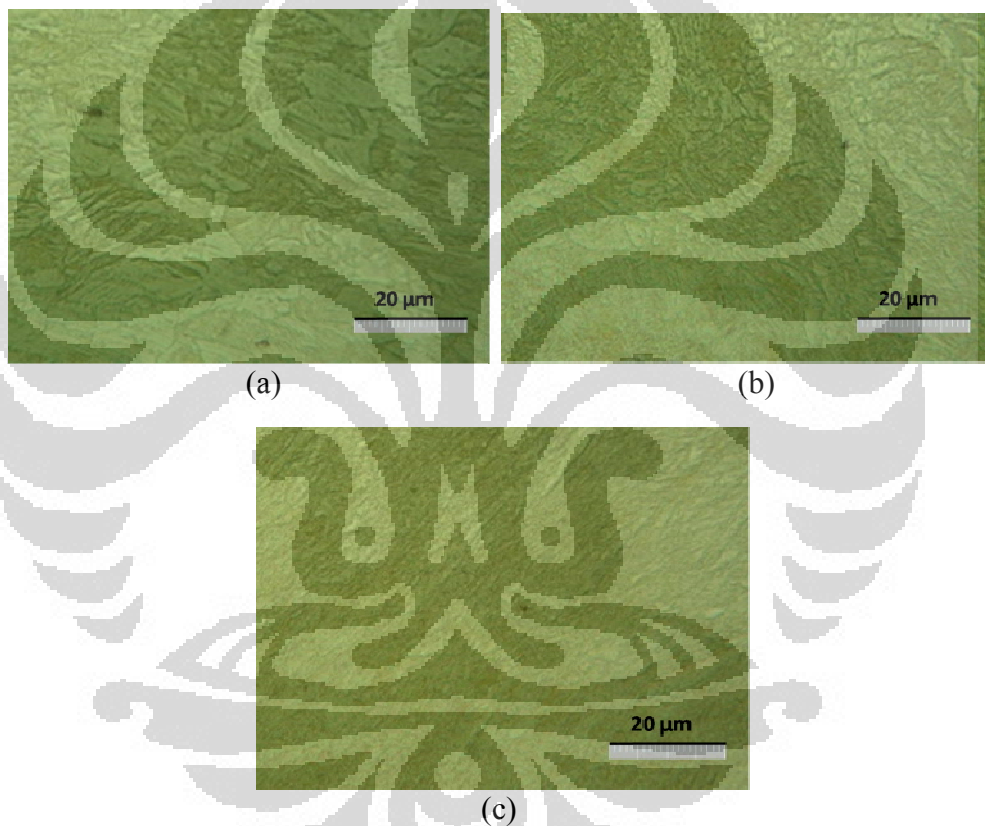
Struktur mikro sampel untuk ECAP yang telah dianil pra ECAP pada suhu 600°C dan diberi waktu tahan 90 menit dapat dilihat pada gambar 4.11. Butir sampel sebelum di-ECAP berbentuk *equiaxe* yang bebas tegangan dan memiliki distribusi ukuran yang baik. Ukuran diameter butir tersebut adalah 34 μm



Gambar 4.12. Skematik pemotongan sampel hasil ECAP 120°. (a) Skematik penghalusan butir dan bagian sampel yang dipotong menjadi 4 bagian. (b) Penampang melintang dan (c) penampang memanjang.

Untuk melakukan analisis struktur mikro dan kekerasan mikro dilakukan pemotongan spesimen pada penampang melintang dan memanjang agar dapat mengamati perbedaan sifat di setiap titik spesimen uji dan untuk mempelajari anisotropinya.

4.2.2.1 Sampel Non Anil

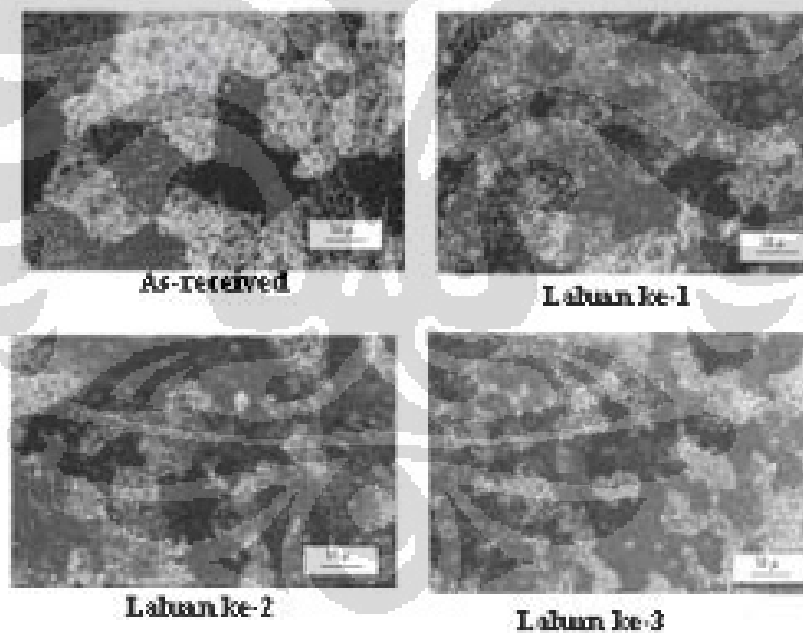


Gambar 4.13. Foto mikro sampel hasil ECAP pada perbesaran 500 x. (a) ECAP 1 kali *passing*. (b) ECAP 2 kali *passing*. (c) ECAP 3 kali *passing*.

Pada pengamatan hasil ECAP 120° pada potongan sisi melintang sampel yang tidak dianil dapat dilihat distorsi butir yang berbentuk *elongated*. Setelah *passing* pertama terlihat bentuk butir pipih menyerong pada arah ECAP. Pada *passing* kedua butir terlihat bertambah kecil dan bentuknya tidak terlalu serong seperti pada *passing* pertama. Sedangkan, pada *passing* ketiga bentuk butir kembali

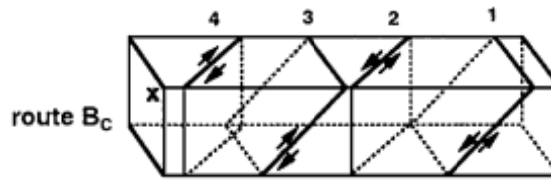
menyerong dan terlihat lebih pipih dari bentuk butir pada *passing* pertama dan menyerupai jarum. Perubahan bentuk butir menjadi seperti jarum tersebut menandakan adanya penghalusan butir yang besar dan efektif.

Penyerongan bentuk butir hasil ECAP yang berbeda-beda pada perbedaan jumlah *passing* dipengaruhi oleh rute pemutaran sampel, yaitu rute Bc. Skema perubahan bentuk butir tersebut dapat dilihat pada gambar 4.14, dari gambar tersebut dapat dilihat dimensi perubahan bentuk butir sampel berdasarkan penelitian lain. Pada gambar 4.14 penghalusan butir yang terlihat tidak sebesar pada gambar 4.13, hal tersebut juga didukung dari ukuran butirnya yang masih lebih besar. Perbedaan keefektifan penghalusan butir dikarenakan karena perbedaan material dimana material yang digunakan pada gambar 4.14 adalah Al yang memiliki % elongasi 50, sedangkan kuningan yang telah dianil memiliki % elongasi 54-68.



