



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PROSES ANIL REKRISTALISASI
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIS
PELAT KUNINGAN 70/30 HASIL CANAI DINGIN**

SKRIPSI

ARIDHO OBSTRIAN

0606074602

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PROSES ANIL REKRISTALISASI
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIS
PELAT KUNINGAN 70/30 HASIL CANAI DINGIN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
di Fakultas Teknik Universitas Indonesia

ARIDHO OBSTRAN

0606074602

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : ARIDHO OBSTRAN

NPM : 0606074602

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : ARIDHO OBSTRIAN

NPM : 0606074602

Program Studi : TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

Judul Skripsi : PENGARUH PROSES ANIL REKRISTALISASI TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIS PELAT
KUNINGAN 70/30 HASIL CANAI DINGIN

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

Penguji : Dr. Ir. Winarto, M.Sc (.....)

Penguji : Prof. Dr. Ir. Eddy S Siradj, M.Eng (.....)

Ditetapkan di :

Tanggal :

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis sampaikan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan skripsi ini dapat diselesaikan sesuai dengan waktu yang telah direncanakan. Adapun tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk memenuhi persyaratan dalam mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak akan dapat diselesaikan dengan baik tanpa adanya bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Dedi Priadi DEA, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, dorongan, serta motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.
3. Bapak Mirza Wibisono dari BPPT yang telah menawarkan topik serta bantuan pengujian selama penelitian.
4. Reski Taufik selaku rekan kerja dalam penulisan skripsi ini. Terima kasih atas kerjasama dan bantuannya selama penelitian.
5. Seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI, khususnya Pak Nuddin, Pak Zaenal, dan Bang Mamat. Terimakasih atas bantuannya selama penelitian.
6. Papa, Mama, Kakek, dan Nenekku yang sangat kucintai dan kubanggakan, terima kasih atas doa, cinta, kasih sayang, motivasi, serta dukungan materiil dan moril yang telah diberikan untukku.
7. Kakak-kakakku; Mas Dhanu, Mas Ferdhy, Mba Dheny, dan Mba iQy yang telah memberikan doa dan dukungannya.
8. Penghuni Pondok Ananda; Hafizh, Alif, Lindi, Barnas dan penghuni Pondok Marisa; Arin, Mumun, Desby, dan Imel. Terima kasih sahabat, kehidupan di kosan tidak akan indah tanpa ada kalian disampingku.

9. Seluruh mahasiswa Teknik Metalurgi dan Material FTUI Angkatan 2006. Terima kasih untuk persahabatan yang indah ini, kalian akan selalu dihatiku.
10. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis telah berusaha sebaik-baiknya dalam penulisan skripsi ini, namun tidak tertutup kemungkinan adanya kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan segala kritik dan saran yang berkenan untuk perbaikan dan sempurnanya laporan ini. Besar harapan penulis bahwa dengan adanya skripsi ini dapat memberi manfaat bagi semua pihak yang memerlukannya sebagai sumber bahan kajian dan referensi.

Depok, Desember 2009

Penulis

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

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

Nama : ARIDHO OBSTRAN
NPM : 0606074602
Program Studi : TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
Departemen : METALURGI DAN MATERIAL
Fakultas : TEKNIK
Jenis Karya : Skripsi

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

**PENGARUH PROSES ANIL REKRISTALISASI TERHADAP STRUKTUR
MIKRO DAN SIFAT MEKANIS PELAT KUNINGAN 70/30 HASIL CANAI
DINGIN**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di :

Pada tanggal :

Yang menyatakan

(ARIDHO OBSTRAN)

ABSTRAK

Nama : Aridho Obstrian
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Proses Anil Rekrystalisasi terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Pelat Kuningan 70/30 Hasil Canai Dingin

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh dari proses anil rekrystalisasi dengan variasi temperatur dan waktu tahan terhadap struktur mikro, besar butir, dan nilai kekerasan pelat kuningan 70/30 hasil canai dingin sehingga dapat ditentukan parameter proses anil yang optimum dengan karakteristik pelat sesuai dengan spesifikasi standar industri. Parameter proses anil yang optimum tersebut digunakan untuk menguji sifat mampu bentuk pelat melalui pengujian tarik, koefisien pengerasan regang, anisotropi normal, anisotropi planar, dan pengujian kekasaran permukaan. Berdasarkan penelitian ini didapatkan parameter proses anil yang optimum adalah temperatur 600°C dengan waktu tahan 3 menit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses anil rekrystalisasi akan mengurangi ukuran butir pelat kuningan 70/30 hasil proses canai dingin dari 63,18 μm menjadi 52,73 μm dan menurunkan nilai kekerasan dari 147 BHN menjadi 76 BHN. Pelat kuningan 70/30 hasil proses anil optimum memiliki sifat mampu bentuk yang baik dengan nilai anisotropi normal 1,58 dan nilai anisotropi planar 0,24. Proses anil rekrystalisasi juga menurunkan kekasaran permukaan pelat dari 0,50 μm menjadi 0,49 μm sehingga pelat kuningan 70/30 memiliki sifat mampu bentuk yang baik.

Kata Kunci : Anil rekrystalisasi, anisotropi, kekasaran permukaan, mampu bentuk

ABSTRACT

Name : Aridho Obstrian
Study Program : Metallurgy and Material Engineering
Title : The Effect of Annealed Recrystallization on
Microstructure and Mechanical Properties of Cold Rolled
70/30 Brass Plate

The purposes of this research is to study the effect of annealed recrystallization with various temperature and holding time on microstructure, grain size, and hardness of cold rolled 70/30 brass plate to determine the optimum process of annealing parameter appropriate with industrial standard specification. Those optimum parameter processes used to know the formability of plate through tensile test, strain hardening coefficient, normal anisotropy, planar anisotropy, and surface roughness test. Based on this research, the optimum parameter of annealing is 600°C for temperature and 3 minute for holding time. The testing result show that the annealed recrystallization process will reduce the grain size of cold rolled 70/30 brass plate from 63.18 μm to 52.73 μm and decreasing the hardness from 147 BHN to 76 BHN. After annealing process, 70/30 brass plate has a good formability with normal anisotropy coefficient 1.58 and planar anisotropy coefficient 0.24. Annealed recrystallization process also decreases the surface roughness of plate from 0.50 μm to 0.49 μm so the plate has a good formability.

Keywords : Annealed recrystallization, anisotropy, surface roughness, formability

DAFTAR ISI

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 GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.4.1 Material.....	3
1.4.2 Parameter Penelitian.....	3
1.4.3 Tempat Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kuningan.....	5
2.1.1 Kuningan 70/30.....	6
2.2 Proses Canai.....	7
2.2.1 Canai Dingin.....	8
2.2.2 Canai Panas.....	9
2.3 Proses Termomekanikal.....	10
2.4 Anil Rekristalisasi.....	11
2.5 Mekanisme Penguatan dengan Penghalusan Butir.....	18
2.6 Pengujian Tarik Uniaksial.....	20

2.6.1	Kurva Tegangan dan Regangan Rekayasa.....	20
2.6.2	Kurva Tegangan dan Regangan Sesungguhnya.....	21
2.6.3	Koefisien Pengerasan Regang.....	23
2.7	Anisotropi.....	26
2.7.1	Anisotropi Normal.....	26
2.7.2	Anisotropi Planar.....	29
2.8	Difraksi Sinar X.....	29
2.9	Kekasaran Permukaan.....	32
2.10	Mode Perpatahan Material.....	34
2.10.1	Perpatahan Ulet.....	35
2.10.2	Perpatahan Getas.....	36
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		37
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	37
3.2	Alat dan Bahan.....	38
3.2.1	Alat.....	38
3.2.2	Bahan.....	38
3.3	Prosedur Penelitian.....	39
3.3.1	Proses Pembuatan Sampel.....	39
3.3.2	Proses Pemanasan Anil.....	40
3.4	Prosedur Pengujian.....	43
3.4.1	Pengujian Komposisi Kimia.....	43
3.4.2	Pengujian Struktur Mikro.....	43
3.4.3	Pengujian Besar Butir.....	46
3.4.4	Pengujian Kekerasan.....	47
3.4.5	Pengujian Tarik.....	48
3.4.6	Pengujian Difraksi Sinar X.....	50
3.4.7	Pengujian Kekasaran Permukaan.....	51
3.4.8	Pengujian Fraktografi Hasil Uji Tarik.....	52
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		53
4.1	Pengujian Komposisi Kimia.....	53
4.2	Pengujian Struktur Mikro.....	55
4.3	Pengujian Besar Butir.....	70

4.3.1	Pengaruh Temperatur Anil terhadap Besar Butir.....	70
4.3.2	Pengaruh Waktu Tahan Anil terhadap Besar Butir.....	71
4.4	Pengujian Kekerasan.....	72
4.4.1	Pengaruh Temperatur Anil terhadap Kekerasan.....	73
4.4.2	Pengaruh Waktu Tahan Anil terhadap Kekerasan.....	74
4.4.3	Pengaruh Proses Anil terhadap Kekerasan.....	75
4.5	Pengujian Tarik.....	77
4.5.1	Kekuatan Tarik Maksimum (UTS).....	77
4.5.2	Koefisien Pengerasan Regang (n).....	78
4.5.3	Koefisien Anisotropi Normal (r).....	78
4.5.4	Koefisien Anisotropi Planar (Δr).....	79
4.6	Pengujian Difraksi Sinar X.....	80
4.7	Pengujian Kekasaran Permukaan.....	82
4.8	Pengujian Fraktografi Hasil Uji Tarik.....	83
BAB 5 KESIMPULAN.....		87
5.1	Kesimpulan.....	87
DAFTAR PUSTAKA.....		88
LAMPIRAN.....		90

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Diagram Fasa Cu-Zn.....	7
Gambar 2.2.	Ilustrasi Perubahan Ketebalan dan Lebar Logam dalam Proses Canai.....	8
Gambar 2.3.	Ilustrasi Tegangan Sisa Akibat Proses Canai.....	9
Gambar 2.4.	Ilustrasi Perubahan Ukuran Butir dalam Proses Canai Panas.....	10
Gambar 2.5.	Temperatur Proses Rekrystalisasi pada Logam Kuningan.....	11
Gambar 2.6.	Fotomikro Tahapan Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir Pada Logam Kuningan.....	14
Gambar 2.7.	Pengaruh Temperatur Anil Terhadap Kekuatan, Keuletan, Dan Ukuran Butir pada Paduan Kuningan.....	15
Gambar 2.8.	Ilustrasi Rekrystalisasi Dinamis dan Rekrystalisasi Statis.....	16
Gambar 2.9.	Ilustrasi Pertumbuhan Butir melalui Difusi Atom.....	17
Gambar 2.10.	Hubungan Antara Diameter Butir dengan Waktu untuk Pertumbuhan Butir Logam Kuningan pada Beberapa Temperatur.....	18
Gambar 2.11.	Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi.....	19
Gambar 2.12.	Hubungan Antara Ukuran Butir dengan Kekuatan Luluh Pada Kuningan 70/30.....	20
Gambar 2.13.	Kurva Tegangan-Regangan untuk Logam Kuningan.....	21
Gambar 2.14.	Perbandingan Kurva Tegangan-Regangan Rekayasa dengan Kurva Tegangan-Regangan Sesungguhnya.....	22
Gambar 2.15.	Kurva Tegangan-Regangan Sesungguhnya pada Beberapa Material.....	22
Gambar 2.16.	Ilustrasi Pengerasan Regang pada Kurva Tegangan-Regangan Sesungguhnya.....	24
Gambar 2.17.	Ilustrasi Nilai n pada Kurva Logaritmik Tegangan-Regangan.....	24
Gambar 2.18.	Contoh Perhitungan Nilai n pada Sampel Aluminium 1100-O....	25
Gambar 2.19.	Ilustrasi Sifat Material Berdasarkan Nilai Pengerasan Regang....	25
Gambar 2.20.	Ilustrasi Lebar dan Tebal pada Spesimen Uji Tarik.....	26
Gambar 2.21.	Ilustrasi Arah Lembaran Terhadap Arah Canai.....	27
Gambar 2.22.	Grafik Hubungan Nilai r dengan Nilai LDR Beberapa Material..	28
Gambar 2.23.	Skematis Difraksi Sinar X.....	30
Gambar 2.24.	Skematis <i>Diffractometer</i>	31
Gambar 2.25.	Pola Intensitas Difraksi.....	31
Gambar 2.26.	Ilustrasi Kekasaran Permukaan.....	32
Gambar 2.27.	Hubungan Antara Regangan dengan Kekasaran Permukaan.....	33
Gambar 2.28.	Contoh Hasil Profil Kekasaran Permukaan.....	33
Gambar 2.29.	Mode Perpatahan Beberapa Material.....	34
Gambar 2.30.	Skematis Tahapan Perpatahan Ulet.....	35
Gambar 2.31.	Hasil SEM untuk Perpatahan Ulet.....	35
Gambar 2.32.	Hasil SEM untuk Perpatahan Getas.....	36
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian.....	37
Gambar 3.2.	Diagram Alir Pembuatan Sampel.....	39
Gambar 3.3.	Dimensi Sampel.....	40

Gambar 3.4.	Dapur Nabertherm.....	40
Gambar 3.5.	Ilustrasi Siklus Pemanasan Anil.....	41
Gambar 3.6.	Sampel Uji Komposisi Kimia.....	43
Gambar 3.7.	Arah Pemotongan Sampel.....	43
Gambar 3.8.	Sampel yang Telah di-mounting.....	44
Gambar 3.9.	Mesin Amplas.....	44
Gambar 3.10.	Mesin Poles.....	45
Gambar 3.11.	Mikroskop Optik.....	46
Gambar 3.12.	Metode Planimetri.....	47
Gambar 3.13.	Ilustrasi Jejak yang dihasilkan Selama Penjejakan.....	48
Gambar 3.14.	Mesin Uji KekerasanVickers.....	48
Gambar 3.15.	Mesin Uji Tarik.....	49
Gambar 3.16.	Contoh Bentuk dan Dimensi Sampel Uji Tarik.....	49
Gambar 3.17.	Bentuk Sampel Uji Tarik.....	50
Gambar 3.18.	Mesin Uji Kekasaran Permukaan.....	51
Gambar 3.19.	Sampel Permukaan Patahan Hasil Uji Tarik.....	52
Gambar 4.1.	Struktur Mikro Setelah Canai Dingin Posisi Permukaan.....	56
Gambar 4.2.	Struktur Mikro Setelah Canai Dingin Posisi Memanjang.....	56
Gambar 4.3.	Struktur Mikro Setelah Canai Dingin Posisi Melintang.....	56
Gambar 4.4.	Struktur Mikro Setelah Anil 500°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Permukaan.....	58
Gambar 4.5.	Struktur Mikro Setelah Anil 500°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Memanjang.....	58
Gambar 4.6.	Struktur Mikro Setelah Anil 500°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Melintang.....	58
Gambar 4.7.	Struktur Mikro Setelah Anil 600°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Permukaan.....	60
Gambar 4.8.	Struktur Mikro Setelah Anil 600°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Memanjang.....	60
Gambar 4.9.	Struktur Mikro Setelah Anil 600°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Melintang.....	60
Gambar 4.10.	Struktur Mikro Setelah Anil 700°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Permukaan.....	62
Gambar 4.11.	Struktur Mikro Setelah Anil 700°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Memanjang.....	62
Gambar 4.12.	Struktur Mikro Setelah Anil 700°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Melintang.....	62
Gambar 4.13.	Struktur Mikro Setelah Anil 2 Menit Temperatur 600°C Posisi Permukaan.....	64
Gambar 4.14.	Struktur Mikro Setelah Anil 2 Menit Temperatur 600°C Posisi Memanjang.....	64
Gambar 4.15.	Struktur Mikro Setelah Anil 2 Menit Temperatur 600°C Posisi Melintang.....	64
Gambar 4.16.	Struktur Mikro Setelah Anil 3 Menit Temperatur 600°C Posisi Permukaan.....	66
Gambar 4.17.	Struktur Mikro Setelah Anil 3 Menit Temperatur 600°C Posisi Memanjang.....	66
Gambar 4.18.	Struktur Mikro Setelah Anil 3 Menit Temperatur 600°C	

	Posisi Melintang.....	66
Gambar 4.19.	Struktur Mikro Setelah Anil 4 Menit Temperatur 600°C Posisi Permukaan.....	68
Gambar 4.20.	Struktur Mikro Setelah Anil 4 Menit Temperatur 600°C Posisi Memanjang.....	68
Gambar 4.21.	Struktur Mikro Setelah Anil 4 Menit Temperatur 600°C Posisi Melintang.....	68
Gambar 4.22.	Grafik Hubungan antara Temperatur Anil dengan Besar Butir...	70
Gambar 4.23.	Grafik Hubungan antara Waktu Tahan Anil dengan Besar Butir	71
Gambar 4.24.	Grafik Hubungan antara Temperatur Anil dengan Kekerasan....	73
Gambar 4.25.	Grafik Hubungan antara Waktu Tahan Anil dengan Kekerasan..	74
Gambar 4.26.	Grafik Hubungan Besar Butir dengan Kekerasan.....	76
Gambar 4.27.	Intensitas Difraksi Sinar X pada Sampel Kondisi Canai Dingin..	80
Gambar 4.28.	Intensitas Difraksi Sinar X pada Sampel Kondisi Anil 600°C....	81
Gambar 4.29.	Tampilan 2D dan Profil Kekasaran Permukaan Sampel Kondisi Canai Dingin.....	82
Gambar 4.30.	Tampilan 2D dan Profil Kekasaran Permukaan Sampel Kondisi Setelah Anil.....	82
Gambar 4.31.	Hasil SEM Permukaan Patahan 0°.....	83
Gambar 4.32.	Hasil SEM Permukaan Patahan 45°.....	84
Gambar 4.33.	Hasil SEM Permukaan Patahan 90°.....	84

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Nilai n dan k pada Beberapa Material.....	23
Tabel 2.2.	Nilai Anisotropi Beberapa Jenis Material.....	27
Tabel 4.1.	Hasil Pengujian Komposisi Kimia.....	53
Tabel 4.2.	Hasil Pengujian Besar Butir.....	70
Tabel 4.3.	Hasil Pengujian Kekerasan.....	72
Tabel 4.4.	Hasil Pengujian Tarik.....	77
Tabel 4.5.	Bidang Orientasi Kristal pada Sampel Kondisi Canai Dingin.....	80
Tabel 4.6.	Bidang Orientasi Kristal pada Sampel Kondisi Anil 600°C.....	81



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Hasil Pengujian Komposisi Kimia Pelat Kuningan 70/30.....	91
Lampiran 2.	Perhitungan Besar Butir.....	92
Lampiran 3.	Tabel Diameter Butir.....	93
Lampiran 4.	Perhitungan Nilai Kekerasan.....	94
Lampiran 5.	Tabel Konversi Nilai Kekerasan.....	95
Lampiran 6.	Perhitungan Nilai UTS.....	97
Lampiran 7.	Perhitungan Nilai n	98
Lampiran 8.	Perhitungan Nilai r dan Δr	100
Lampiran 9.	Hasil Uji Difraksi Sinar X Sampel Canai Dingin.....	101
Lampiran 10.	Hasil Uji Difraksi Sinar X Sampel Setelah Anil.....	103
Lampiran 11.	Hasil Uji Kekasaran Permukaan Sampel Canai Dingin.....	105
Lampiran 12.	Hasil Uji Kekasaran Permukaan Sampel Setelah Anil.....	106
Lampiran 13.	Hasil Uji SEM Perpatahan Uji Tarik Arah 0.....	107
Lampiran 14.	Hasil Uji SEM Perpatahan Uji Tarik Arah 45.....	108
Lampiran 15.	Hasil Uji SEM Perpatahan Uji Tarik Arah 90.....	109
Lampiran 16.	Tabel Standar Industri.....	110

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses canai (*rolling*) merupakan salah satu proses perubahan bentuk material (*forming*) yang sudah umum dikenal dan digunakan pada industri logam. Dengan proses canai akan didapat bentuk-bentuk material dengan geometri dan ukuran tertentu yang diinginkan namun kurang memperhatikan sifat mekanis dari material itu sendiri. Sehingga dalam proses perubahan bentuk selanjutnya sering terjadi kegagalan karena sifat material yang sudah berubah karena proses canai. Oleh sebab itu dikembangkan sebuah metode dimana terjadi proses deformasi yang disertai dengan proses perlakuan panas. Proses tersebut dinamakan proses termomekanikal (*Thermo-Mechanical Process / TMP*).