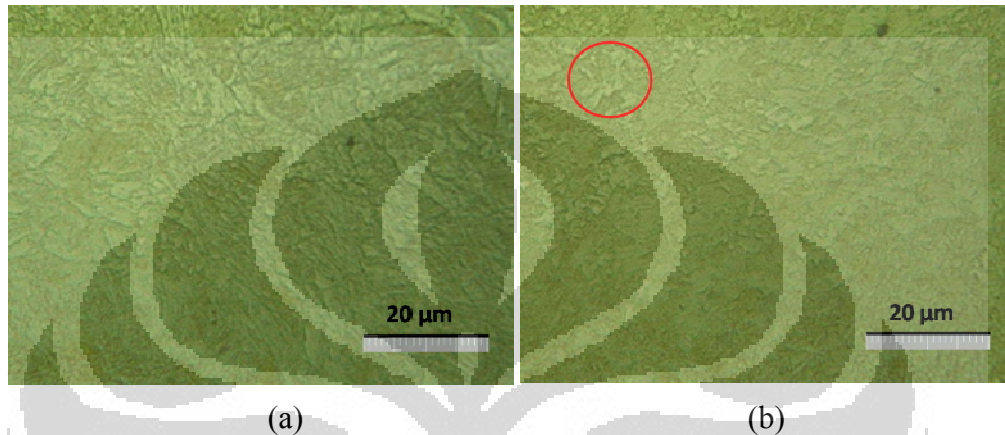
Gambar 4.14. Hasil ECAP aluminium sudut cetakan 90° dengan rute C^[23].

Jika dibandingkan dibandingkan dengan struktur mikro sampel sebelum di-ECAP maka dapat dilihat perubahan ukuran butir yang signifikan dari sampel. Setelah melalui ECAP sampel juga terlihat memiliki ketidak-teraturan penyebaran ukuran butir yang cukup besar. Ketidak-teraturan tersebut semakin besar dengan penambahan jumlah *passing* sampel seperti dapat dilihat pada gambar 4.13.

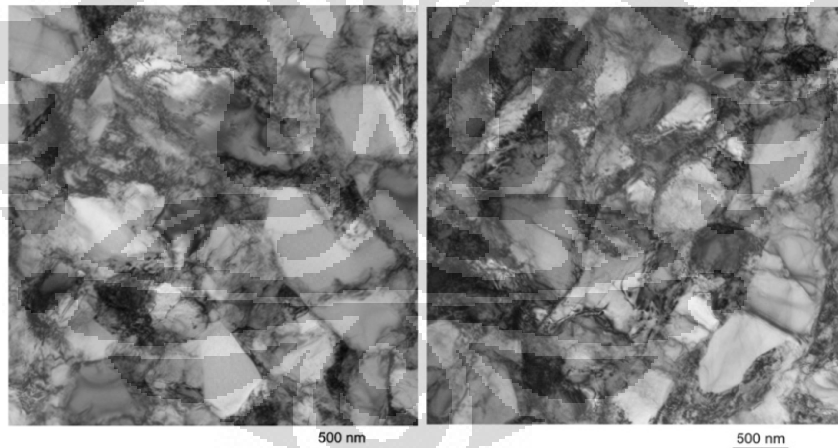


Gambar 4.15. Skematik sistem slip pada material ECAP dengan rute Bc.

4.2.2.2 Sampel Anil



(a) (b)
Gambar 4.16. Struktur mikro sampel hasil ECAP 2 kali passing (a) sebelum dianil dan (b) sesudah dianil.



Gambar 4.17. Struktur mikro sampel hasil ECAP Al sudut 90° dengan rute 8C (a) sebelum dianil dan (b) sesudah dianil pada suhu 300° selama 1 jam^[24].

Anil pasca ECAP dilakukan untuk merikristalisasi butir dan memberi ketangguhan yang lebih baik. Anil dilakukan selama 15 menit dari temperatur kamar hingga suhu 400° tanpa waktu tahan. Pada sampel hasil anil dapat terlihat penyebaran ukuran butir semakin baik dan dapat terlihat adanya nukleasi butir-butir yang terekristalisasi seperti pada gambar 4.16. Pemecahan butir akibat

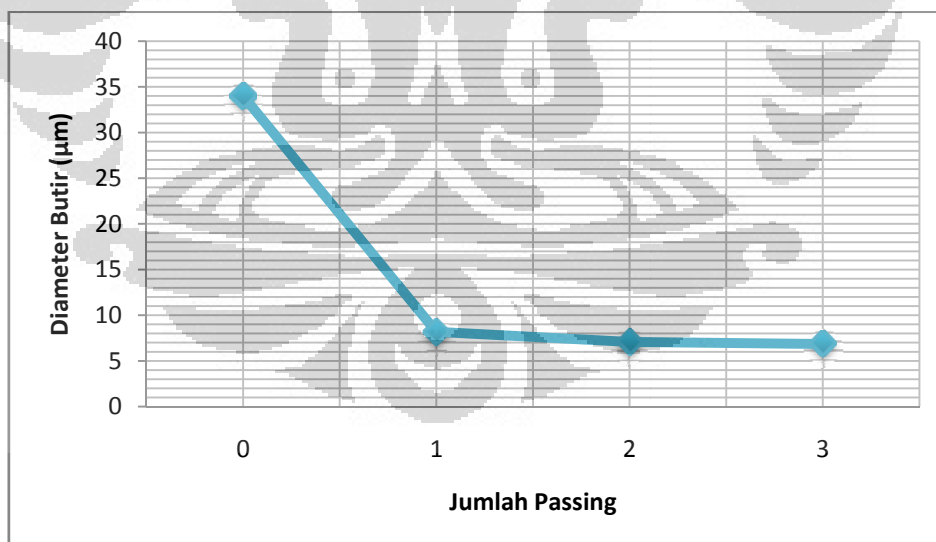
proses rekristalisasi dapat terlihat pada lingkaran merah pada gambar 4.16 (b). Proses anil ini diharapkan dapat menurunkan efek anisotropi dan meningkatkan ketangguhan dari material.

Pada gambar 4.17 dapat dilihat sampel ECAP dengan sudut cetakan 90° yang telah dianil pada material Al. Pada gambar tersebut juga terjadi penyeragaman ukuran butir dan terlihat ukuran butir yang semakin mengecil akibat rekristalisasi. Butir – butir baru hasil nukleasi seperti gambar 4.16 terlihat tidak ada akibat adanya waktu tahan 1 jam pada sampel tersebut. Dengan memberikan waktu tahan maka akan memberikan waktu butir untuk berkembang.

4.2.3 Perhitungan Ukuran Butir

4.2.2.1 Sampel Non Anil

Ukuran butir sampel sebelum ECAP hingga passing pertama menunjukkan penurunan ukuran diameter yang sangat signifikan dan penurunan yang tidak terlalu besar untuk *passing* yang selanjutnya. Ukuran butir sampel sebelum di-ECAP yang awalnya berukuran lebih dari 30 μm menjadi kurang dari 10 μm , yang juga bisa disebut butir ultra halus.



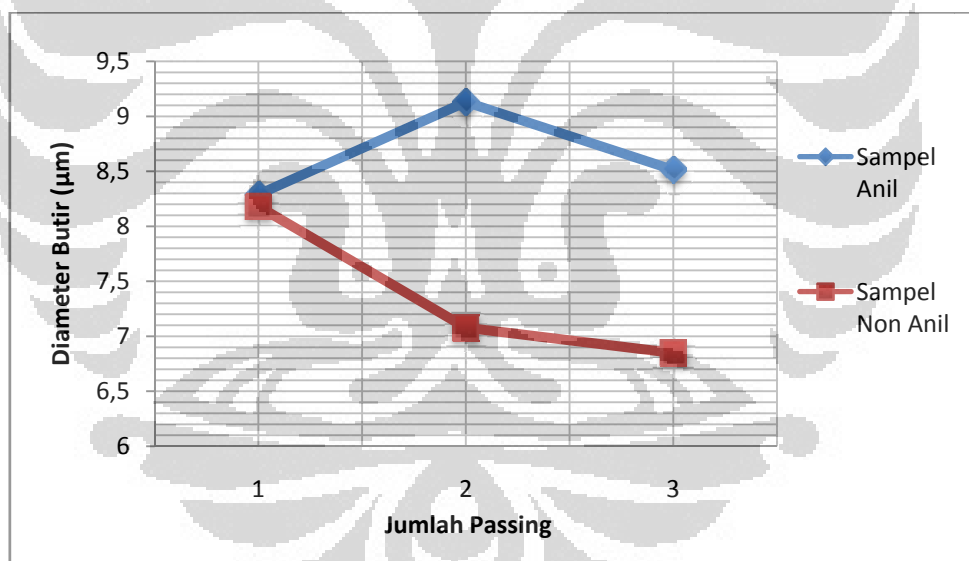
Gambar 4.18. Grafik diameter butir sampel sebelum dan sesudah ECAP.

Penurunan drastis ukuran butir menjelaskan proses penghalusan butir yang sangat efektif melalui metode ECAP. Dengan proses ekstrusi yang cukup sederhana sudah bisa didapatkan butir yang ultra halus

4.2.2.2 Sampel Anil

Dari gambar 4.19 dapat terlihat kenaikan ukuran butir yang cukup besar pada sampel hasil ECAP sebelum dan sesudah dianil. Hasil yang cukup mengejutkan didapatkan pada hasil anil sampel 1 kali *passing*, dimana kenaikan ukuran diameter butir sangat sedikit dan berbeda cukup jauh dibandingkan sampel hasil anil yang lain. Kenaikan diameter butir ini dikarenakan energi internal yang terdapat pada sampel hanya sedikit akibat hanya mengalami 1 kali *passing*. Sedikitnya energi internal pada sampel menyebabkan pelepasan tegangan yang juga sedikit sehingga menghasilkan peningkatan diameter butir yang juga sedikit.

Rata-rata selisih kenaikan ukuran diameter butir sebelum dan setelah dianil adalah $1.27 \mu\text{m}$. Nilai selisih tersebut cukup besar mengingat anil dilakukan pada suhu 400° dan tanpa waktu tahan dengan tujuan hanya untuk menghomogenkan ukuran butir dan *recovery* butir.



Gambar 4.19. Grafik perbedaan diameter butir sampel sebelum dan sesudah ECAP.

4.2.4 Analisis Kekerasan Mikro

4.2.2.1 Sampel Non Anil

Pengambilan bagian sampel yang diuji keras dibagi menjadi bagian melintang dan memanjang. Pada setiap spesimen uji diambil tiga titik dalam satu garis yang akan diuji kekerasannya. Pada ketiga titik tersebut terdapat perbedaan

nilai kekerasan. Perbedaan nilai kekerasan tersebut dapat terjadi akibat perbedaan mikrostruktur, cacat seperti *vacancy*, pengotor, inklusi dan retak, ataupun perbedaan nilai regangan ECAP yang berbeda pada setiap titik. Namun, perbedaan kekerasan tersebut tidak terlalu jauh berbeda sehingga kemungkinan besar bukan akibat adanya cacat melainkan akibat perbedaan ukuran butir.

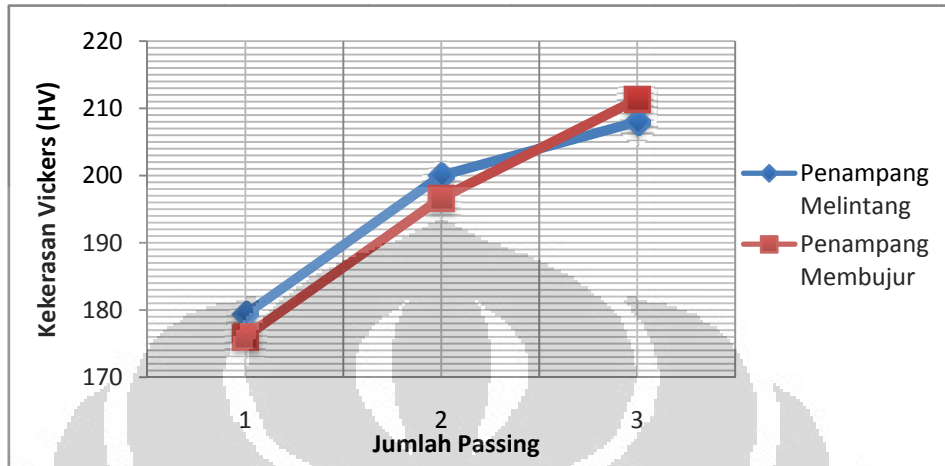
Tabel 4.4. Kekerasan sampel hasil ECAP non anil pada sisi melintang dan memanjang.

Sampel Non Anil	Jumlah Passing	Kekerasan Vickers (HV)	
		Kekerasan 1 Titik	Rata-rata
Melintang	1	173.5	179
		176.5	
		188	
	2	192	200
		204	
		204	
	3	206	208
		208	
		210	
Memanjang	1	160	176
		173	
		195	
	2	185	197
		199	
		206	
	3	210	211
		206	
		218	

Jika dibandingkan dengan kekerasan sampel sebelum di-ECAP, 73.3 HV, maka dapat dilihat kenaikan kekerasan yang cukup tinggi, peningkatan kekerasan ini terjadi akibat adanya penurunan diameter ukuran butir.

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan pada bagian melintang dan memanjang dari sampel dapat dilihat kenaikan kekerasan pada kenaikan jumlah *passing*. Kenaikan kekerasan ini juga didukung dengan pengukuran butir pada bahasan sebelumnya yang juga mengatakan adanya kenaikan diameter butir pada kenaikan jumlah *pass*. Selisih ukuran butir pada kedua penampang tersebut juga

menunjukkan anisotropi yang tidak terlalu besar dan akibat pengambilan titik tidak mewakili sifat anisotropi sampel mengingat elongasi butir yang cukup besar seperti pada pengamatan mikrostrukturnya.



Gambar 4.20. Grafik kekerasan sampel ECAP tanpa proses anil.

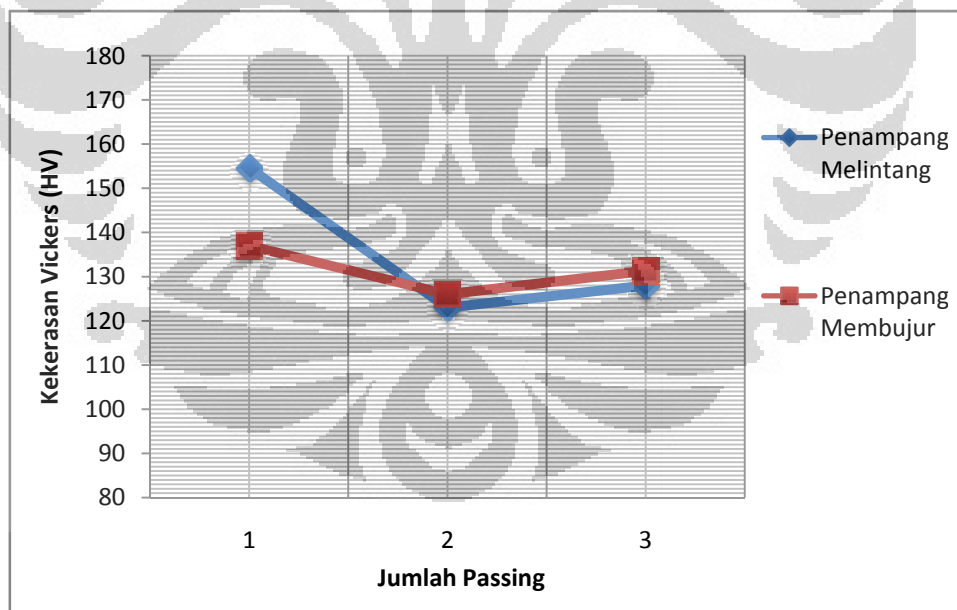
4.2.2.2 Sampel Anil

Tabel 4.5. Kekerasan sampel hasil ECAP non anil pada sisi melintang dan memanjang.

Sampel Anil	Jumlah Passing	Kekerasan Vickers (HV)	
		Kekerasan 1 Titik	Rata-rata
Melintang	1	155	155
		154.3	
		154.5	
	2	123	123
		123	
		123	
3	126	128	
	129		
	129		
Memanjang	1	137	137
		151	
		123	
	2	125	126
		128	
		125	
	3	132	131
		132	
		130	

Sama seperti sampel yang tidak dianil, pengambilan bagian sampel yang diuji keras dibagi menjadi bagian melintang dan memanjang. Pada setiap spesimen uji diambil tiga titik dalam satu garis yang akan diuji kekerasannya. Secara umum, hasil pengujian kekerasan menghasilkan penurunan setelah proses anil, penurunan kekerasan diakibatkan butir-butir baru terekristalisasi yang bebas regangan (*strain free*) yang sifat mekanisnya kembali seperti sebelum mengalami deformasi.