Proses termomekanikal adalah proses perubahan bentuk material yang melibatkan proses deformasi dengan disertai proses kontrol perlakuan panas untuk menghasilkan produk dengan geometri dan sifat-sifat mekanis yang baik. Proses termomekanikal ini merupakan kombinasi antara proses pengerolan panas (*hot roll*), pengerolan dingin (*cold roll*), dan perlakuan panas pelunakan (*annealing*). Melalui proses termomekanikal ini dapat dihasilkan produk dengan geometri dan sifat mekanis yang diinginkan. Hal tersebut dikarenakan besar butir, mikrostruktur, tekstur rekristalisasi, dan kekasaran permukaan dari material dapat direkayasa dengan baik.

Material logam CuZn atau yang lebih dikenal dengan nama kuningan (*brass*) merupakan salah satu logam yang menggunakan proses termomekanikal dalam proses perubahan bentuknya. Melalui proses termomekanikal, ukuran butir, mikrostruktur, tekstur rekristalisasi serta kekasaran permukaan kuningan dapat dikendalikan dengan baik sehingga sesuai untuk aplikasi yang diinginkan. Hal tersebut dikarenakan ukuran butir, mikrostruktur, tekstur rekristalisasi, dan kekasaran permukaan sangat berpengaruh terhadap sifat mekanis dan sifat fisik logam kuningan. Dengan adanya proses termomekanikal maka penggunaan logam kuningan semakin meluas karena dapat dihasilkan produk kuningan dengan sifatnya yang baik seperti konduktivitas panas dan listrik yang tinggi juga

ketahanan terhadap korosi yang sangat baik serta dihasilkan kuningan dengan sifat mampu bentuk (*formability*) yang baik dan sifat mampu tarik (*drawability*) yang baik.

Material kuningan sangat banyak sekali jenisnya tergantung dari kadar tembaga (Cu) dan kadar seng (Zn) yang dikandungnya. Namun secara umum, jenis kuningan yang sering digunakan adalah kuningan jenis *cartridge brass* yaitu kuningan dengan kadar Cu 70% dan kadar Zn 30%. Aplikasi dari *cartridge brass* dengan sifat mampu bentuk dan sifat mampu tarik yang baik terutama digunakan sebagai bahan baku industri hankam, industri transportasi, serta industri migas.

Untuk mendapatkan material *cartridge brass* dengan sifat mampu bentuk serta mampu tarik yang baik diperlukan proses termomekanikal yang baik. Faktor-faktor penting dan sangat berpengaruh dalam proses termomekanikal antara lain derajat deformasi pengerolan panas maupun pengerolan dingin, temperatur serta waktu tahan perlakuan panas pelunakan (anil). Tujuan utama dilakukan perlakuan panas pelunakan (anil) adalah untuk menghasilkan besar butir dan mikrostruktur yang sesuai dengan sifat-sifat serta aplikasi *cartridge brass* yang diinginkan.

Proses perlakuan panas pelunakan (anil) setelah proses canai sangat penting dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanis dari material *cartridge brass*. Kelemahan pada industri pelat *cartridge brass* adalah penguasaan teknologi perlakuan panas pelunakan (anil) setelah pelat mengalami proses canai seperti temperatur dan waktu tahan anil yang digunakan untuk menghasilkan ukuran butir serta mikrostruktur yang sesuai sehingga dihasilkan produk dengan sifat mekanis yang sangat baik.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah utama yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah pengaruh dari proses perlakuan panas pelunakan (anil) yang meliputi temperatur dan waktu tahan proses terhadap pertumbuhan butir, sifat mekanis, tekstur rekristalisasi, dan kekasaran permukaan. Melalui pengujian mikrostruktur serta pengujian sifat mekanis maka akan didapat hubungan antara pengaruh variasi temperatur proses perlakuan panas pelunakan (anil) dan pengaruh variasi waktu tahan anil terhadap karakteristik besar butir, struktur mikro, kekerasan (sifat mekanis), tekstur

rekristalisasi, kekasaran permukaan, mampu bentuk (*formability*), serta mampu tarik (*drawability*).

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan temperatur dan waktu tahan optimum proses anil rekristalisasi sehingga dihasilkan pelat kuningan 70/30 yang sesuai standar industri.
2. Untuk mengamati dan mengetahui pengaruh proses anil rekristalisasi terhadap perubahan struktur mikro, ukuran butir dan sifat mekanis yang meliputi kekerasan serta kekuatan tarik pelat kuningan CuZn 70/30.
3. Untuk mengetahui sifat mampu bentuk dari pelat kuningan CuZn 70/30 setelah proses anil rekristalisasi melalui nilai rasio pengerasan regang (n), nilai anisotropi normal (r) dan nilai anisotropi planar (Δr).
4. Untuk mengamati dan mengetahui pengaruh proses anil rekristalisasi terhadap perubahan orientasi kristal atau perubahan tekstur pelat kuningan CuZn 70/30.
5. Untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan pelat kuningan CuZn 70/30 setelah mengalami proses anil rekristalisasi.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

1.4.1 Material

Lembaran kuningan CuZn 70/30 hasil proses canai dingin (*cold rolled*).

1.4.2 Parameter Penelitian

- a. Temperatur proses pemanasan anil dengan variasi temperatur 500°C, 600°C, dan 700°C dengan waktu tahan selama 3 menit.
- b. Waktu tahan proses pemanasan anil dengan variasi waktu tahan 2 menit, 3 menit, dan 4 menit dengan temperatur proses pemanasan anil 600°C.

1.4.3 Tempat Penelitian

Proses penelitian yang meliputi proses pengecoran, proses pemanasan anil dan pengujian dilakukan di berbagai tempat yaitu :

1. Proses pengecoran dilakukan di PT. JSST Surabaya.
2. Pengujian komposisi dilakukan di Politeknik Manufaktur Negeri Bandung.
3. Proses pemanasan anil dan pengujian dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI, Kampus Universitas Indonesia, Depok.
4. Pengujian difraksi sinar X (XRD) dilakukan di Laboratorium Pusat Bahan Bakar Industri Nuklir (PBIN) BATAN, Puspitek Serpong.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini dibagi dalam beberapa bab yang saling berhubungan. Adapun urutan dalam penulisan skripsi ini antara lain :

Bab 1 : Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

Pada bab ini diuraikan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian skripsi ini.

Bab 3 : Metodologi Penelitian

Bab ini berisi mengenai langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, serta daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

Bab 4 : Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut dibandingkan dengan hasil studi literatur.

Bab 5 : Kesimpulan

Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kuningan

Kuningan (*brass*) adalah paduan antara tembaga (Cu) dan Seng (Zn) dengan kadar Zn mencapai 10% hingga 45%. Kuningan merupakan logam yang biasanya dipakai untuk komponen teknik dalam dunia industri. Hal tersebut dikarenakan sifat-sifatnya seperti konduktivitas termal dan listrik yang sangat baik, ketahanan korosi yang tinggi, mudah dalam proses pengubahan bentuk selanjutnya, serta kekuatan dan ketahanan terhadap fatik yang tinggi.^[1]

Berdasarkan kadar Cu dan Zn yang dikandungnya, kuningan (*brass*) dibagi menjadi beberapa jenis, antara lain :

1. **Red Brass (C23000)**, kuningan dengan kadar 85% Cu dan 15% Zn.
2. **Low Brass (C24000)**, kuningan dengan kadar 80% Cu dan 20% Zn.
3. **Cartridge Brass (C26000)**, kuningan dengan kadar 70% Cu dan 30% Zn.
4. **Yellow Brass (C27000)**, kuningan dengan kadar 65% Cu dan 35% Zn.
5. **Muntz Metal (C28000)**, kuningan dengan kadar 60% Cu dan 40% Zn.

Selain unsur Cu dan unsur Zn, di dalam kuningan juga terdapat unsur-unsur minor atau *impurities* lainnya seperti timbal (Pb), kromium (Cr), besi (Fe), nikel (Ni), dan sebagainya. Unsur-unsur minor tersebut memiliki pengaruh terhadap sifat dan karakteristik kuningan seperti di bawah ini :

1. Timbal (Pb), kadar timbal harus dibawah 0,01% untuk proses canai panas (*hot rolling*), sedangkan untuk proses ekstrusi (*extrusion*) maupun proses pengerjaan dingin (*cold working*) kadar timbal harus sampai 4% untuk meningkatkan *machinability*.
2. Aluminium (Al) akan memberikan pengaruh pada proses anil (*annealing*) dan ukuran butir. Penambahan Aluminium akan memberikan efek nyata pada proses pengerjaan panas (*hot working*) dan proses pengerjaan dingin (*cold working*) ketika kadar Aluminium di atas 2%.
3. Arsenik (As) tidak memberikan pengaruh pada pengerjaan panas maupun pengerjaan dingin tetapi akan memperhalus ukuran butir.

4. Kromium (Cr) memberikan efek pada temperatur anil dan ukuran butir. Kondisi ini akan bertambah besar dengan keberadaan unsur besi (Fe).
5. Besi (Fe) memberikan pengaruh pada proses anil dan meningkatkan sifat magnetik.
6. Nikel (Ni) akan mengendalikan pertumbuhan butir.
7. Fosfor (P) akan mengendalikan pertumbuhan butir, meningkatkan kekuatan (*strength*), dan menurunkan keuletan (*ductility*).

2.1.1 Kuningan 70/30

Kuningan 70/30 atau lebih umum dikenal sebagai *Cartridge Brass* adalah paduan CuZn dengan komposisi 68,5% sampai 71,5% Cu. Kuningan 70/30 juga memiliki nama lain seperti *spinning brass*, *spring brass*, dan juga *extra-quality brass*. Sifat-sifat mekanis dan sifat-sifat fisik dari kuningan 70/30 tipe C26000 antara lain^[1] :

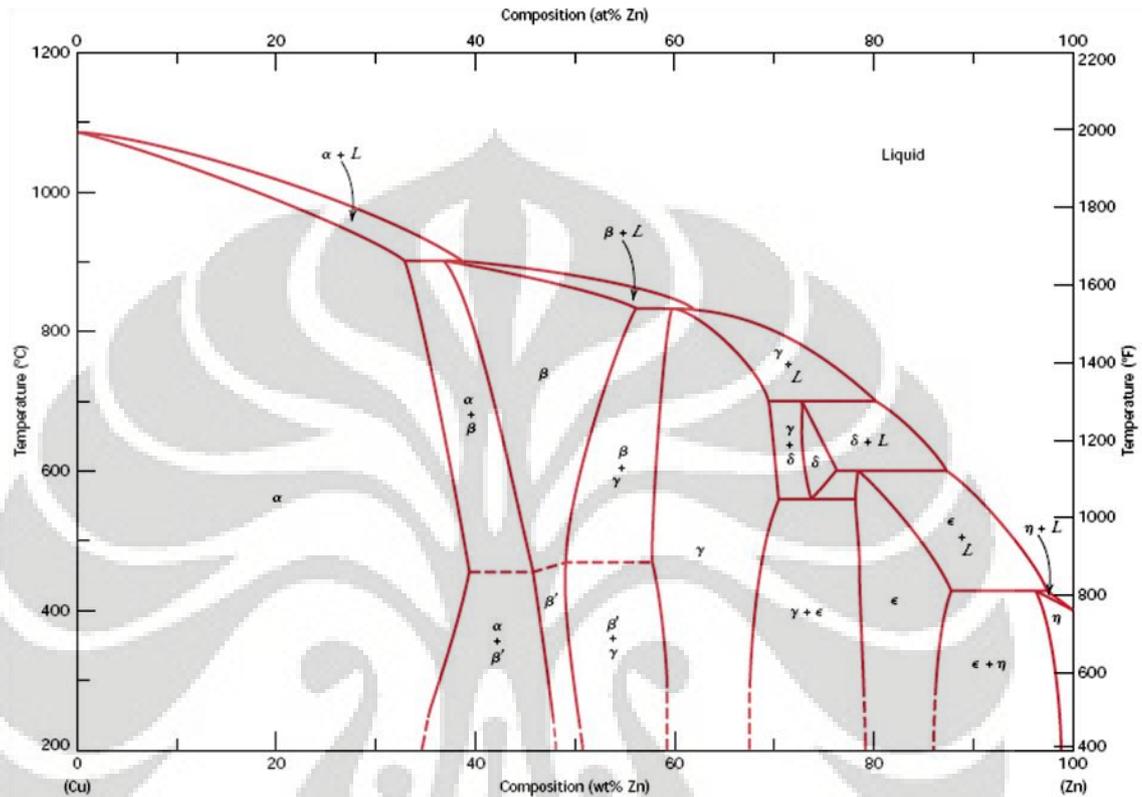
Kekuatan Tarik	: 300-365 MPa (<i>annealed condition</i>)
Kekuatan Luluh	: 75-150 MPa (<i>annealed condition</i>)
Elongasi	: 3-68%
Kekerasan	: 54-93 HRB
Modulus Elastisitas	: 110 GPa
Kekuatan Geser	: 215-415 MPa
Massa Jenis	: 8,53 g/cm ³
Konduktivitas Termal	: 120 W/m-K

Kuningan memiliki 3 fasa penting yang dapat dilihat pada Diagram Fasa Cu-Zn pada Gambar 2.1. di bawah ini.

1. Fasa alpha (α)
Fasa ini memiliki struktur *Face Centered Cubic (FCC)* dengan kelarutan seng maksimum 37-39% pada temperatur 453°C.
2. Fasa beta (β)
Fasa ini memiliki struktur *Body Centered Cubic (BCC)*. Keberadaan fasa ini pada kuningan akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan.

3. Fasa gamma (γ)

Fasa ini memiliki struktur yang sangat kompleks, biasanya disebut *complex double cubic*. Fasa ini bersifat rapuh dan getas (*brittle*)^[2].



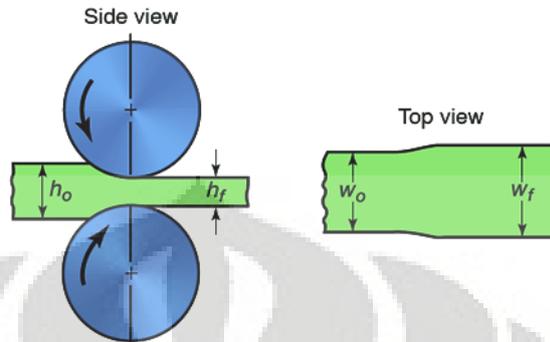
Gambar 2.1. Diagram Fasa Cu-Zn^[3]

2.2 Proses Canai

Proses canai atau proses pengerolan (*rolling*) merupakan proses reduksi (pengurangan) ketebalan dan perubahan luas area penampang dari sebuah logam melalui serangkaian mesin rol dengan menggunakan gaya tekan (*compressive load*). Terdapat dua jenis proses canai berdasarkan temperatur yang digunakan di dalam proses canai yaitu :

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

Melalui proses canai maka akan dihasilkan perubahan ketebalan dan perubahan lebar dari logam yang di canai. Hal tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Ilustrasi Perubahan Ketebalan dan Lebar Logam dalam Proses Canai^[4]

Jumlah reduksi atau persentase reduksi pada material dalam proses canai dapat dihitung dengan rumus^[4] :

$$\% \text{reduksi} = \frac{h_0 - h_f}{h_0} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana h_0 = ketebalan material awal

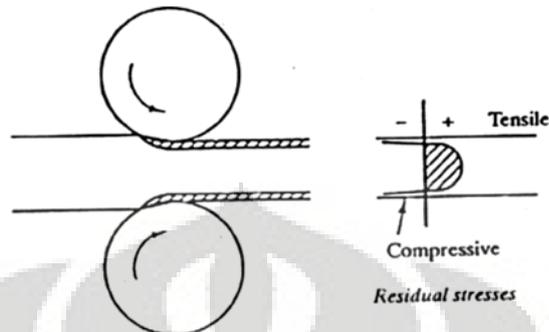
h_f = ketebalan material akhir

2.2.1 Canai Dingin

Proses canai dingin (*cold rolling*) merupakan proses canai dengan temperatur ruang atau temperatur di bawah temperatur rekristalisasi dari material. Dalam proses canai dingin akan dihasilkan tegangan sisa (*residual stress*) akibat adanya deformasi tidak homogen. Tegangan sisa tersebut dapat dihilangkan dengan proses rekristalisasi^[5].

Deformasi tidak homogen terjadi karena adanya perbedaan friksi antara benda kerja dengan alat bentuk (*forming tools*). Dalam proses canai dingin dengan tingkat reduksi area yang rendah akan terjadi proses pemusatan deformasi pada permukaan material dimana friksi antara canai dengan benda kerja terjadi. Lapisan permukaan material benda kerja akan berusaha mengembang sedangkan lapisan dalam material akan mencegah pengembangan lapisan di atasnya. Dengan demikian maka permukaan benda kerja akan mengalami tegangan tekan (*compressive stress*) sedangkan lapisan dalam akan mengalami tegangan tarik

(*tension stress*). Tegangan-tegangan tersebut yang dikenal dengan nama tegangan sisa. Tegangan sisa sangat berpengaruh pada sifat-sifat material dan kinerja dari material. Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Ilustrasi Tegangan Sisa Akibat Proses Canai^[5]

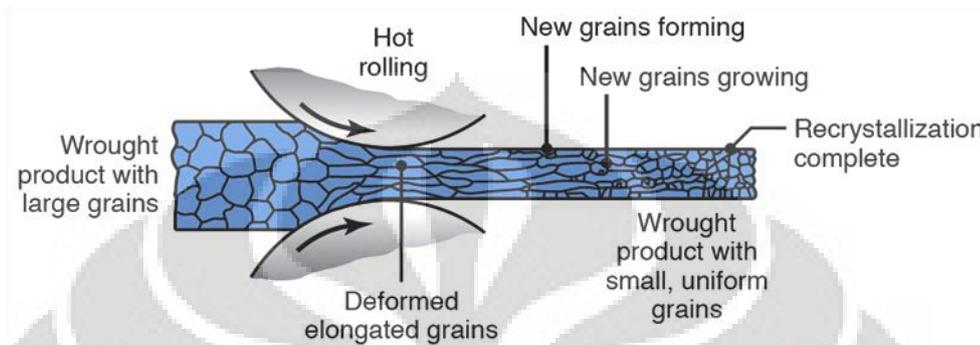
Untuk meningkatkan sifat dari material maka diperlukan pengurangan atau penghilangan tegangan sisa yang dihasilkan oleh pengerjaan dingin (*cold working*). Hal tersebut dapat dicapai dengan melakukan perlakuan mekanis atau perlakuan panas (*heat treatment*). Perlakuan mekanis dilakukan dengan memberikan tegangan yang berlawanan atau melakukan deformasi plastis lebih lanjut untuk memberikan kesempatan lepasnya tegangan yang tidak seragam. Sedangkan untuk perlakuan panas dilakukan dengan memanaskan material pada temperatur tertentu sehingga tegangan sisa akan hilang akibat adanya pemberian energi termal. Perlakuan panas tersebut dikenal dengan nama *stress-relieving treatment*^[5].

2.2.2 Canai Panas

Proses canai panas (*hot rolling*) merupakan proses canai dengan temperatur di atas temperatur rekristalisasi dari material. Proses canai panas merupakan suatu proses deformasi yang diimbangi dengan proses perlakuan panas sehingga tidak terjadi tegangan sisa (*residual stress*). Dalam proses canai panas akan terjadi rekristalisasi dan pertumbuhan butir sehingga sifat-sifat dan kinerja dari material akan menjadi baik.

Faktor penting dalam proses canai panas adalah temperatur akhir proses. Proses canai panas harus berakhir pada temperatur tepat di atas temperatur rekristalisasi untuk memperoleh ukuran butir yang halus dan kecil. Jika

temperatur akhir di atas temperatur rekristalisasi maka pertumbuhan butir akan terjadi, sedangkan jika temperatur akhir di bawah temperatur rekristalisasi maka akan terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*). Secara skematis proses yang terjadi pada material selama proses canai panas dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4. Ilustrasi Perubahan Ukuran Butir dalam Proses Canai Panas^[4]

Pada temperatur daerah pengerjaan panas (*hot working zone*), material akan menjadi lebih lunak dan lebih plastis dibandingkan pada temperatur ruang sehingga tidak dibutuhkan tenaga yang besar untuk melakukan deformasi. Selain itu karena tidak adanya pengerasan regang maka reduksi ukuran material yang besar dapat dilakukan. Canai panas biasanya merupakan proses tahap pertama yang akan dilanjutkan dengan proses canai dingin.

2.3 Proses Termomekanikal

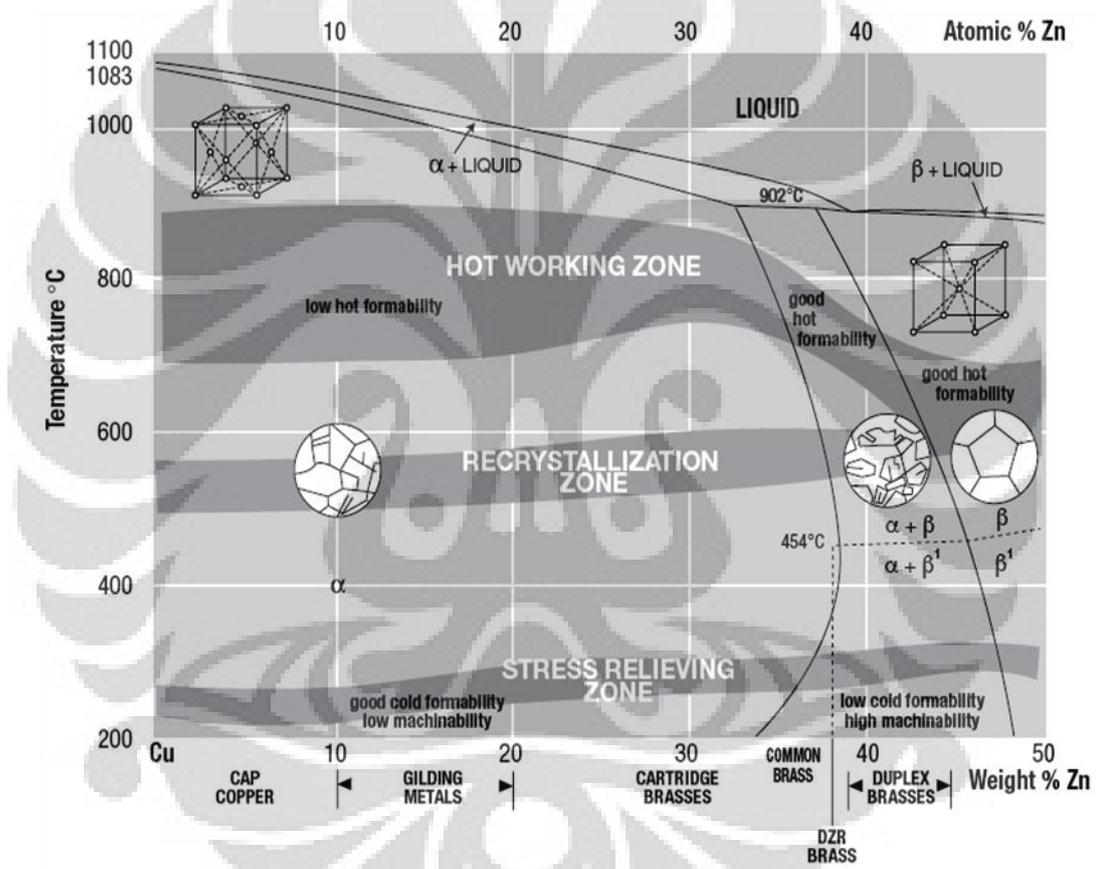
Proses termomekanikal bertujuan untuk mengontrol mikrostruktur suatu material agar menghasilkan sifat mekanis yang baik. Secara umum, proses termomekanikal terdiri dari proses pemanasan, proses canai, dan proses pendinginan. Proses pemanasan sangat penting dalam menghasilkan sifat mekanis material karena melalui pemanasan dapat diprediksi mikrostruktur akhir yang akan terbentuk.

Hal yang mempengaruhi pertumbuhan besar butir yaitu temperatur pemanasan dan waktu tahan. Semakin lama waktu tahan, maka ukuran butir menjadi semakin besar. Semakin tinggi temperatur, maka ukuran butir menjadi semakin besar. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi waktu tahan dan semakin tinggi temperatur, maka kemampuan butir untuk berdifusi ke butir

lainnya menjadi semakin besar pula dan juga kesempatan butir untuk tumbuh semakin besar.

2.4 Anil Rekristalisasi

Dalam proses canai panas terjadi suatu proses termal yaitu proses rekristalisasi. Proses rekristalisasi secara umum bertujuan untuk melunakan material sehingga sering disebut sebagai *recrystallization annealing*. Temperatur rekristalisasi pada material kuningan dapat dilihat pada Gambar 2.5. di bawah ini.



Gambar 2.5. Temperatur Proses Rekristalisasi pada Logam Kuningan^[6]

Proses rekristalisasi secara umum dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu proses *recovery*, *recrystallization*, dan *grain growth*^[5].

Recovery

Recovery merupakan tahap awal proses anil yang terjadi pada temperatur rendah. Pada tahapan ini, tidak terjadi perubahan sifat mekanis (kekuatan dan kekerasan) dari suatu material. Perubahan mikrostruktur dari material selama tahapan ini tidak melibatkan pergerakan batas butir dengan sudut yang besar. Untuk benda kerja yang butirnya memipih setelah proses canai dingin (*cold rolled*) tidak terlihat perubahan pada butir tersebut. Namun pada tingkatan submikroskopis, terjadi perubahan pada titik cacat dan klusternya, penghilangan dan pengaturan ulang dislokasi, serta pembentukan subbutir dan pertumbuhannya. Perubahan mikrostruktural ini akan melepas sebagian besar tegangan dalam. Tahapan *recovery* ini dipergunakan untuk proses *stress-relieving*. Dalam proses ini beberapa dislokasi akan hilang sehingga kekuatan dari material akan berkurang. Namun, hilangnya dislokasi ini diimbangi dengan pembentukan subbutir yaitu butir dengan batas butir bersudut kecil.

Recrystallization

Ketika tahapan *recovery* akan berakhir, pembentukan *nuclei* dan butir baru akan mulai terjadi. Seperti halnya proses solidifikasi, rekristalisasi adalah proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Nukleasi dari butir baru terjadi dari bergabungnya sub-butir. Butir yang baru tumbuh merupakan butir yang bebas regangan (*strain-free*) dan terikat dengan batas butir bersudut besar yang memiliki mobilitas yang sangat tinggi yang akan “menyapu” semua jejak dari butir yang terdahulu.

Ketika semua butir yang terdahulu telah digantikan oleh butir baru yang bebas regang, maka dapat dikatakan material tersebut telah terekristalisasi dengan sempurna (*fully recrystallized*). Seperti telah dijelaskan bahwa daya penggerak untuk proses rekristalisasi adalah energi yang tersimpan saat pengerjaan dingin, maka jika pengerjaan dinginnya tinggi, semakin kecil energi termal yang digunakan sehingga semakin rendah temperatur dari rekristalisasi.

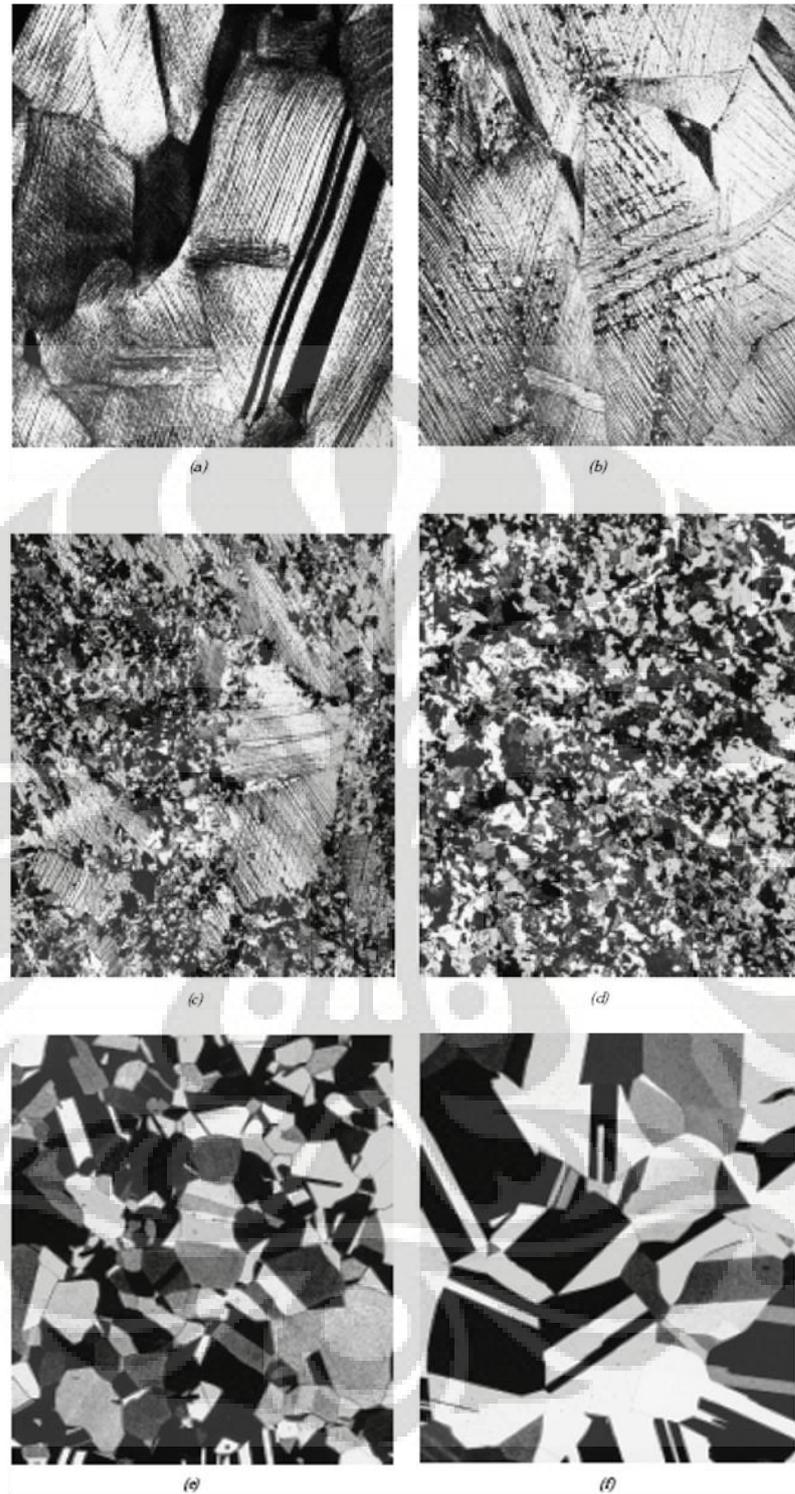
Butir yang baru merupakan butir yang bebas regang sehingga efek pengerasan dari pengerjaan dingin akan menghilang. Hal tersebut akan menyebabkan material memiliki kekuatan dan kekerasan yang sama sebelum

dilakukan pengerjaan dingin. Namun perubahan kekuatan dan kekerasan setelah rekristalisasi sangat kecil dan bertahap.

Proses rekristalisasi ini memungkinkan untuk mengontrol ukuran besar butir dan sifat mekanis dari material. Ukuran besar butir dari material yang terekristalisasi akan tergantung pada besarnya pengerjaan dingin, temperatur anil, waktu tahan, dan komposisi dari material. Hal tersebut didasarkan pada “Hukum Rekristalisasi”^[5] :

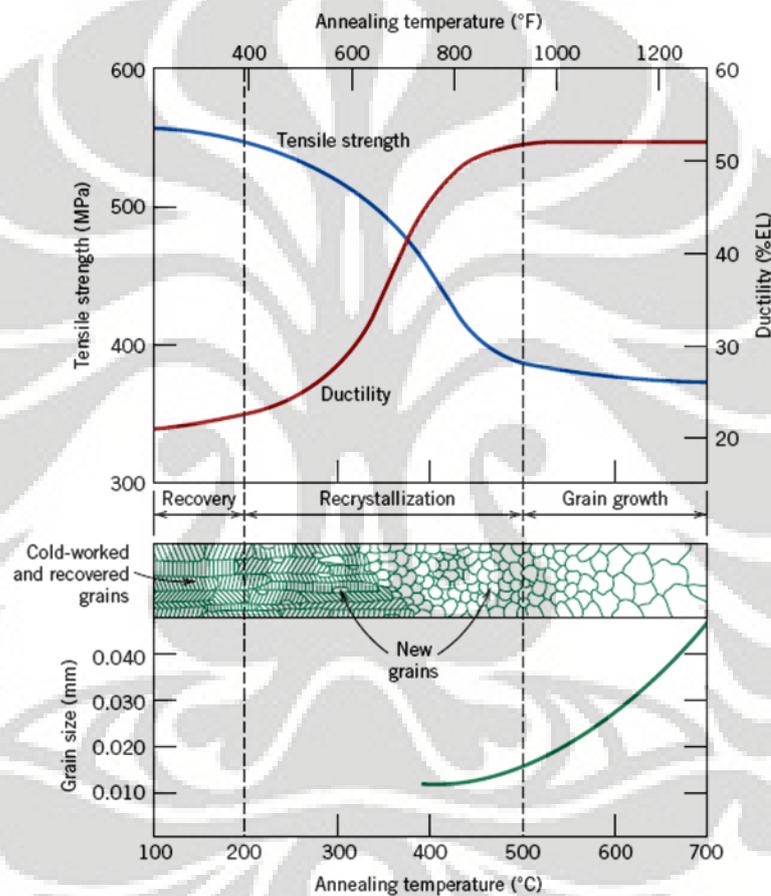
1. Pengerjaan dingin kritis yang minimum diperlukan sebelum terjadi rekristalisasi.
2. Semakin kecil persentase pengerjaan dingin maka semakin tinggi temperatur yang digunakan untuk menghasilkan rekristalisasi.
3. Meningkatkan waktu anil akan menurunkan temperatur untuk rekristalisasi.
4. Ukuran besar butir ketika proses rekristalisasi telah selesai terutama tergantung pada persentase pengerjaan dingin, dan sedikit pada temperatur anil. Semakin kecil ukuran butir maka semakin besar persentase pengerjaan dingin dan semakin rendah temperatur anil.
5. Semakin besar ukuran butir anil yang asli maka semakin besar persentase pengerjaan dingin yang dibutuhkan untuk memberikan temperatur dan waktu rekristalisasi yang sama.
6. Larutan dan dispersi halus akan menghambat rekristalisasi.