Perbedaan kekerasan pada tiap titik tidak terlalu berbeda jauh kecuali pada sampel uji bagian memanjang *passing* 1. Pada satu titik itu dapat dilihat ada salah satu titik yang memiliki kenaikan kekerasan yang cukup jauh dan juga menjadikan hasilnya tidak sesuai dengan literatur yang mengatakan bahwa semakin banyak jumlah *passing* maka akan menaikkan nilai kekerasan sampel. Peningkatan kekerasan yang meningkat ini dapat terjadi oleh beberapa sebab seperti akibat adanya inklusi yang menyebabkan peningkatan kekerasan yang cukup besar atau akibat regangan yang tidak merata pada proses ECAP.

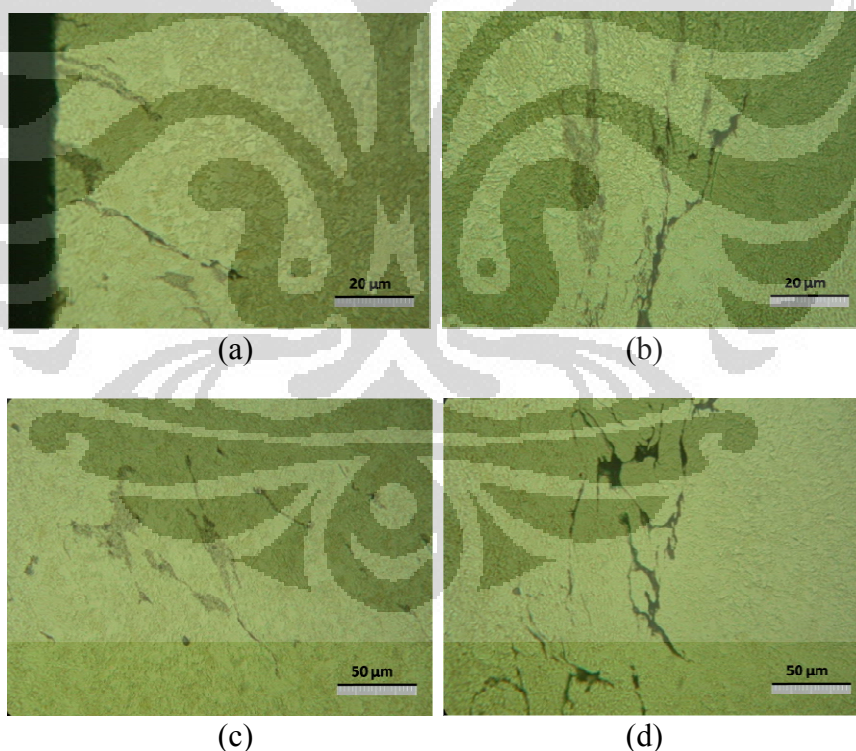


Gambar 4.21. Grafik kekerasan sampel ECAP setelah dianil.

Hasil perbandingan kekerasan setelah dilakukan proses anil pada sampel yang telah di-ECAP 1, 2 dan 3 kali *passing* mendapatkan hasil yang timpang pada hasil ECAP 1 kali *passing*, dimana setelah dianil kekerasan sampel yang di-ECAP

1 kali *passing* justru lebih besar dari ECAP 2 dan 3 kali *passing*. Penurunan kekerasan yang cukup besar tersebut tidak wajar mengingat temperatur dan waktu tahan penganilan ketiga sampel adalah sama. Pada sampel anil 1 kali *passing* pada penampang melintang dan memanjang terlihat perbedaan yang cukup jauh dibandingkan yang lainnya.

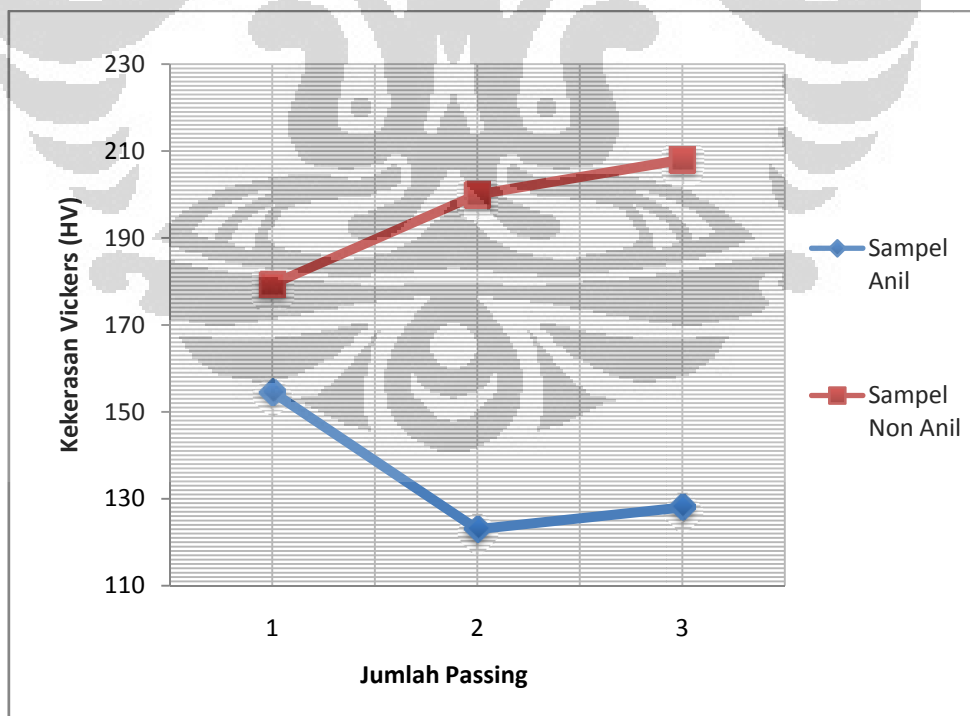
Hasil perbandingan kekerasan setelah dilakukan proses anil pada sampel yang telah di-ECAP 1, 2 dan 3 kali *passing* mendapatkan hasil yang timpang pada hasil ECAP 1 kali *passing*, dimana setelah dianil kekerasan sampel yang di-ECAP 1 kali *passing* justru lebih besar dari ECAP 2 dan 3 kali *passing*. Penurunan kekerasan yang cukup besar tersebut tidak wajar mengingat temperatur dan waktu tahan penganilan ketiga sampel adalah sama. Pada sampel anil 1 kali *passing* pada penampang melintang dan memanjang terlihat perbedaan yang cukup jauh dibandingkan yang lainnya.