Rekristalisasi sangat bergantung dari waktu dan temperatur pemanasan. Derajat atau fraksi dari rekristalisasi meningkat seiring dengan kenaikan waktu seperti ditunjukkan pada fotomikro Gambar 2.6. Gambar tersebut menunjukkan perubahan butir dan pertumbuhan butir pada logam kuningan setelah mengalami rekristalisasi.



Gambar 2.6. Fotomikro Tahapan Rekrystalisasi dan Pertumbuhan Butir pada Logam Kuningan^[3]
 (a) struktur butir setelah *cold-worked* (33%CW), (b) tahapan awal rekrystalisasi setelah pemanasan selama 3 detik pada 580°C, butir yang sangat kecil telah mengalami rekrystalisasi, (c) perubahan sebagian butir *cold-worked* dengan butir rekrystalisasi (4 detik pada 580°C), (d) rekrystalisasi telah selesai (8 detik pada 580°C), (e) pertumbuhan butir setelah 15 menit pada 580°C, (f) pertumbuhan butir setelah 10 menit pada 700°C. Semua Fotomikro dengan Perbesaran 75x

Hubungan antara temperatur dengan ukuran butir, kekuatan, dan keuletan (pada temperatur ruang) pada paduan kuningan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.7. Temperatur rekristalisasi pada logam kuningan sekitar 425°C hingga 750°C atau antara 1/3 hingga 1/2 dari temperatur lebur ($0,3-0,5T_m$)^[7]. Temperatur rekristalisasi dari sebuah logam bergantung dari beberapa faktor, seperti persentase pengerjaan dingin (*% cold worked*), dan tingkat kemurnian dari paduan. Peningkatan persentase pengerjaan dingin akan meningkatkan laju rekristalisasi sehingga temperatur rekristalisasi akan menurun^[3].

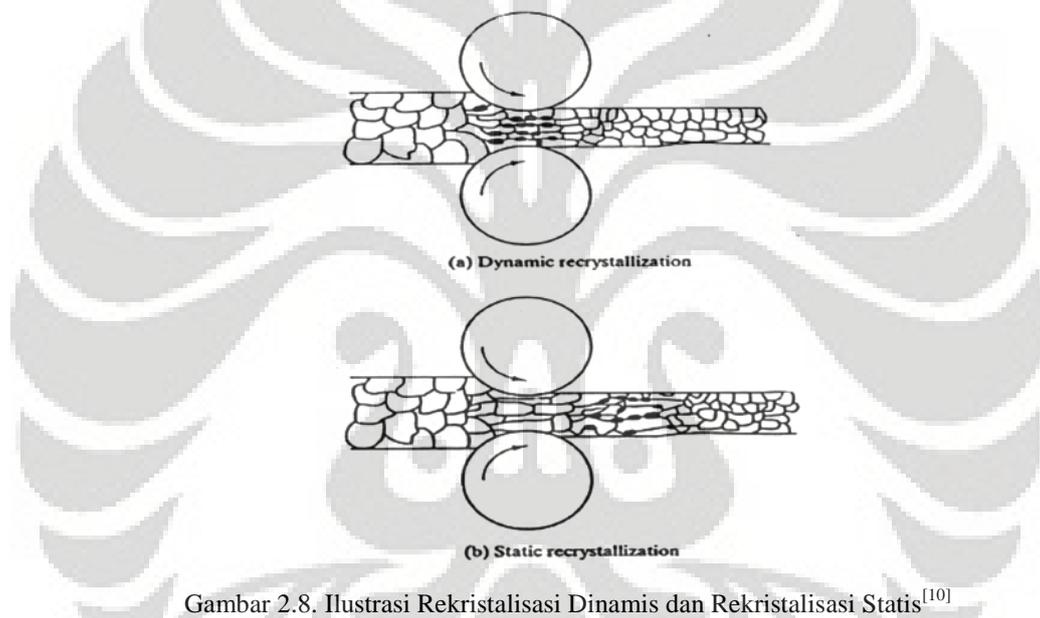


Gambar 2.7. Pengaruh Temperatur Anil Terhadap Kekuatan, Keuletan, dan Ukuran Butir pada Paduan Kuningan^[3]

Menurut I.M. Ghauri *et al*^[8], temperatur dan kondisi dari proses pemanasan anil sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan butir pelat kuningan. Peningkatan temperatur pemanasan anil akan menyebabkan butir tumbuh semakin besar dan akan menurunkan kekuatan (*strength*) dari pelat kuningan.

Menurut Valerie Randle *et al*^[9], proses anil rekristalisasi akan menyebabkan perubahan mikrostruktur dan sifat mekanis dari *cartridge brass* (*alpha-brass*). Peningkatan temperatur anil rekristalisasi menyebabkan ukuran butir akan semakin besar dan menurunkan nilai kekerasan.

Dalam proses canai, proses rekristalisasi dapat dibagi menjadi dua yaitu rekristalisasi dinamis dan rekristalisasi statis. Proses rekristalisasi yang terjadi saat material sedang dideformasi disebut rekristalisasi dinamis. Sedangkan rekristalisasi statis terjadi sesaat setelah material mengalami deformasi. Ilustrasi dari pengertian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.8.



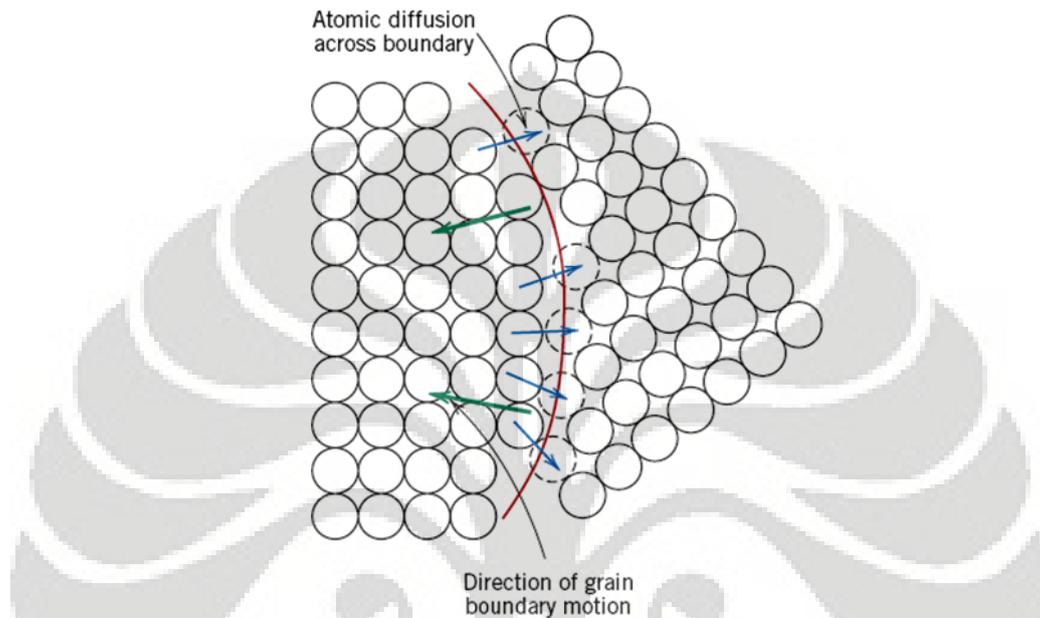
Gambar 2.8. Ilustrasi Rekristalisasi Dinamis dan Rekristalisasi Statis^[10]

Pada rekristalisasi dinamis saat material mengalami deformasi terjadi regangan pada material dan jika regangan tersebut adalah regangan kritis maka akan tersedia energi yang cukup untuk terbentuk inti baru pada batas butir. Sedangkan pada rekristalisasi statis hampir sama hanya pembentukan *nuclei* terjadi setelah deformasi. Prosesnya dilakukan dengan temperatur tinggi diatas temperatur rekristalisasi dari material.

Grain Growth

Proses *grain growth* atau pertumbuhan butir dimulai ketika proses rekristalisasi telah selesai. Hal tersebut ditandai dengan pengurangan secara

bertahap kekuatan material sebagai akibat dari membesarnya ukuran butir. Pertumbuhan butir terjadi dengan pergerakan atau migrasi batas butir. Pergerakan batas butir terjadi karena adanya difusi atom-atom dari suatu butir ke butir lainnya yang menyebabkan berubahnya batas butir. Ilustrasi tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Ilustrasi Pertumbuhan Butir melalui Difusi Atom^[3]

Pertambahan temperatur akan menyebabkan bertambahnya energi yang diberikan terhadap butir. Temperatur tinggi akan menyebabkan meningkatnya energi getaran termal sehingga mempercepat atom berdifusi melalui batas butir dari butir yang kecil menuju butir yang besar. Oleh sebab itu akan didapat ukuran butir yang relatif besar setelah proses *grain growth* ini selesai. Membesarnya ukuran butir akan menyebabkan menurunnya sifat mekanis seperti kekerasan dan tegangan luluh^[11].

Untuk material polikristalin, diameter butir, d , sangat beragam tergantung dari waktu, t , sesuai dengan persamaan^[3]:

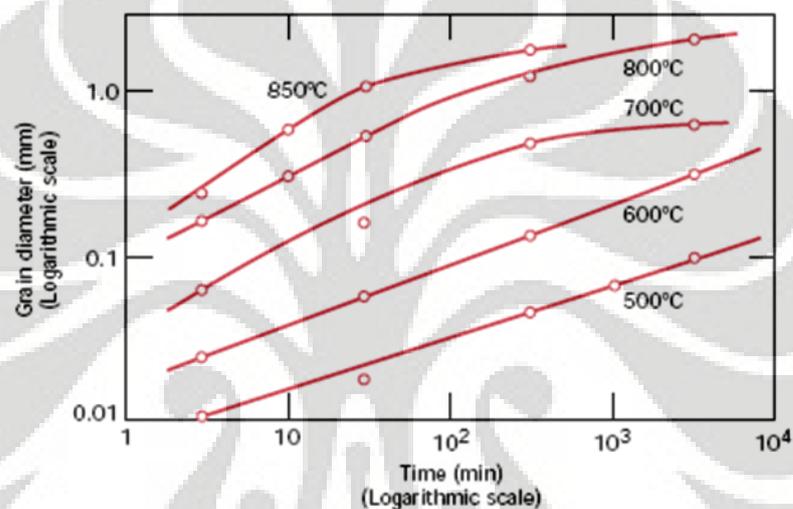
$$d^n - d_0^n = Kt \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana d_0 adalah diameter butir pada $t = 0$, K dan n merupakan konstanta. Nilai n pada umumnya lebih besar atau sama dengan 2.

Menurut R. A. Harding *et al*^[12], laju pemanasan berpengaruh terhadap temperatur rekristalisasi, serta ukuran butir. Semakin tinggi laju pemanasan maka

temperatur rekristalisasi akan meningkat dan akan menurunkan ukuran butir yang mengalami pertumbuhan.

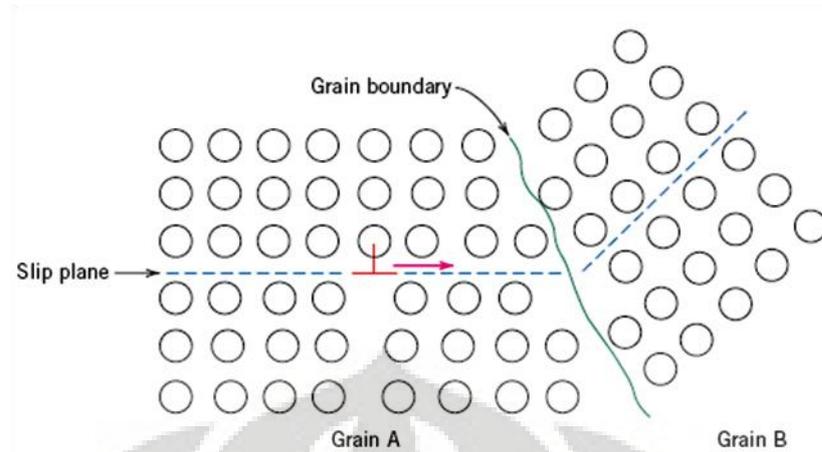
Hubungan antara ukuran butir dengan waktu dan temperatur pada logam kuningan secara skematis dapat ditunjukkan pada Gambar 2.10. Gambar tersebut menjelaskan grafik logaritmik ukuran butir sebagai fungsi logaritmik waktu pada beberapa temperatur untuk logam kuningan. Pertumbuhan butir menjadi sangat cepat seiring dengan meningkatnya temperatur. Hal tersebut dikarenakan dengan meningkatnya temperatur maka laju difusi atom pada material juga akan meningkat^[13].



Gambar 2.10. Hubungan Antara Diameter Butir dengan Waktu untuk Pertumbuhan Butir Logam Kuningan pada Beberapa Temperatur^[3]

2.5 Mekanisme Penguatan dengan Penghalusan Butir

Sifat mekanis dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran butir atau diameter butir rata-rata dalam logam polikristal. Pada umumnya, butir yang bersebelahan biasanya memiliki orientasi yang berbeda. Hal tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 2.11. Perbedaan orientasi tersebut yang menjadikan adanya batas butir. Saat deformasi plastis, *slip* atau pergerakan dislokasi berada dalam batas butir, misalnya dari butir A ke butir B dalam Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Ilustrasi Batas Butir dan Pergerakan Dislokasi^[3]

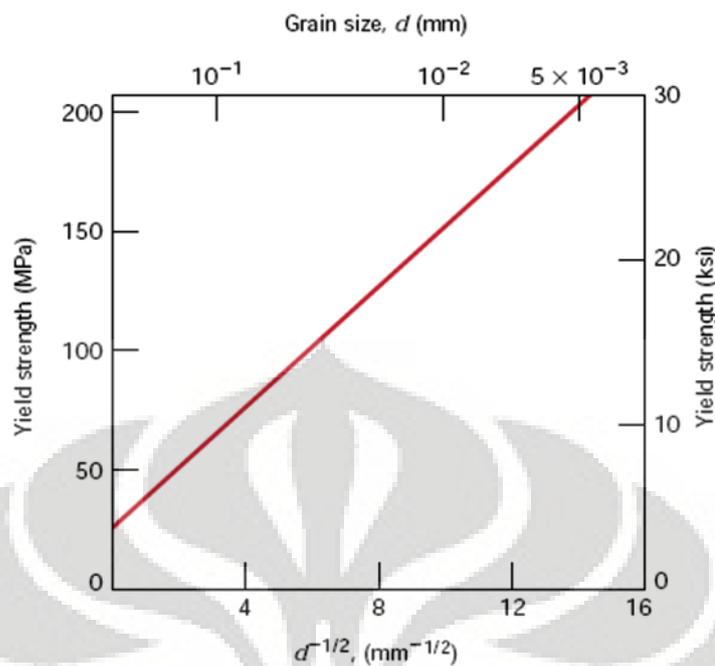
Batas butir bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi karena dua alasan^[3] :

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

Untuk mengetahui pengaruh ukuran butir dari teori diatas dapat dibuktikan dengan Persamaan *Hall-Petch*^[3] di bawah ini :

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \dots\dots\dots (2.3)$$

d adalah diameter butir rata-rata, σ_0 dan k_y adalah konstanta untuk material. Namun persamaan diatas tidak berlaku untuk material polikristal dengan butir yang sangat besar (kasar) dan butir yang sangat halus. Hubungan antara kekuatan luluh (*yield strength*) dengan ukuran butir pada kuningan 70/30 dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Hubungan Antara Ukuran Butir dengan Kekuatan Luluh pada Kuningan 70/30^[3]

2.6 Pengujian Tarik Uniaksial

Pengujian tarik uniaksial adalah pengujian non-simulatif yang sangat penting dalam penelitian tentang proses perubahan bentuk (*forming*). Terdapat beberapa nilai yang didapatkan dari pengujian tarik uniaksial. Nilai-nilai tersebut dapat digunakan untuk mengetahui berbagai aspek mampu bentuk logam. Nilai-nilai tersebut antara lain, kekuatan tarik (*tensile strength*), keuletan (*ductility*), nilai perpanjangan (*elongation*), koefisien pengerasan regang (*strain hardening exponent / n-value*), dan nilai anisotropi plastis (*plastic anisotropy / r-value*).

2.6.1 Kurva Tegangan dan Regangan Rekayasa

Kurva tegangan-regangan rekayasa (*engineering stress-strain curve*) diperoleh melalui suatu pengujian tarik uniaksial. Kurva tersebut diperoleh dari data-data beban dan pertambahan panjang yang dihasilkan pada material setiap kenaikan beban. Hasil dari pengujian tarik uniaksial dipengaruhi oleh kondisi selama pengujian antara lain :

- Temperatur proses antara 20-30°C.
- Tingkat pertambahan regangan (*strain rate*) antara $10^{-2} - 10^{-4}$ / detik.
- Pengukuran pada daerah panjang *gauge*.

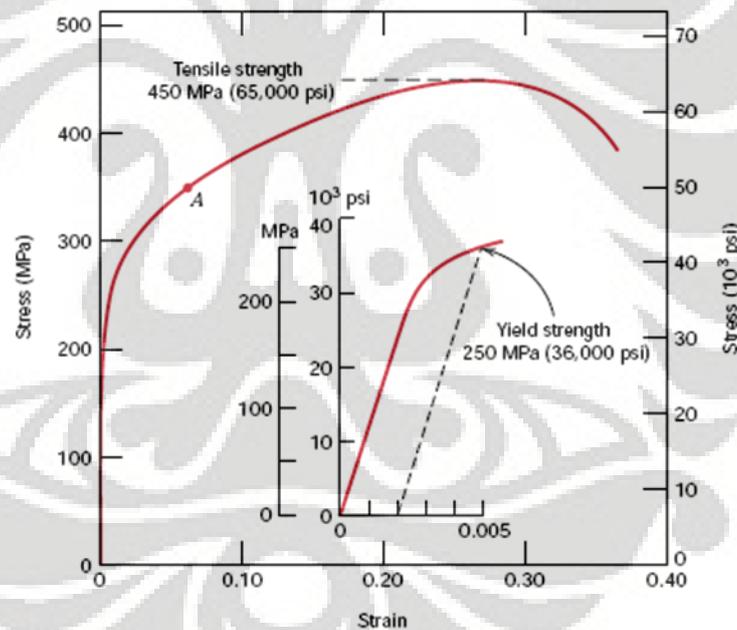
Gambar 2.13 di bawah merupakan contoh kurva tegangan-regangan rekayasa pada material kuningan. Nilai tegangan (σ) yang digambarkan pada sumbu y dihitung dari besar beban yang diterima (F) dibagi dengan luas penampang benda uji mula-mula (A_0).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (2.4)$$

Sedangkan nilai regangan (ϵ) yang digambarkan pada sumbu x dihitung dari selisih pertambahan panjang (Δl) dibagi dengan panjang awal (l_0).

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dari kurva tegangan-regangan rekayasa dapat diketahui beberapa nilai yang berhubungan dengan sifat mekanis dari suatu material seperti kekuatan tarik maksimum (UTS), keuletan, dan nilai modulus elastisitas.

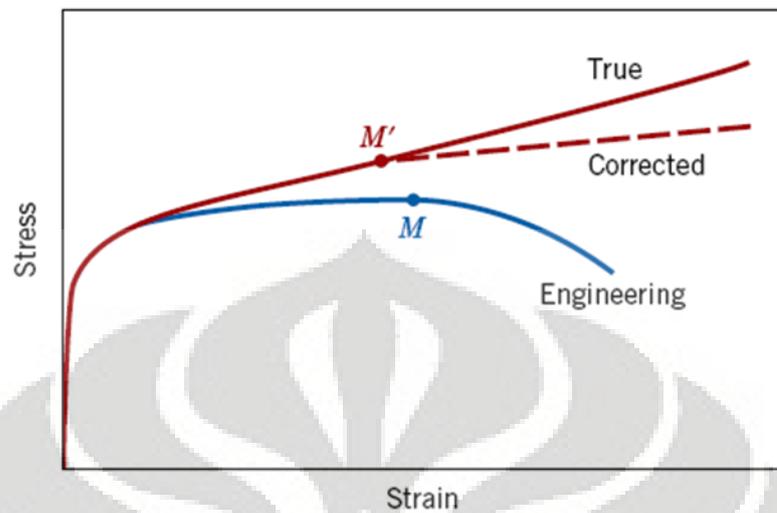


Gambar 2.13. Kurva Tegangan-Regangan untuk Logam Kuningan^[3]

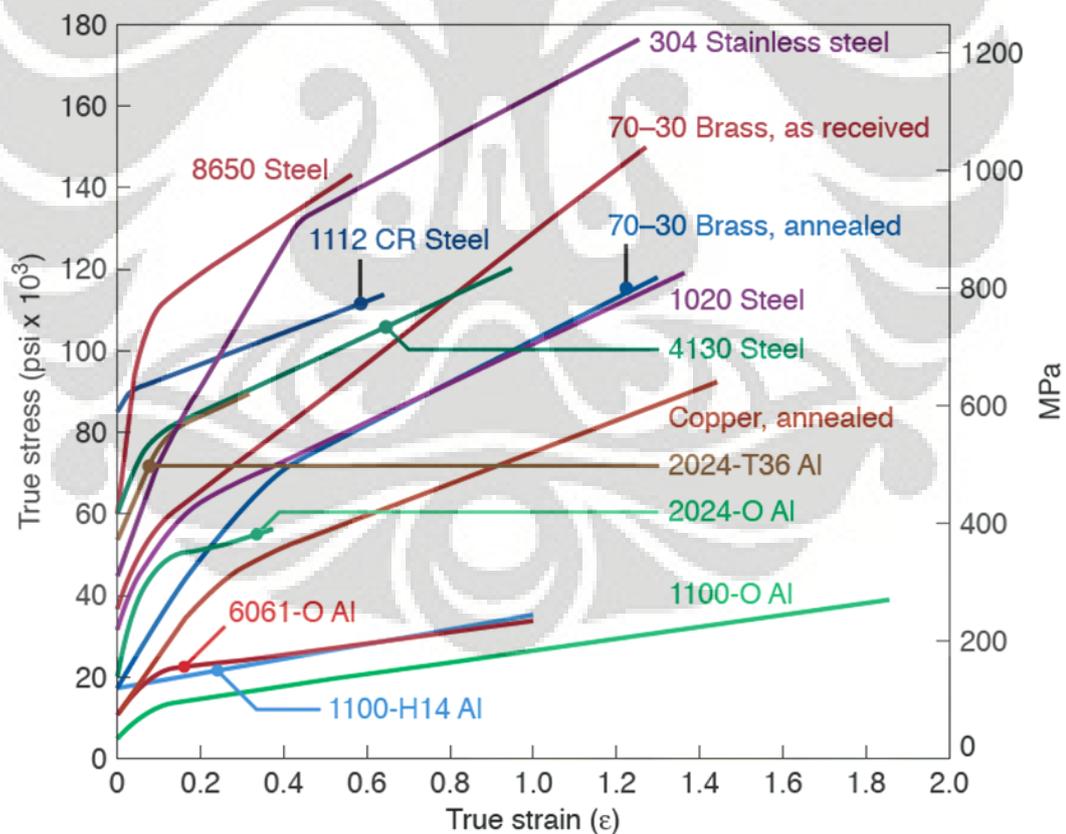
2.6.2 Kurva Tegangan dan Regangan Sesungguhnya

Kurva tegangan-regangan rekayasa dibuat berdasarkan dimensi awal dari benda uji, sedangkan untuk membuat kurva tegangan-regangan sesungguhnya (*true stress-strain curve*) berdasarkan dimensi luas area dan panjang aktual pada saat pembebanan. Perbedaan kedua kurva tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.14

sedangkan pada Gambar 2.15. dapat dilihat kurva tegangan-regangan sesungguhnya pada beberapa material.



Gambar 2.14. Perbandingan Kurva Tegangan-Regangan Rekayasa dengan Kurva Tegangan-Regangan Sesungguhnya^[3]



Gambar 2.15. Kurva Tegangan-Regangan Sesungguhnya pada Beberapa Material^[4]

Nilai *true stress* (σ_t) dan nilai *true strain* (ϵ_t) didapatkan melalui perhitungan seperti di bawah ini.

$$\sigma_t = \sigma(1 + \epsilon) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

2.6.3 Koefisien Pengerasan Regang

Pengerasan regangan adalah penambahan kekerasan suatu logam akibat regangan sehingga tegangan yang diperlukan untuk deformasi plastis akan meningkat. Koefisien pengerasan regang dirumuskan sebagai berikut^[4]:

$$\sigma = k\epsilon^n \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana n adalah koefisien pengerasan regang, dan k adalah konstanta. Nilai n dan k sangat beragam tergantung dari jenis paduan materialnya dan juga kondisi dari material, misalnya telah terdeformasi plastis, mengalami perlakuan panas, dan sebagainya. Nilai n dan k untuk beberapa material terdapat Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Nilai n dan k pada Beberapa Material^[4]

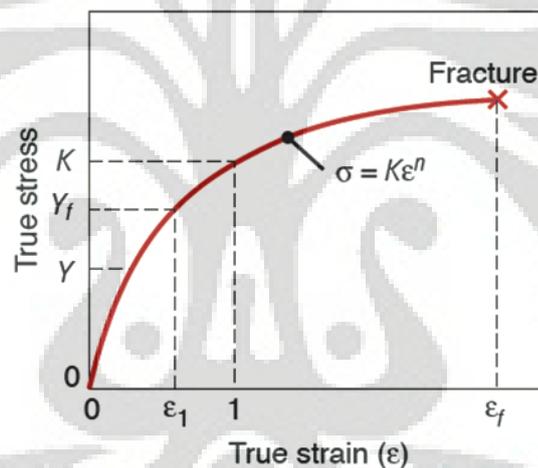
Material	K (MPa)	n
Aluminum, 1100-O	180	0.20
2024-T4	690	0.16
5052-O	210	0.13
6061-O	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-O	400	0.17
Brass, 7030, annealed	895	0.49
85-15, cold rolled	580	0.34
Bronze (phosphor), annealed	720	0.46
Cobalt-base alloy, heat treated	2070	0.50
Copper, annealed	315	0.54
Molybdenum, annealed	725	0.13
Steel, low carbon, annealed	530	0.26
1045 hot rolled	965	0.14
1112 annealed	760	0.19
1112 cold rolled	760	0.08
4135 annealed	1015	0.17
4135 cold rolled	1100	0.14
4340 annealed	640	0.15
17-4 P-H, annealed	1200	0.05
52100, annealed	1450	0.07
304 stainless, annealed	1275	0.45
410 stainless, annealed	960	0.10

Note: 100 MPa = 14,500 psi.

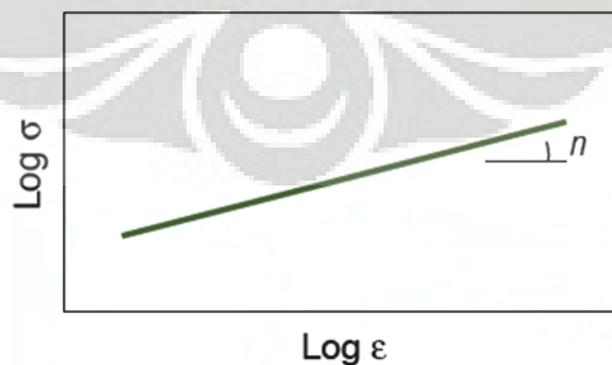
Persamaan 2.7. menunjukkan bahwa dengan meningkatnya nilai koefisien pengerasan regang (n) maka tegangan pada material akibat adanya penarikan akan bertambah. Dengan metode logaritma maka persamaan tersebut dapat diturunkan menjadi :

$$\log \sigma_t = \log k + n \log \epsilon_t \dots\dots\dots (2.9)$$

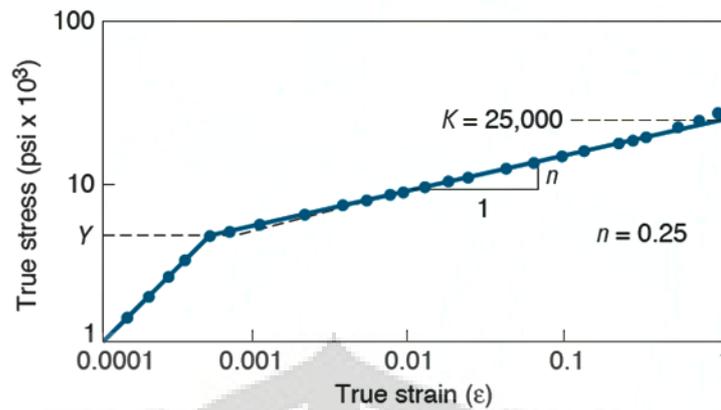
Dalam pengukuran dengan metode logaritmik, data tegangan dan regangan sesungguhnya digambarkan secara logaritmik sampai nilai beban maksimumnya. Melalui metode tersebut maka akan diperoleh kurva berbentuk garis lurus, dimana n merupakan derajat kemiringan kurva dan k merupakan tegangan yang sesungguhnya pada $\epsilon=1$. Secara skematis penjelasan tersebut dapat digambarkan pada Gambar 2.16, 2.17, dan 2.18 di bawah ini.



Gambar 2.16. Ilustrasi Pengerasan Regang pada Kurva Tegangan-Regangan Sesungguhnya^[4]



Gambar 2.17. Ilustrasi Nilai n pada Kurva Logaritmik Tegangan-Regangan^[4]



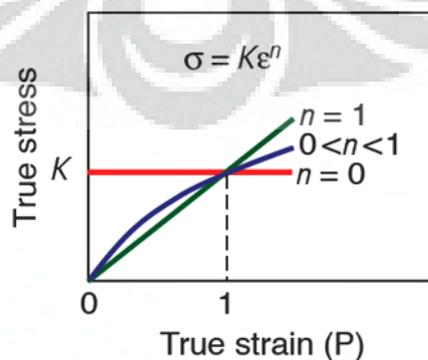
Gambar 2.18. Contoh Perhitungan Nilai n pada Sampel Aluminium 1100-O^[4]

Nilai n akan berbeda pada setiap arah pemotongan dari material hasil canai karena sifat anisotropi material. Nilai n dari material dapat diperoleh dengan melakukan pengukuran nilai n pada setiap arah yaitu arah 0°, 45°, dan 90° dari arah canai dengan rumus :

$$n = \frac{n_0 + 2n_{45} + n_{90}}{4} \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana: n_0 = nilai koefisien pengerasan regang pada arah 0° dari arah canai
 n_{45} = nilai koefisien pengerasan regang pada arah 45° dari arah canai
 n_{90} = nilai koefisien pengerasan regang pada arah 90° dari arah canai

Berdasarkan nilai n yang didapat maka sifat dari material dapat diketahui. Jika $n=0$ maka material bersifat plastis ideal, jika $0 < n < 1$ maka material bersifat plastis, sedangkan jika $n=1$ maka material bersifat elastis^[4]. Secara umum sifat dari material tersebut dapat digambarkan secara skematis sebagai kurva tegangan-regangan sesungguhnya yang dapat dilihat pada Gambar 2.19.



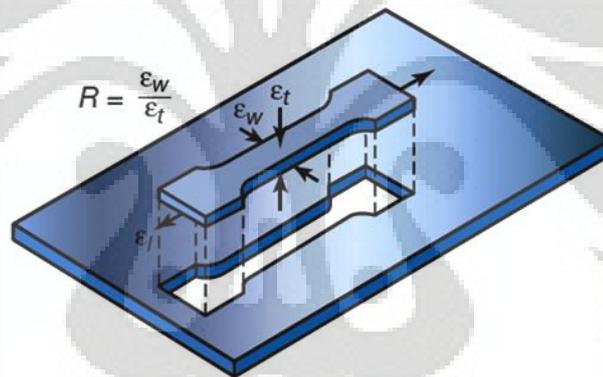
Gambar 2.19. Ilustrasi Sifat Material Berdasarkan Nilai Pengerasan Regang^[4]

2.7 Anisotropi

Pada umumnya, lembaran logam bersifat anisotropi, artinya memiliki sifat yang berbeda pada arah yang berbeda. Penyebab sifat anisotropi ini adalah terbentuknya orientasi pilihan (*preferred orientation/crystallographic texture*) akibat suatu proses deformasi. Pada saat proses pencanaian (*rolling*), kristal pada logam polikristalin cenderung berputar ke arah tertentu. Sifat ini akan mengakibatkan bervariasinya nilai modulus elastis, tegangan luluh, regangan dan berbagai karakteristik lain terhadap arah pengujian.