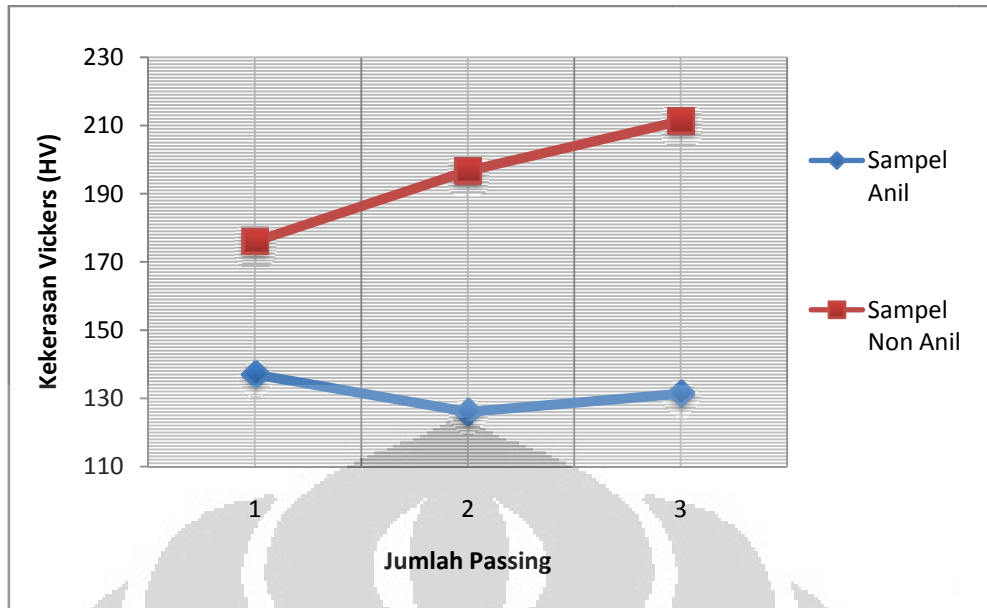
Gambar 4.22. Cacat hasil ECAP (a) dan (b) merupakan retakan pada sampel ECAP 2 kali *passing*, sedangkan (c) dan (d) merupakan retakan pada sampel 3 kali *passing*.

Kemungkinan perbedaan kekerasan tersebut adalah karena adanya retak yang cukup banyak pada spesimen uji 2 dan 3 kali *passing* dan kesalahan titik pengujian yang tepat atau berada di dekat retak tersebut. Pada sampel 1 kali *passing*, retak yang ditemukan hanya sedikit. Hal tersebut dapat dibuktikan pada foto mikro yang menunjukkan retak yang cukup besar. Retak tersebut mengurangi kekerasan karena menjadi inisiasi deformasi sehingga mengurangi nilai kekerasan. Kemungkinan lainnya adalah akibat proses rekristalisasi.

Untuk terjadinya rekristalisasi diperlukan nilai kritis dari pengerjaan dingin. Jika deformasi terlalu rendah, maka rekristalisasi tidak dapat terjadi. Semakin besar deformasi atau pengerjaan dingin yang dilakukan maka laju rekristalisasi akan semakin meningkat. Pada sampel hasil ECAP dengan 1 kali *passing* deformasi yang dihasilkan oleh peregangan yang terjadi tidak sebesar ECAP dengan 2 atau 3 kali *passing*, hal tersebutlah yang menyebabkan rekristalisasi pada hasil ECAP 1 kali *passing* tidak terlalu efektif dan mengakibatkan penurunan kekerasan yang paling rendah dibandingkan yang lainnya.

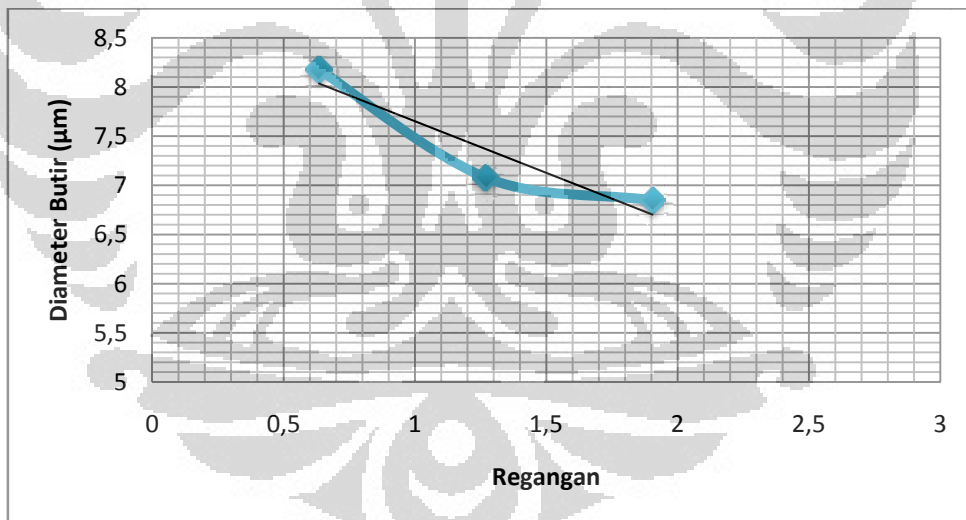


Gambar 4.23. Grafik perbandingan kekerasan pada penampang melintang sampel tanpa dan dengan anil.



Gambar 4.24. Grafik perbandingan kekerasan pada penampang memanjang sampel tanpa dan dengan anil.

4.3 Hubungan Regangan dengan Diameter Butir



Gambar 4.25. Grafik perbandingan regangan dengan ukuran diameter butir.

Setiap kali melakukan *passing* pada ECAP terjadi proses peregangan atau pergeseran pada butir. Regangan setiap kali melakukan *passing* tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right] \quad (4.1)$$

Dimana,

ε_N = Jumlah regangan

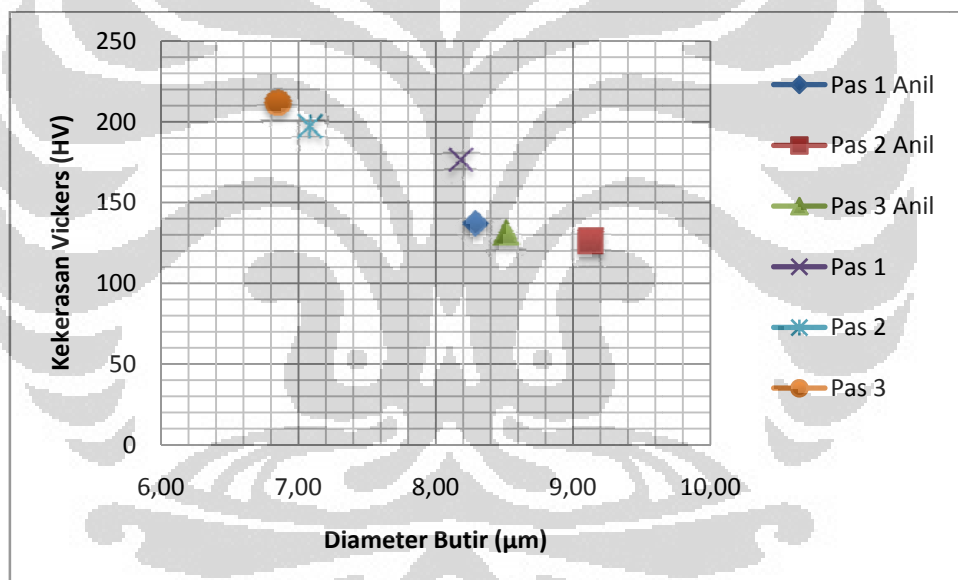
N = Jumlah *passing*

Φ = Sudut *dies* (dalam radian)

Ψ = Sudut pembelokan bawah *dies* (dalam radian)

Pada gambar 4.25, setiap titik regangan juga dapat diartikan penambahan jumlah *passing*. Pada gambar juga dapat terlihat bahwa regangan yang hampir sama memberikan penghalusan butir yang lebih besar, namun secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa penambahan regangan memberikan penghalusan butir yang lebih besar.

4.4 Hubungan Diameter Butir dengan Kekerasan



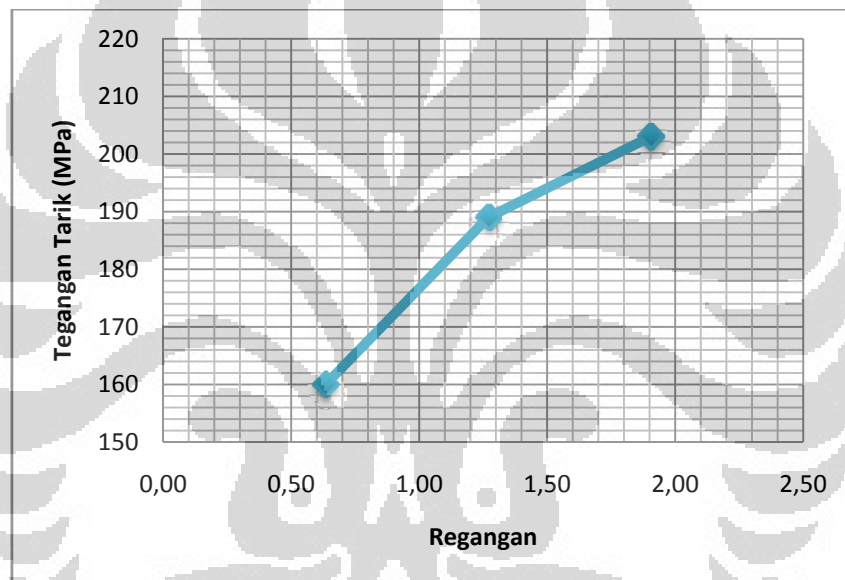
Gambar 4.26. Grafik hubungan diameter butir dengan kekerasan pada sampel pas 1, 2 dan 3 sebelum dan sesudah dianil.