2.7.1 Anisotropi Normal

Anisotropi normal (r) adalah perbandingan antara regangan sesungguhnya pada arah lebar terhadap regangan sesungguhnya pada arah tebal dari uji tarik uniaksial (lihat Gambar 2.20) yang dirumuskan sebagai berikut^[4] :



Gambar 2.20. Ilustrasi Lebar dan Tebal pada Spesimen Uji Tarik^[4]

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(w_0/w_i)}{\ln(t_0/t_i)} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

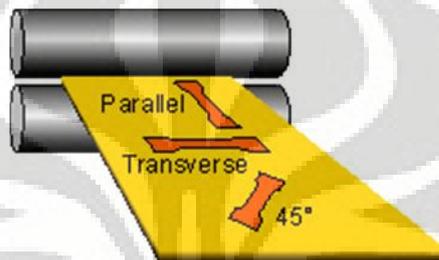
dimana : ϵ_w = regangan arah lebar ϵ_t = regangan arah tebal
 w_0 = lebar awal t_0 = tebal awal
 w_i = lebar setelah diuji t_i = tebal setelah diuji

Koefisien anisotropi normal menunjukkan ketahanan material terhadap penipisan pada arah tebal tegak lurus dengan bidang lembaran. Nilai ini dapat dicari dengan sebelumnya menghitung berbagai nilai anisotropi normal pada setiap

arah (lihat Gambar 2.21.) lalu kemudian dimasukkan menurut persamaan di bawah ini^[4] :

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \dots\dots\dots (2.12)$$

- dimana : r_0 = anisotropi normal pada arah 0° dari arah canai (paralel)
 r_{45} = anisotropi normal pada arah 45° dari arah canai (diagonal)
 r_{90} = anisotropi normal pada arah 90° dari arah canai (transversal)



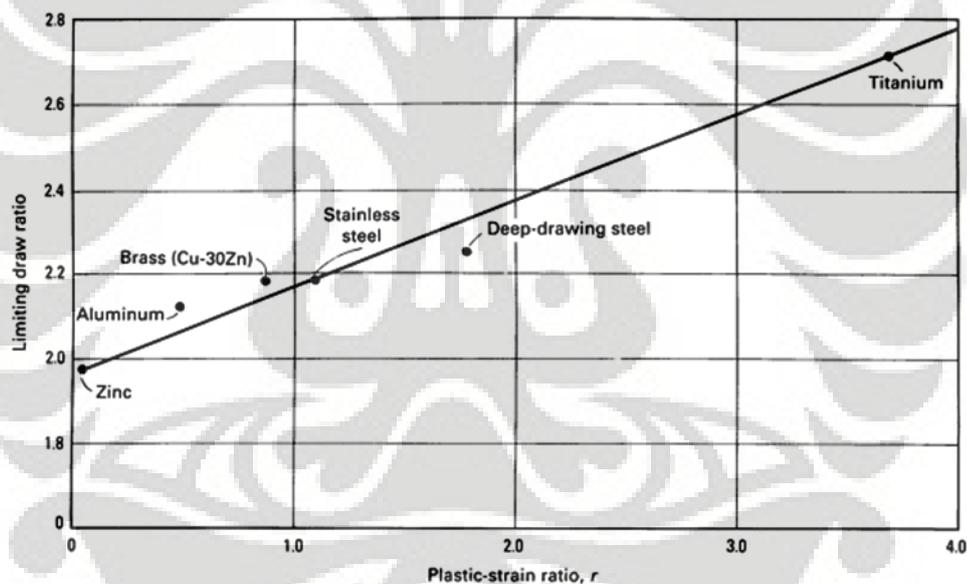
Gambar 2.21. Ilustrasi Arah Lembaran Terhadap Arah Canai^[5]

Sifat lembaran logam dapat diketahui dari nilai koefisien anisotropi (r). Jika nilai $r = 1$ maka deformasi pada arah lebar dan tebal sama, jika $r > 1$ maka deformasi pada arah lebar lebih besar daripada tebal sehingga ketahanan logam terhadap penipisan baik, sedangkan jika $r < 1$ maka deformasi pada arah tebal lebih besar daripada lebar sehingga ketahanan logam terhadap penipisan kurang baik^[5]. Pada Tabel 2.2 dapat dilihat nilai koefisien anisotropi (r) pada beberapa jenis material.

Tabel 2.2. Nilai Anisotropi Beberapa Jenis Material^[4]

Material	\bar{R}
Zinc alloys	0.4-0.6
Hot-rolled steel	0.8-1.0
Cold-rolled rimmed steel	1.0-1.4
Cold-rolled aluminum-killed steel	1.4-1.8
Aluminum alloys	0.6-0.8
Copper and brass	0.6-0.9
Titanium alloys (α)	3.0-5.0
Stainless steels	0.9-1.2
High-strength low-alloy steels	0.9-1.2

Nilai koefisien anisotropi (r) juga berhubungan dengan nilai LDR (*Limiting Drawing Ratio*). *Limiting Drawing Ratio (LDR)* adalah batas kemampuan bahan untuk diproses penarikan dalam (*deep drawing*) yaitu perbandingan antara diameter *blank* maksimum yang dapat dibentuk tanpa mengalami kegagalan. Kemampuan suatu material untuk diproses *deep drawing* sangat bergantung dari nilai LDR. Semakin tinggi nilai LDR maka akan semakin baik *deep drawability*-nya. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai LDR suatu material adalah koefisien anisotropi material (r). Semakin tinggi nilai koefisien anisotropi (r) maka nilai LDR akan semakin tinggi sehingga material akan memiliki *deep drawability* yang sangat baik. Secara skematis hubungan antara koefisien anisotropi (r) dengan LDR dapat digambarkan pada Gambar 2.22. di bawah ini.



Gambar 2.22. Grafik Hubungan Nilai r dengan Nilai LDR Beberapa Material^[14]

Nilai r merupakan merupakan ukuran ketahanan bahan terhadap penipisan. Nilai r berhubungan dengan kerja *deep drawing* lembaran karena nilai ini merefleksikan perbedaan kemampuan dinding tepi mangkuk untuk menerima beban yang diperlukan untuk menekan *blank* selama proses *deep drawing*. Untuk proses *deep drawing* dibutuhkan bahan yang memiliki harga $r > 1$. Nilai r yang tinggi menunjukkan adanya pengerasan tekstur (*texture hardening*).

2.7.2 Anisotropi Planar

Anisotropi planar (Δr) adalah perbedaan sifat material yang menyangkut arah pada bidang lembaran. Koefisien anisotropi planar (Δr) dinyatakan oleh rumus di bawah ini^[4] :

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana : r_0 = anisotropi normal pada arah 0° dari arah canai

r_{45} = anisotropi normal pada arah 45° dari arah canai

r_{90} = anisotropi normal pada arah 90° dari arah canai

Nilai Δr mempengaruhi terjadinya pengupingan (*earing*) dimana jika $\Delta r > 0$ maka pengupingan terjadi pada arah 0° dan arah 90° . Sedangkan jika $\Delta r < 0$ maka pengupingan terjadi pada arah 45° . Untuk proses *deep drawing* dibutuhkan bahan yang memiliki nilai Δr mendekati 0^[4].

2.8 Difraksi Sinar X

Difraksi terjadi ketika sebuah gelombang bertemu dengan penghalang yang dapat menghamburkan (*scattering*) gelombang tersebut dan memiliki jarak yang hampir sama dengan panjang gelombang. Difraksi juga merupakan gabungan antara dua atau lebih gelombang yang dihamburkan oleh sebuah penghalang.

Sinar X (*X-ray*) merupakan bentuk radiasi elektromagnetik yang memiliki energi yang sangat tinggi dan panjang gelombang yang pendek. Ketika berkas sinar X bertemu dengan sebuah material padat maka beberapa dari berkas tersebut akan dihamburkan atau dipantulkan ke berbagai arah oleh elektron yang terdapat pada atom.

Secara skematis difraksi sinar X dapat digambarkan pada Gambar 2.23. Dua buah bidang sejajar A-A` dan B-B` memiliki indeks Miller h , k , dan l yang sama dan dipisahkan oleh jarak *interplanar* d_{hkl} . Asumsikan sebuah sinar X monokromatik dan koheren bertemu kedua bidang tersebut dengan sudut θ . Dua buah berkas tersebut dimisalkan sinar 1 dan sinar 2 dihamburkan oleh atom P dan Q. Kemudian terjadi interferensi dari berkas hamburan 1` dan berkas hamburan 2` juga dengan sudut θ terhadap bidang. Jika panjang jarak antara 1-P-1` dan 2-Q-2`

(misalkan SQ + QT) sama dengan jumlah panjang gelombang maka berlaku rumus difraksi (Hukum Bragg's)^[3] :

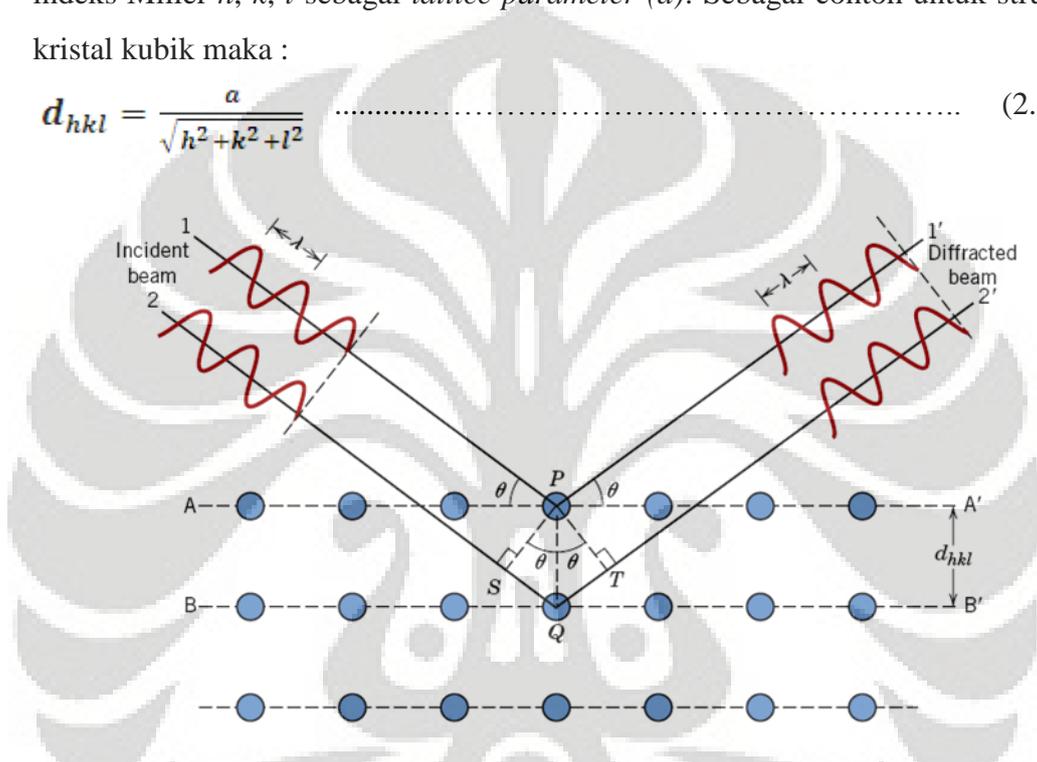
$$n\lambda = SQ + QT \dots\dots\dots (2.15)$$

atau

$$n\lambda = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta = 2d_{hkl} \sin \theta \dots\dots\dots (2.16)$$

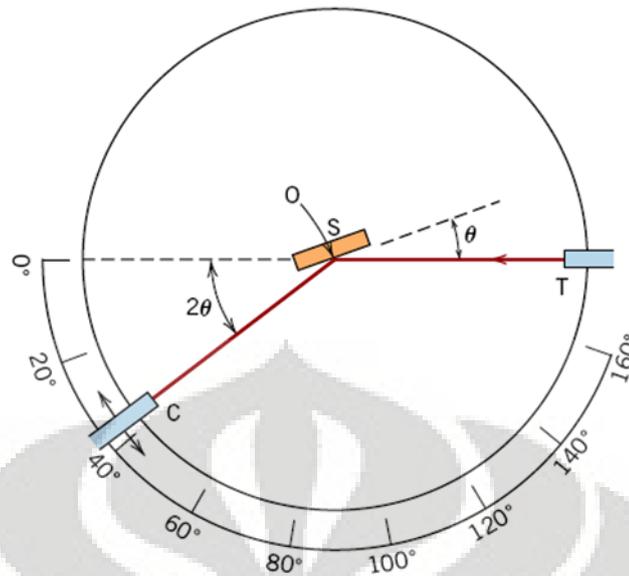
Jarak antara 2 buah bidang sejajar atom (d_{hkl}) merupakan fungsi dari indeks Miller h, k, l sebagai *lattice parameter* (a). Sebagai contoh untuk struktur kristal kubik maka :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \dots\dots\dots (2.17)$$



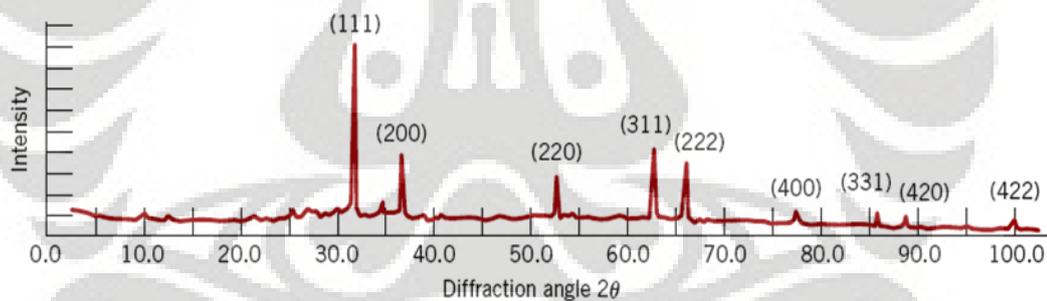
Gambar 2.23. Skematis Difraksi Sinar X^[3]

Salah satu teknik difraksi yang sering digunakan adalah difraksi dengan menggunakan radiasi sinar X monokromatik. Setiap partikel atau butir merupakan kristal yang memiliki orientasi yang berbeda sehingga akan terjadi difraksi ketika sinar x bertemu dengan partikel. *Diffractometer* merupakan alat yang digunakan untuk menentukan sudut difraksi antara material dengan sinar X. Secara skematis *Diffractometer* ditunjukkan pada Gambar 2.24.



Gambar 2.24. Skematis *Diffractometer*^[3]

Sampel S dalam bentuk pelat diletakkan pada titik O yang dapat berputar. Sinar X monokromatik ditembakkan dari titik T. Intensitas berkas difraksi akan ditangkap oleh C. Intensitas tersebut kemudian akan digambarkan menjadi pola intensitas difraksi (Gambar 2.25).

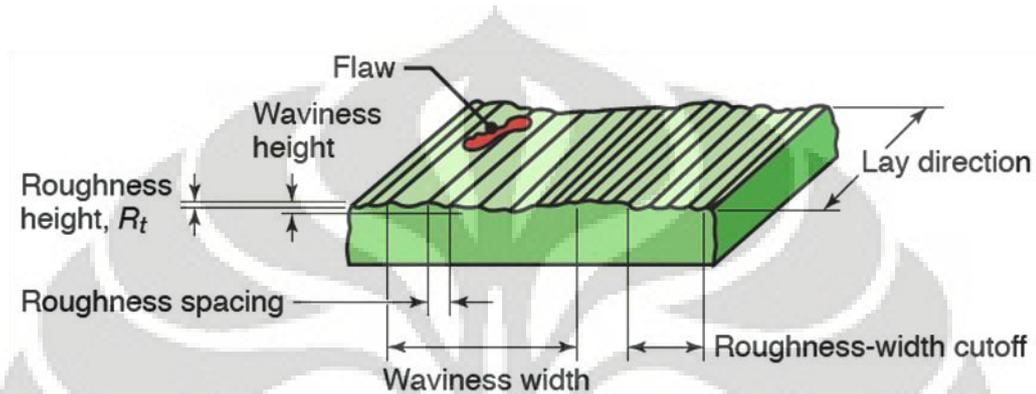


Gambar 2.25. Pola Intensitas Difraksi^[3]

Puncak tertinggi (*peak*) pada pola difraksi menunjukkan intensitas tertinggi pada beberapa bidang kristalografi. Ukuran dan geometri dari unit sel (*unit cell*) dapat diketahui dari sudut angular puncak difraksi dimana atom-atom yang berada pada unit sel akan memberikan intensitas tertinggi. Tujuan utama dari difraksi sinar X adalah untuk menentukan struktur kristal. Selain itu sinar X juga digunakan untuk mengetahui orientasi kristalografi dari sebuah kristal serta identifikasi unsur kimia kualitatif dan kuantitatif.

2.9 Kekasaran Permukaan

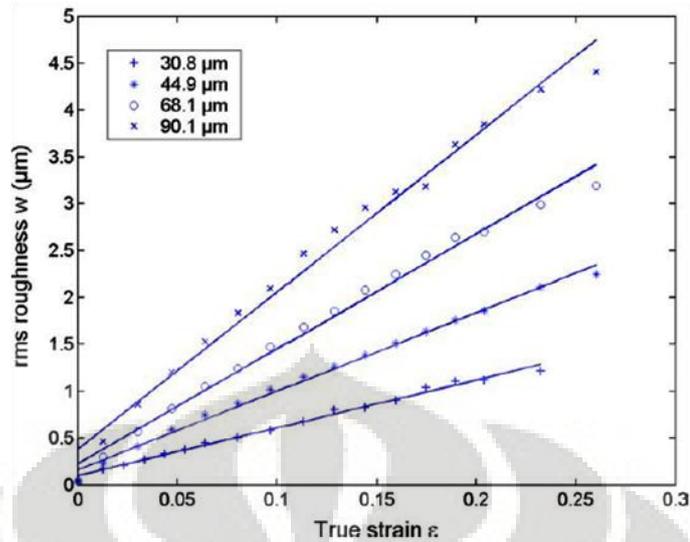
Kekasaran permukaan adalah pengukuran tekstur permukaan yang secara kuantitatif ditunjukkan oleh penyimpangan vertikal bentuk permukaan sesungguhnya dari bentuk idealnya. Jika penyimpangan besar maka permukaan kasar, sebaliknya jika penyimpangan kecil maka permukaan halus. Ilustrasi dari kekasaran permukaan ditunjukkan pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26. Ilustrasi Kekasaran Permukaan^[4]

Permukaan yang kasar dapat menyebabkan terjadinya keausan lebih cepat dan memiliki koefisien gesekan lebih tinggi dari permukaan yang halus. Kekasaran permukaan juga merupakan alat prediksi cepat terhadap sifat mekanis. Hal tersebut dikarenakan kekasaran atau ketidakteraturan permukaan dapat menjadi tempat awal timbulnya keretakan dan korosi^[10].

Kekasaran permukaan yang terjadi secara mikro berhubungan dengan regangan, ukuran butir, dan tekstur (orientasi kristal). Menurut O. Wouters *et al*^[15] hubungan antara kekasaran, regangan, dan ukuran butir menunjukkan hubungan linear (Gambar 2.27). Namun, beberapa penelitian menemukan penyimpangan dari perilaku linear ini terutama pada regangan yang lebih tinggi menunjukkan bahwa perbedaan dalam orientasi kristalografi menyebabkan perbedaan dalam kekerasan dan pergeseran antar butir yang berdekatan. Hal tersebut akan menyebabkan butir menjadi kasar sehingga dihasilkan permukaan kulit jeruk (*orange peel*).