Hubungan diameter butir dan kekerasan merupakan hubungan berbanding terbalik, dimana dengan berkurangnya ukuran butir maka kekerasannya akan bertambah. Penambahan kekerasan diakibatkan oleh terhalangnya pergerakan dislokasi logam. Pada percobaan kali ini juga didapatkan hasil yang sama, yaitu pengurangan ukuran butir meningkatkan kekerasan materialnya baik pada sampel hasil ECAP yang dianil ataupun tidak, seperti pada gambar 4.26. Meskipun tidak

merupakan satu garis lurus, dapat dilihat adanya peningkatan kekerasan akibat penghalusan butir.

4.5 Hubungan Regangan dengan Tegangan Tarik

Meskipun tidak mengukur tegangan tarik secara langsung, tegangan tarik dari material dapat dihitung melalui konversi kekerasan Brinnell. Pada percobaan kali ini pengukuran kekerasan yang dilakukan adalah metode Vickers sehingga harus dilakukan konversi terlebih dahulu dari HV menjadi HB. Setelah mendapatkan nilai kekerasan HB maka dapat dikonversi melalui persamaan berikut:



Gambar 4.27. Grafik hubungan regangan dengan tegangan tarik.

$$TS \text{ (MPa)} = 3.45 \times HB \quad (4.2)$$

Dimana TS merupakan tegangan tarik dan HB merupakan kekerasan Brinnell.

Hubungan regangan dengan tegangan tarik sampel dapat dilihat pada gambar 4.27. Setiap titik regangan pada gambar tersebut mewakili jumlah *passing* sampel sehingga dapat dikatakan bahwa peningkatan regangan meningkatkan tegangan tarik atau peningkatan jumlah *passing* juga meningkatkan tegangan tarik.

BAB V

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari serangkaian pengujian yang meliputi anil pra ECAP, ECAP dengan sudut 120°, dan anil pasca ECAP ini berdasarkan data dan analisis penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kenaikan temperatur dan waktu tahan anil dapat meningkatkan ukuran butir dan keuletan, namun juga mengurangi kekerasan logam kuningan. Proses anil menjadikan butir lebih homogen dan lebih besar, temperatur anil yang efektif untuk prose pra ECAP adalah 600°C dengan waktu tahan 90 menit.
2. Penganilan selama 15 menit hingga temperatur 400°C tanpa waktu tahan pada sampel hasil ECAP menjadikan butir lebih besar dan menurunkan kekerasan yang cukup signifikan. Laju kristalisasi pada anil dipengaruhi oleh derajat deformasi sebelum proses anil.
3. Proses ECAP dengan besar regangan 1,90 meningkatkan kekerasan dari 73 HV menjadi 210 HV. Peningkatan kekerasan dipengaruhi oleh ukuran butir akibat mekanisme dislokasi pada butir dan regangan. Kenaikan regangan, yang merupakan fungsi dari jumlah *passing*, memberikan penghalusan butir yang lebih besar dan meningkatkan kekerasan.
4. Peningkatan tegangan tarik, yang dihitung melalui nilai kekerasannya, juga dipengaruhi oleh regangan dan diameter butir.

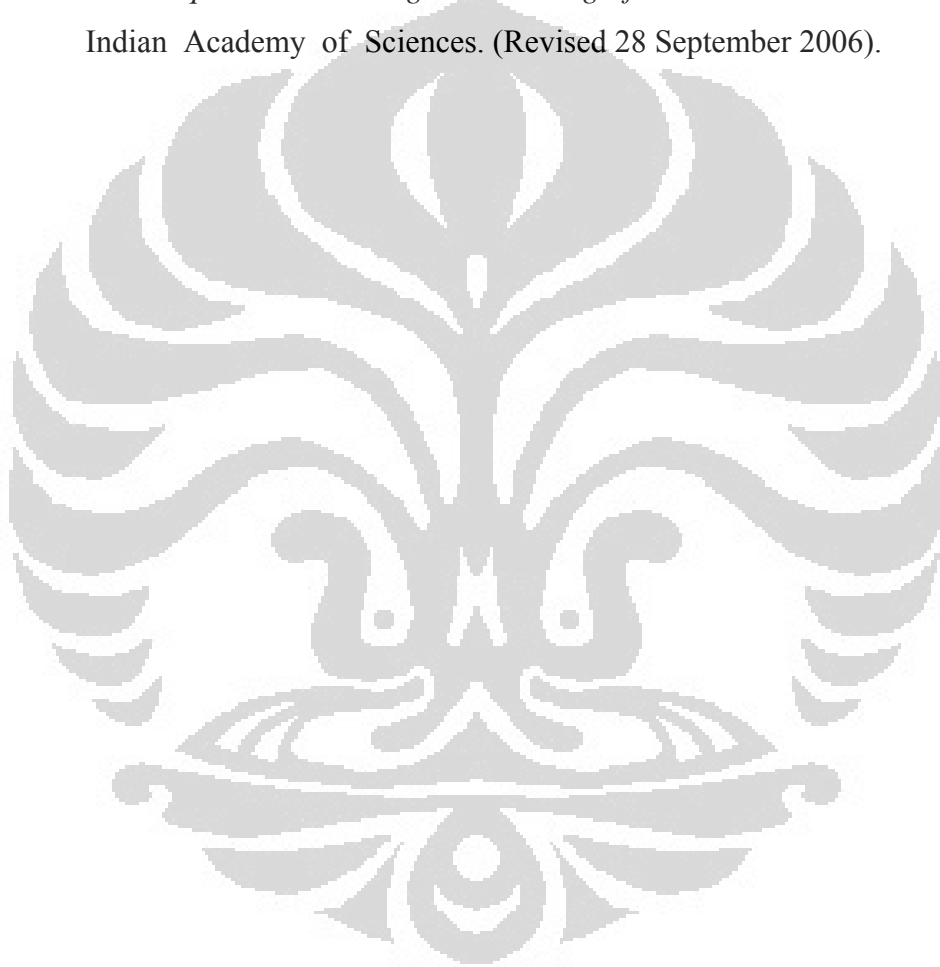
DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Callister, W. D Jr., *Material Science And Engineering, An Introduction*, Salt Lake City, Utah, 1985
- [2]. Dieter, G. E., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Book Company, London, 1988
- [3]. LA Van Vlack, Sriati Djafrie, *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Erlangga, Jakarta, 1992.
- [4]. ASTM E112:Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- [5]. Honeycombe, R. W. K., *The Plastic Deformation of Metals*, Edward Arnold, London, 1977
- [6]. *ASM Handbook Vol. IX: Metallography and Microstructures*. Edited by Robert T. Kieppura and Bonnie R. Sanders. Ohio: American Society for Metal, 1992.
- [7]. R. E. Napolitano, *Measurement of ASTM Grain Size Number*, Material Science & Engineering, Iowa State University.
- [8]. A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, *Severe plastic deformation (SPD) processes for metals*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 716–735.
- [9]. P. Groche (2)g, J. Yanagimoto (2)h, N. Tsuji i, A. Rosochowski j, A. Yanagida aRuslan Z. Valiev, Terence G. Langdon, *a of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement*, Progress in Materials Science 51 (2006) 881–981. www.elsevier.com/locate/pmatsci
- [10]. Verlinden, Bert, *Severe plastic deformation of metals*, Association of Metallurgical Engineers Serbia and Montenegro (2008).
- [11]. J. Zrnik, S. V. Dobatkin, I. Mamuzi, *Processing of Metals by Severe Plastic Deformation (SPD) – Structure and Mechanical Respond*, METABK 2008 (Received in August 10, 2007) (Accepted in March 20, 2008).
- [12]. Cheng Xu, Zenji Horita, Minoru Furukawa, and Terence G. Langdon, *Using Equal-Channel Angular Pressing for the Production of Superplastic*