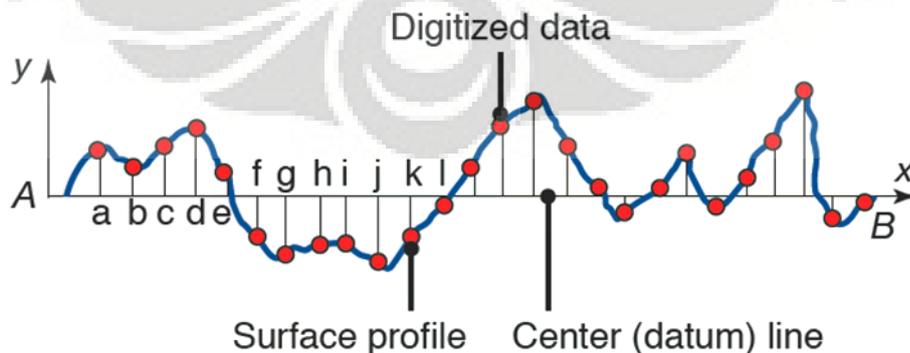


Gambar 2.27. Hubungan Antara Regangan dengan Kekasaran Permukaan^[15]

Kekasaran permukaan dari sebuah material dapat diketahui melalui pengujian dengan menggunakan mesin pengujian kekasaran permukaan. Hasil yang didapat dari pengujian tersebut adalah penampakan 2 dimensi (2D) dan profil kekasaran permukaan. Contoh profil kekasaran permukaan ditunjukkan pada Gambar 2.28. Melalui profil kekasaran permukaan tersebut maka dapat dihitung nilai kekasaran permukaan (R_a) dan nilai standar deviasi kekasaran permukaan (R_q) dari sebuah material dengan menggunakan rumus^[4] :

$$R_a = \frac{y_a + y_b + y_c + \dots + y_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad \dots \dots \dots (2.18)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{y_a^2 + y_b^2 + y_c^2 + \dots + y_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} = \left[\int_0^l y^2 dx \right]^{1/2} \quad \dots \dots \dots (2.19)$$

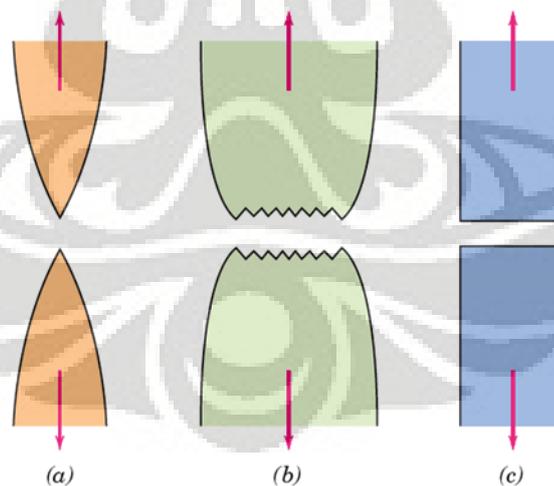


Gambar 2.28. Contoh Hasil Profil Kekasaran Permukaan^[4]

2.10 Mode Perpatahan Material

Perpatahan adalah pemisahan sebuah material menjadi dua atau lebih sebagai respon dari tegangan yang diterima. Tegangan yang diberikan dapat berupa tegangan tarik (*tensile*), tegangan tekan (*compressive*), tegangan geser (*shear*), atau tegangan puntir (*torsional*). Secara umum mode perpatahan material dibagi menjadi 2 (dua) yaitu perpatahan ulet (*ductile*) dan perpatahan getas (*brittle*). Pembagian mode perpatahan tersebut berdasarkan dari kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis. Material ulet menunjukkan kemampuan untuk mengalami deformasi plastis yang sangat tinggi sebelum material tersebut patah. Sedangkan material getas hanya sedikit atau tidak mengalami deformasi plastis sebelum material tersebut patah.

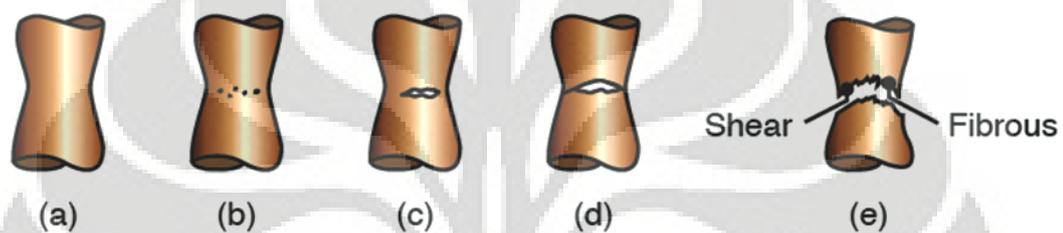
Setiap mode perpatahan memiliki ciri dan karakteristik tersendiri sehingga setiap material dapat dibedakan berdasarkan karakteristik perpatahannya. Material yang bersifat ulet (*ductile*) akan mengalami penciutan (*necking*) sebelum material tersebut patah, sedangkan material yang bersifat getas (*brittle*) tidak akan mengalami penciutan (*necking*) karena material getas tidak mengalami deformasi plastis. Perbedaan antara perpatahan pada material ulet dengan perpatahan pada material getas dapat dilihat pada Gambar 2.29.



Gambar 2.29. Mode Perpatahan Beberapa Material^[3]. (a) Perpatahan pada Material Sangat Ulet, (b) Perpatahan pada Material Ulet, dan (c) Perpatahan pada Material Getas.

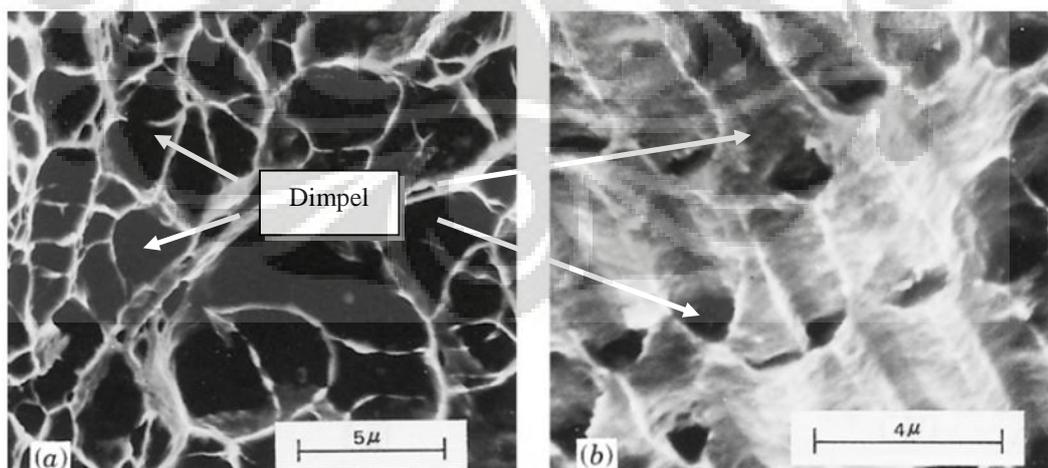
2.10.1 Perpatahan Ulet

Perpatahan ulet memiliki karakteristik berserabut (*fibrous*) dan gelap (*dull*). Perpatahan ulet umumnya lebih disukai karena material ulet biasanya lebih tangguh dan memberikan peringatan lebih dahulu sebelum terjadinya kerusakan. Secara umum perpatahan ulet akan mengalami beberapa tahapan, yaitu penciutan awal, terbentuknya rongga-rongga kecil (*cavity*), *cavity* berkumpul dan menimbulkan retak (*crack*), penjalaran retak (*crack propagation*), dan mengalami perpatahan. Tahapan tersebut secara skematis dapat dilihat pada Gambar 2.30.



Gambar 2.30. Skematis Tahapan Perpatahan Ulet^[4]. (a) penciutan awal, (b) pembentukan *cavity*, (c) *cavity* berkumpul menimbulkan retak, (d) penjalaran retak, dan (e) perpatahan.

Perpatahan Ulet juga dapat diamati dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. Secara penampakan mikro, perpatahan ulet menunjukkan adanya dimpel-dimpel sebagai tempat berkumpulnya *cavity*. Contoh penampakan perpatahan ulet pada hasil SEM dapat dilihat pada Gambar 2.31.



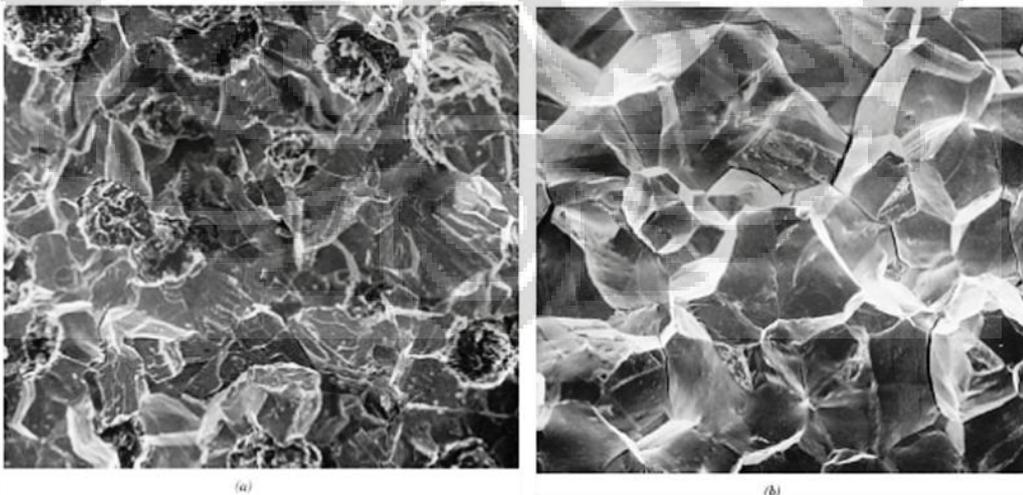
Gambar 2.31. Hasil SEM untuk Perpatahan Ulet^[3]. (a) *Spherical Dimples* pada Perpatahan Ulet dengan Pembebanan Tarik Uniaksial, dan (b) *Parabolic-Shape Dimples* pada Perpatahan Ulet dengan Pembebanan Geser. Perbesaran 5000x.

2.10.2 Perpatahan Getas

Perpatahan getas memiliki ciri-ciri sebagai berikut :

1. Permukaan patahan berbutir (*granular*) dan terang (*bright*).
2. Tidak ada atau sedikit sekali deformasi plastis yang terjadi pada material.
3. Retak atau perpatahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin membelah atom-atom material (*transgranular*).
4. Pada material lunak dengan butir kasar (*coarse-grain*) maka dapat dilihat pola-pola yang dinamakan *chevrons* atau *fan-like pattern* yang berkembang keluar dari daerah awal kegagalan.
5. Material keras dengan butir halus (*fine-grain*) tidak memiliki pola-pola yang mudah dibedakan.
6. Material *amorphous* (seperti gelas dan keramik) memiliki permukaan patahan yang bercahaya dan mulus.

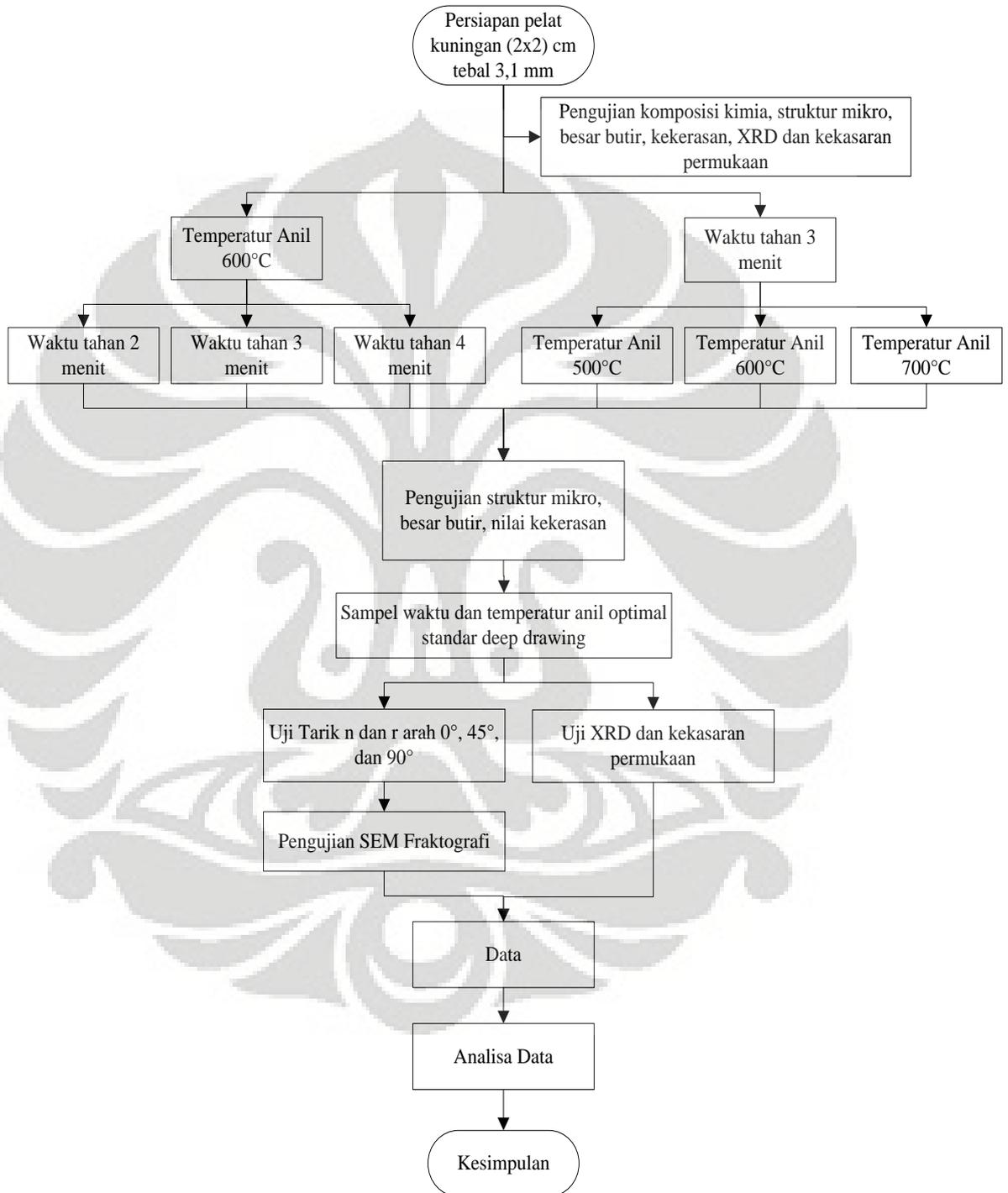
Perpatahan getas juga sama seperti halnya perpatahan ulet dapat diamati dengan menggunakan SEM. Perpatahan getas menunjukkan adanya pembelahan (*cleavage*) pada butir baik retak merambat secara memotong butir (*transgranular*) atau retak menjalar melalui batas butir (*intergranular*). Hasil pengamatan melalui SEM pada perpatahan getas dapat dilihat pada Gambar 2.32.



Gambar 2.32. Hasil SEM untuk Perpatahan Getas^[3]. (a) retak merambat memotong butir (*transgranular*), dan (b) retak merambat melalui batas butir (*intergranular*). Perbesaran 50x

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

1. Gergaji logam
2. Mesin bubut
3. *Spectrometer*
4. Dapur *Nabertherm*
5. Cetakan *mounting*
6. Mesin amplas
7. Mesin poles
8. Mikroskop optik
9. Mesin uji tarik *Shimadzu*
10. Jangka sorong
11. Mesin uji kekerasan *Vickers*
12. Mikroskop ukur
13. *Scanning Electron Microscope*
14. Mesin uji kekasaran permukaan
15. Mesin XRD (*X-ray Diffractometer*)
16. Lain-lain : kantong plastik, label, spidol, tang penjepit, palu, penggaris, sarung tangan

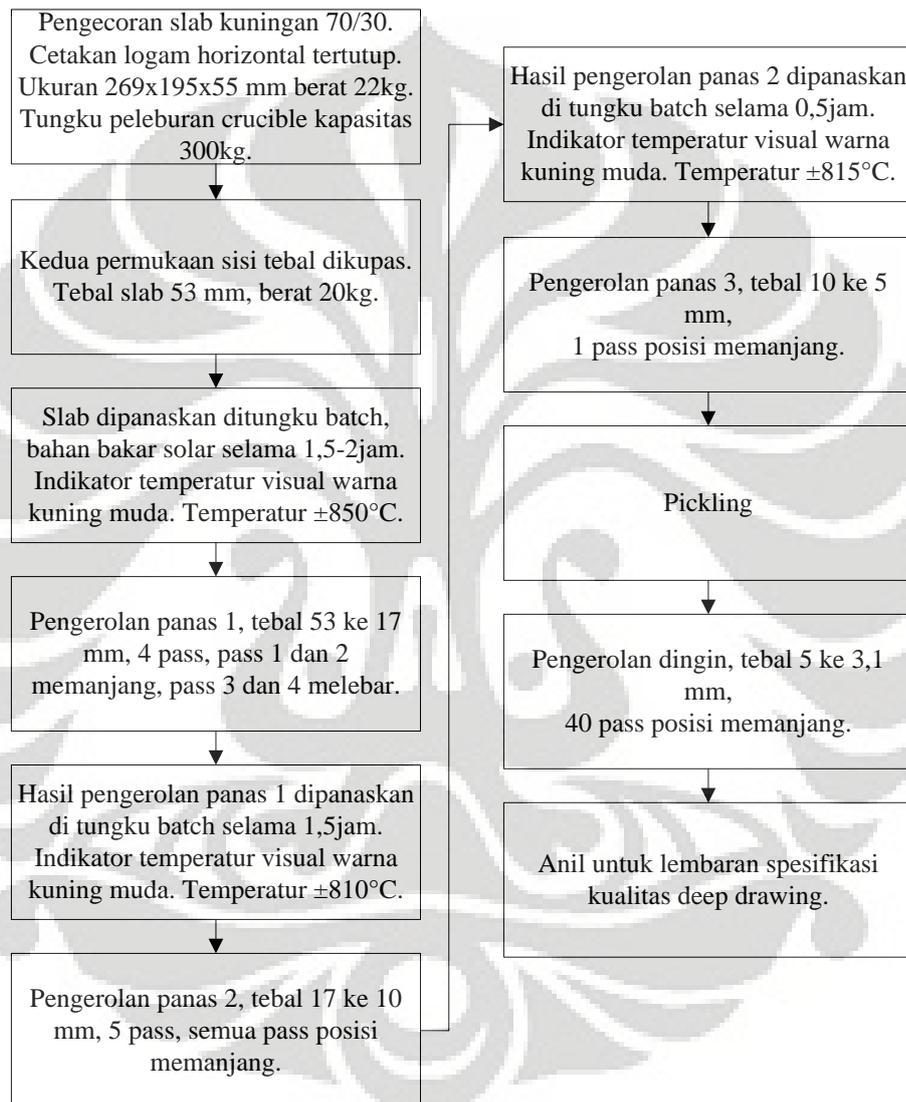
3.2.2 Bahan

1. Lembaran kuningan 70/30 hasil proses canai dingin
2. Resin
3. *Hardener*
4. Kertas amplas *grid* #200, #400, #600, #800, #1000, #1200, dan #1500
5. Alumina (Al_2O_3)
6. Kain poles / beludru
7. Zat etsa kimia : Larutan FeCl_3 , alkohol 96%, Larutan HCl
8. 1 roll film
9. Kertas foto

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Proses Pembuatan Sampel

Pembuatan sampel berupa lembaran logam kuningan dilakukan di PT. JSST Surabaya dengan proses pengecoran. Slab kuningan yang dihasilkan kemudian dilakukan proses canai panas dan canai dingin. Untuk lebih jelasnya, proses dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.2. di bawah ini :



Gambar 3.2. Diagram Alir Pembuatan Sampel

Proses pembuatan sampel diawali dengan proses pengecoran hingga dihasilkan slab kuningan yang selanjutnya dilakukan proses canai secara bertahap. Proses canai pertama merupakan canai panas (*hot rolled*) dengan temperatur 850°C selama 1,5-2 jam dengan reduksi ketebalan slab 53-17 mm.