- Aluminum and Magnesium Alloys*, ASM International, (Submitted July 26, 2004).
- [13]. *ASM Handbook Vol. III: Alloy Phase Diagrams*. Edited by Hume Baker. Ohio: American Society for Metal, 1992.
- [14]. Humphreys, F.J. and M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Pergamon Press. 2004.
- [15]. Valiev, Ruslan Z. and Langdon, Terence G. *Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement*. Elsevier. 2006.
- [16]. Hyunjin Kim, Koji Matsumaru, Atsushi Takata and Kozo Ishizaki. *Reduction of Ceramic Machining Defects by Regulated Force Feeding Grinding System*. The AZo Journal of Materials Online Sep 2005.
- [17]. B.S. Lee, M.H. Kim, S.K. Hwang, S.I. Kwun, and S.W. Chae. *Grain refinement of commercially pure zirconium by ECAP and subsequent intermediate heat treatment*. South Korea. (Accepted 27 February 2006).
- [18]. X. Molodova a, G. Gottstein, M. Winning, and R.J. Hellmig. *Thermal stability of ECAP processed pure copper*. Germany. Accepted 12 January 2007).
- [19]. B.S. Lee, and M.H. Kim. *Annealing behavior of Zr702 fabricated by ECAP*. South Korea. (Accepted 5 October 2005)
- [20]. Aibin Ma, Jinghua Jiang, Naobumi Saito, Ichinori Shigematsu, Yuchun Yuan, Donghui Yang, and Yoshinori Nishida. *Improving both strength and ductility of a Mg alloy through a large number of ECAP passes*. Elsevier. (Accepted 15 January 2009).
- [21]. H.S. Kim, W.Y. Kim, and K.H. Song. *Effect of post-heat-treatment in ECAP processed Cu-40%Zn brass*. Republic of Korea. 2011.
- [22]. Y. Amouyal, S.V. Divinski, L. Klinger, E. Rabkin. *Grain Boundary Diffusion and Recrystallization in Ultrafine Grain Copper Produced by Equal Channel Angular Pressing*. Germany. 2008.
- [23]. Gunawarman, Jon Affi. *Pengaruh Rute dan Jumlah Laluan Proses Ecap Terhadap Penguatan Alumunium*. Kampus Limau Manis, Padang. 2007.
- [24]. T. Niendorf, D. Canadinc, H.J. Maier, I. Karaman. *The Role of Heat Treatment on The Cyclic Stress–Strain Response of Ultrafine-Grained*

Interstitial-Free Steel. Texas A&M University, College Station. (accepted 26 April 2007)

- [25]. Yuntian Theodore Zhu, Terry C. Lowe. *Observations and issues on mechanisms of grain refinement during ECAP process*. Materials Science and Technology Division, Los Alamos National Laboratory. (Received in revised form 1 May 2000).
- [26]. M Saravanan, R M Pillai, B C Pai, M Brahmakumar And K R Ravi. *Equal Channel Angular Pressing of Pure Aluminium—an Analysis*. Indian Academy of Sciences. (Revised 28 September 2006).



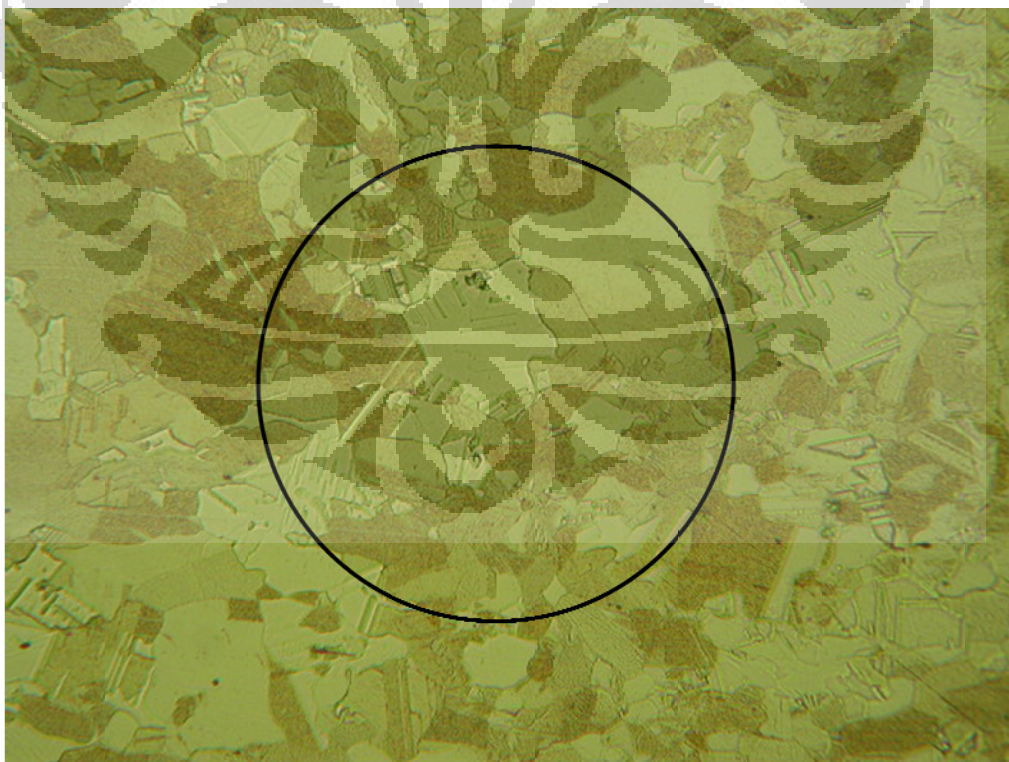
LAMPIRAN 1

CONTOH PERHITUNGAN BUTIR

Perhitungan butir dilakukan pada hasil foto mikro dengan perbesaran 500 × dengan menggunakan dua metode. Sampel anil pra ECAP dihitung butirnya menggunakan metode Planimetri dan sampel hasil ECAP dihitung butirnya menggunakan metode perbandingan. Kedua metode perbandingan diderivikasikan berdasarkan standar ASTM E 112.

1. Perhitungan butir menggunakan metode Planimetri

Pada metode Planimetri, perhitungan butir dilakukan dengan memberikan lingkaran berdiameter 79.8 mm kemudian menghitung butir yang bersinggungan dengan lingkaran dan butir di dalam lingkaran, seperti pada gambar dibawah. Untuk 1 sampel diambil 2 foto untuk dihitung dan kemudian di rata-rata.



Setelah itu, dicari jumlah butir rata-rata/mm², N_a , menggunakan persamaan,

$$\text{Jumlah butir/mm}^2, N_a = (f) (n_1+n_2/2)$$

Setelah mendapat Na cari nilai G menggunakan persamaan,

$$G = [3,322 \text{ Log} (N_A) - 2,95]$$

Setelah mendapat nilai G maka ukuran butir dapat dicari menggunakan tabel ASTM seperti berikut,

Grain Size No. G	N_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{D} Average Diameter		\bar{r} Mean Intercept		\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0565	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2018	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	358	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3988.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Setelah didapat diameter dari setiap foto, maka dapat dicari diameter rata-rata seperti tabel di bawah ini.

Sampel Anil 1,5 jam (°C)	f (500)	N ₁	N ₂	N ₂ /2	Na	G	D	Davg
500	50	13	12	6	950	6.94	32	29.5
500	50	20	14	7	1350	7.45	27	
550	50	9	14	7	800	6.69	35	31
550	50	19	16	8	1350	7.45	27	
600	50	11	17	8.5	975	6.98	32	34
600	50	8	11	5.5	675	6.45	36	
700	50	6	17	8.5	725	6.55	38	37.25
700	50	9	12	6	750	6.60	36.5	

Dimana N₁ merupakan jumlah butir di dalam lingkaran, N₂ merupakan jumlah butir yang berpotongan, D merupakan diameter, dan Davg merupakan diameter butir rata-rata.

2. Perhitungan butir menggunakan metode perbandingan

Pada metode perbandingan perhitungan ukuran butir dilakukan menggunakan garis 10 cm pada gambar yang merupakan 6,3 mm pada skala

gambar grid sepanjang 10 mm. Skala gambar grid merupakan hasil perbesaran $100 \times$ sehingga 1 mm pada gambar merupakan $1 \text{ mm}/100$, atau $10 \mu\text{m}$. Oleh karena 1 mm dalam skala adalah $10 \mu\text{m}$, maka 10 cm dalam gambar merupakan $63 \mu\text{m}$, sehingga jika ada 8 butir dalam satu garis maka ukuran butirnya adalah $\frac{63}{8} \mu\text{m}$. Contoh perhitungan butir menggunakan metode ini dilakukan dengan mengambil 10 garis pada 1 foto sampel.

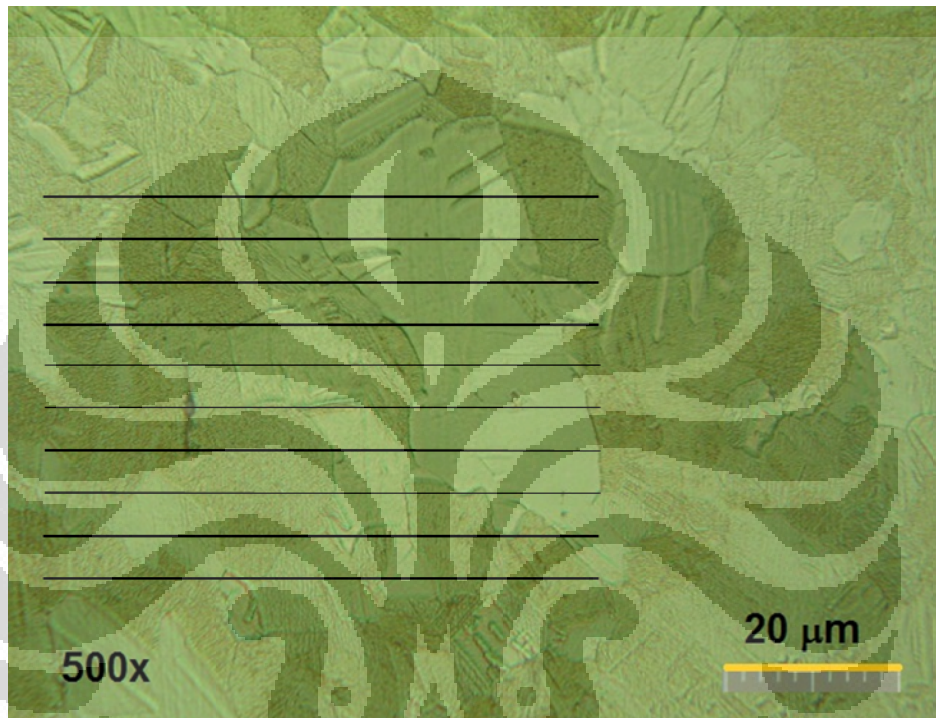


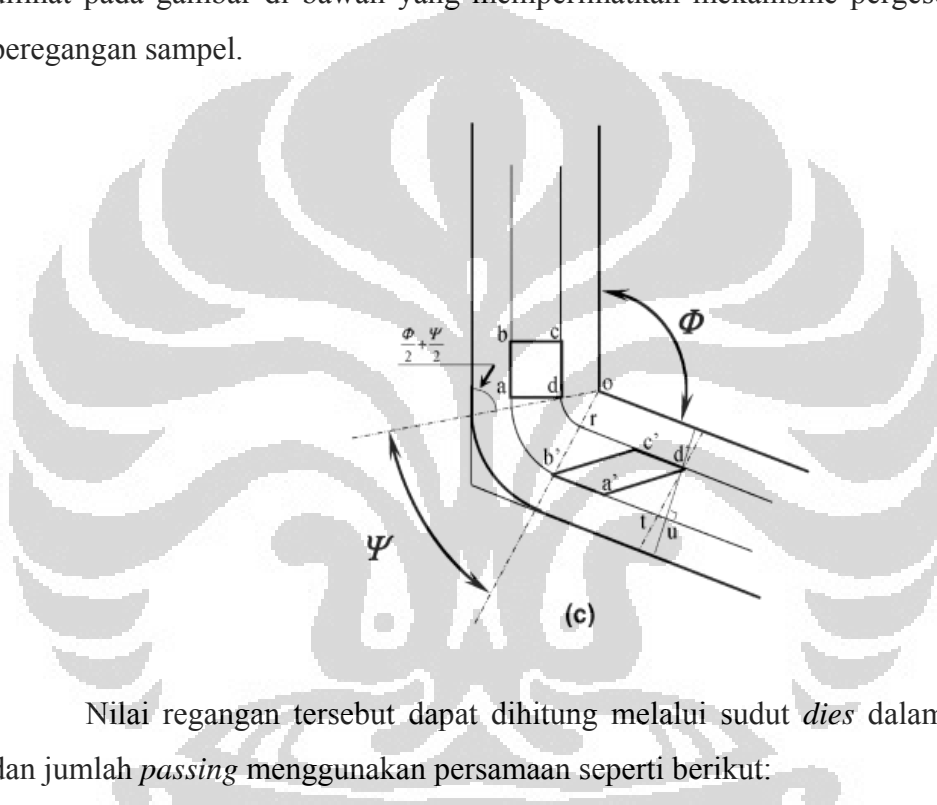
Table perhitungan butir

Garis ke-	Sampel Non Anil (<i>Passing</i>)			Sampel Anil (<i>Passing</i>)		
	1	2	3	1	2	3
1	8	9	8	7	8	7
2	7	10	10	7	7	9
3	8	9	6	7	8	6
4	8	11	7	10	7	6
5	7	7	8	9	6	8
6	7	8	10	8	9	9
7	5	9	8	6	7	6
8	7	8	13	6	5	10
9	10	9	11	8	6	5
10	10	9	11	8	6	8
Rata-rata	7.7	8.9	9.2	7.6	6.9	7.4
D Butir	8.181818	7.078652	6.847826	8.289474	9.130435	8.513514

LAMPIRAN 2

CONTOH PERHITUNGAN REGANGAN

Pada setiap kali *passing* dalam percobaan ECAP terdapat nilai regangan yang berbeda-beda. Nilai regangan didapat melalui penjumlahan regangan sumbu x dan y dari sampel, dimana sudut peregangannya adalah $\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right)$, seperti juga dapat dilihat pada gambar di bawah yang memperlihatkan mekanisme pergeseran dan peregangannya sampel.



Nilai regangan tersebut dapat dihitung melalui sudut *dies* dalam radian, dan jumlah *passing* menggunakan persamaan seperti berikut:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right]$$

Nilai regangan sampel hasil *passing* dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Jumlah <i>Passing</i>	Regangan
1	0.63
2	1.27
3	1.90

LAMPIRAN 3

CONTOH PERHITUNGAN TEGANGAN TARIK

Perhitungan tegangan tarik dilakukan dengan mengkonversinya dari kekerasan Brinnell dari sampel ECAP 1, 2 dan 3 kali *passing* menggunakan persamaan berikut:

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

Hasil perhitungan tegangan tarik dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Sampel Hasil ECAP (<i>Passing</i>)	HB	TS (MPa)
0	76,2	263
1	160	552
2	189	652.05
3	203	700.35