Hasil canai panas pertama tersebut kemudian dipanaskan dengan temperatur 810°C selama 1,5 jam dan dilakukan proses canai kedua dengan reduksi ketebalan slab 17-10 mm. Slab kemudian dipanaskan kembali dengan temperatur 815°C selama 0,5 jam dan dilakukan proses canai ketiga dengan reduksi ketebalan slab 10-5 mm. Pada tahap akhir dilakukan proses canai dingin (*cold rolled*) dengan reduksi ketebalan slab 5-3,1 mm dan selanjutnya akan dilakukan proses pemanasan anil.

Sampel untuk pemanasan anil adalah pelat kuningan 70/30 hasil proses canai dingin dengan terlebih dahulu dibuat menjadi ukuran 2x2 cm dengan tebal 3,1 mm. Gambar 3.3. di bawah ini adalah gambar sampel beserta dimensinya.



Gambar 3.3. Dimensi Sampel

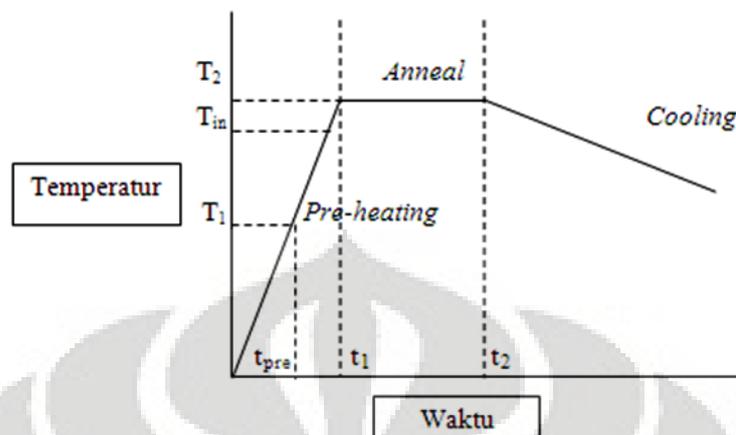
3.3.2 Proses Pemanasan Anil

Sampel pelat kuningan 70/30 yang telah dibuat dengan dimensi 2x2 cm dan tebal 3,1 mm kemudian dilakukan proses pemanasan anil dengan menggunakan Dapur Nabertherm (*Nabertherm Furnace*). Dapur Nabertherm dapat dilihat pada Gambar 3.4. di bawah ini.



Gambar 3.4. Dapur Nabertherm

Siklus proses pemanasan anil secara skematis dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut :



Gambar 3.5. Ilustrasi Siklus Pemanasan Anil

Temperatur rekristalisasi (T_2) ditentukan berdasarkan diagram fasa dari kuningan 70/30. Pada diagram tersebut titik lebur kuningan 70/30 adalah sekitar 980°C sehingga berdasarkan ketentuan temperatur rekristalisasi yaitu $0,4-0,6T_m^{[5]}$ maka temperatur optimum untuk anil rekristalisasi adalah sekitar 600°C . Dalam penelitian ini digunakan 3 variasi temperatur anil rekristalisasi yaitu 500°C , 600°C , dan 700°C . Temperatur 500°C dan 700°C digunakan sebagai pembandingan untuk melihat fenomena perubahan struktur mikro maupun sifat mekanis.

Waktu tahan anil (t_1 hingga t_2) merupakan waktu yang dibutuhkan oleh material untuk melakukan rekristalisasi. Waktu tahan yang digunakan pada penelitian ini adalah 3 menit. Hal tersebut dikarenakan pada industri pelat logam digunakan proses anil cepat dan *continuous heating* yang berjalan langsung dalam suatu *conveyor*. Dalam penelitian ini digunakan 3 variasi waktu tahan yaitu 2, 3, dan 4 menit.

Sebelum melakukan pemanasan, dapur (*furnace*) harus diatur dengan tombol panel. Temperatur T_1 merupakan temperatur pemanasan awal (*pre-heating*) yang harus dilakukan untuk menghindari adanya kejutan panas (*thermal shock*) pada dapur. Temperatur T_1 diatur dengan menggunakan rumus $0,6T_2$ dengan kenaikan temperatur $10^\circ\text{C}/\text{menit}$ atau $11^\circ\text{C}/\text{menit}$. Dengan demikian waktu yang dibutuhkan untuk pemanasan awal (t_{pre}) hingga T_1 dapat diketahui

melalui rumus $[(0,6T_2)-T_{\text{dapur}}]/10$. Rumus tersebut didapatkan sesuai dengan kemampuan operasi dapur Nabertherm.

Setelah diatur T_1 , T_2 , dan t_1 dengan tombol panel, maka temperatur dapur akan naik. T_{in} merupakan temperatur masuk sampel ke dalam dapur. Sampel masuk ke dalam dapur pada temperatur 30°C sebelum T_2 . Sampel kemudian akan mengalami pemanasan selama waktu t_2 yang diatur pada dapur. Setelah t_2 selesai, sampel dikeluarkan dan didinginkan dengan udara (*air cooling*). T_{in} diambil atas pertimbangan sampel yang digunakan merupakan logam kuning yang memiliki konduktivitas panas yang sangat baik yaitu $10,3 \text{ inch}/^\circ\text{F}$, selain itu dikarenakan ketebalan sampel yang tipis sehingga memerlukan waktu yang sangat singkat untuk menyeragamkan panas ke seluruh bagian sampel. Jadi jika dimasukkan pada awal pemanasan dikhawatirkan akan terjadi kerancuan perbedaan temperatur pada dapur dengan temperatur yang dialami oleh material ketika telah mencapai T_2 .

Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk pengaturan temperatur dan waktu tahan pada dapur. Misalkan $T_2 = 600^\circ\text{C}$ dengan $t_2 = 3$ menit dan $T_{\text{dapur}} = 30^\circ\text{C}$, maka :

$$T_1 = (0,6 \times T_2) - T_{\text{dapur}} = (0,6 \times 600^\circ\text{C}) - 30^\circ\text{C} = 330^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{pre}} = T_1/11 = 330/11 = 30 \text{ menit}$$

$$T_{\text{in}} = 600^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 570^\circ\text{C}$$

$$t_1 = (T_2 - T_1)/10 = (600 - 330)/10 = 270/10 = 27 \text{ menit}$$

Dengan demikian, temperatur pemanasan awal adalah 330°C membutuhkan waktu (t_{pre}) selama 30 menit. Selanjutnya temperatur akan meningkat ke T_2 dengan waktu sekitar 27 menit sesuai dengan kemampuan dapur Nabertherm. Sampel dimasukkan ke dalam dapur sebelum dapur mencapai T_2 yaitu sekitar 570°C . Sampel akan mengalami penahanan temperatur dari t_1 hingga t_2 . Setelah mencapai t_2 sampel dikeluarkan dari dalam dapur dan akan mengalami pendinginan udara (*air cooling*).

3.4 Prosedur Pengujian

3.4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan mesin *Spectrometer* di Politeknik Manufaktur Negeri Bandung. Pengujian komposisi ini bertujuan untuk mengetahui kadar kandungan unsur-unsur yang terdapat pada pelat kuningan yang akan diuji. Bentuk sampel kuningan 70/30 yang akan diuji komposisi kimia dapat dilihat pada Gambar 3.6.

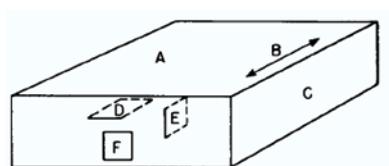


Gambar 3.6. Sampel Uji Komposisi Kimia

3.4.2 Pengujian Struktur Mikro

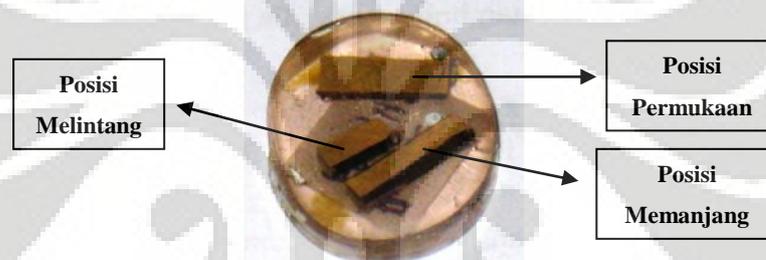
Tahapan awal yang dilakukan untuk melakukan pengujian struktur mikro adalah preparasi metalografi. Preparasi metalografi yang dilakukan menggunakan standar ASTM E3 meliputi tahapan pemotongan sampel, *mounting*, pengamplasan, pemolesan, etsa, hingga pengambilan foto mikro menggunakan mikroskop optik.

Sampel yang telah dilakukan pemanasan anil dipotong pada 3 (tiga) arah yang berbeda seperti tampak pada Gambar 3.7. A merupakan permukaan canai, B arah canai, C permukaan samping canai, D pemotongan sampel searah dengan arah canai arah normal (posisi permukaan/ND), E pemotongan sampel searah dengan arah canai arah longitudinal (posisi memanjang/RD), dan F pemotongan sampel berlawanan arah canai arah transversal (posisi melintang/TD).



Gambar 3.7. Arah Pemotongan Sampel

Tahap selanjutnya setelah sampel dipotong-potong adalah *mounting*. Tahapan *mounting* bertujuan untuk memudahkan penanganan sampel saat diproses pengamplasan, pemolesan, etsa, hingga foto mikro. Proses *mounting* yang digunakan adalah metode *castable mounting*. Prinsip metode ini adalah meletakkan sampel pada sebuah cetakan kemudian dituangkan campuran *resin* dan *hardener* yang akan mengeras. Langkah pertama yang dilakukan adalah mencampur *resin* 10-20 ml dengan *hardener* sebanyak 10-15 tetes. *Resin* dan *hardener* diaduk hingga merata dengan indikator berubah warna dari merah muda menjadi bening. Selanjutnya campuran tersebut dituangkan ke dalam cetakan *mounting* yang telah diletakkan sampel di dalamnya. Kemudian ditunggu hingga mengering dan mengeras. Gambar 3.8 menunjukkan gambar sampel yang telah di-*mounting*.



Gambar 3.8. Sampel yang Telah di-*mounting*

Proses selanjutnya setelah sampel di-*mounting* adalah proses pengamplasan. Proses ini bertujuan untuk menghaluskan permukaan sampel tahap pertama. Pengamplasan menggunakan kertas amplas dengan *grid* #200 hingga *grid* #1500 yang dipasang pada mesin amplas berputar (Gambar 3.9). Indikasi keberhasilan proses pengamplasan ini adalah dihasilkan arah yang seragam tanpa bidang pada sampel.



Gambar 3.9. Mesin Amplas

Parameter yang berpengaruh pada proses pengamplasan antara lain :

- a. Pemberian air. Hal tersebut bertujuan untuk mengurangi panas yang terjadi akibat friksi. Selain itu juga pemberian air bertujuan untuk menghilangkan geram sisa pengamplasan pada mesin amplas.
- b. Penekanan. Penekanan berpengaruh pada permukaan sampel yang dihasilkan. Jika penekanan tidak merata maka sampel yang dihasilkan akan memiliki bidang sehingga menyulitkan saat dilakukan pengambilan foto.
- c. Perubahan arah pengamplasan. Arah pengamplasan diubah 45° atau 90° setiap kali pergantian kertas amplas ke *grid* yang lebih besar. Hal tersebut bertujuan untuk menutup arah pengamplasan sebelumnya dan dihasilkan arah yang seragam.

Sampel yang telah diampas kemudian masuk ke tahapan proses berikutnya yaitu pemolesan. Proses pemolesan ini bertujuan untuk menghaluskan permukaan sampel tahap kedua dengan tingkat kehalusan yang lebih tinggi. Proses ini menggunakan kain beludru dan alumina (Al_2O_3) yang dipasang pada mesin poles yang tampak pada Gambar 3.10. Pada saat pemolesan, sampel hasil amplas harus diputar-putar untuk menghindari penumpukan alumina yang dapat menyebabkan cacat pada permukaan sampel. Indikator keberhasilan proses ini adalah dihasilkan permukaan sampel yang rata, tanpa goresan dan mengkilap. Setelah permukaan sampel mengkilap maka dilakukan pencucian dengan air dan dikeringkan dengan *dryer*.



Gambar 3.10. Mesin Poles

Tahapan selanjutnya setelah pemolesan adalah proses etsa. Etsa merupakan proses korosi terkendali yang akan menyerang batas butir sehingga akan dihasilkan foto yang tampak jelas batas butirnya. Dalam penelitian ini digunakan proses etsa kimia dengan FeCl_3 sebanyak 18 gram yang dilarutkan dengan alkohol 96% sebanyak 100 ml. Kemudian larutan FeCl_3 18% tersebut ditambahkan HCl 2-3 tetes. Sampel yang telah dipoles kemudian dicelupkan ke dalam larutan tersebut selama 10-15 detik. Selanjutnya sampel dicuci dengan air dan alkohol, kemudian dikeringkan dengan *dryer*.

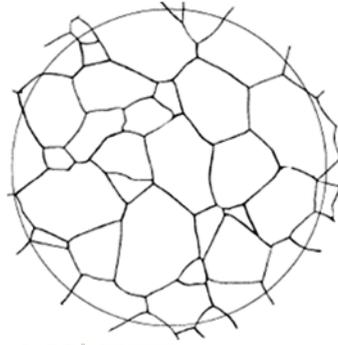
Proses selanjutnya setelah sampel di etsa adalah foto mikro. Sampel difoto dengan menggunakan mikroskop optik (Gambar 3.11). Ketika difoto, bagian yang terkorosi saat etsa akan berwarna gelap sehingga dihasilkan foto yang terlihat jelas batas butirnya. Setelah difoto mikro maka dapat dibandingkan struktur mikro yang dihasilkan untuk setiap sampel.



Gambar 3.11. Mikroskop Optik

3.4.3 Pengujian Besar Butir

Pengujian dan perhitungan besar butir dilakukan dengan menggunakan standar ASTM E112. Terdapat berbagai metode perhitungan besar butir yang ada dalam ASTM E112, namun yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode Planimetri. Prinsip perhitungan besar butir metode planimetri yaitu dengan membuat lingkaran yang berdiameter sekitar 79,8 mm dengan luas area lingkaran 5000 mm^2 pada plastik transparan. Plastik transparan tersebut kemudian diletakkan di atas foto mikro yang telah didapat dan dihitung jumlah butir yang terdapat di dalamnya. Gambar 3.12. di bawah ini merupakan contoh penggunaan metode planimetri.

Gambar 3.12. Metode Planimetri^[16]

Perhitungan besar butir dalam penelitian ini dilakukan pada satu sampel dari setiap variabel dengan foto mikro pada tiga arah yang berbeda (lihat Gambar 3.7). Besar butir yang digunakan adalah rata-rata dari besar butir pada tiga arah yang berbeda dalam satu sampel. Berikut ini adalah rumus dan perhitungan yang digunakan dalam pengujian besar butir metode planimetri.

Rumus Planimetri^[16] :

$$N_A = (f) \left(n_1 + \frac{n_2}{2} \right) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$f = \frac{M^2}{5000} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$G = [3,322 \log(N_A) - 2,95] \dots\dots\dots (3.3)$$

G = nomor ASTM

n₁ = jumlah butir dalam lingkaran

N_A = jumlah butir/mm²

n₂ = jumlah butir yang terpotong lingkaran

f = bilangan Jeffries

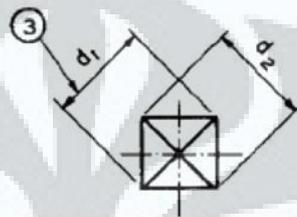
M = perbesaran mikroskop yang digunakan

Selanjutnya untuk menentukan diameter besar butir dilakukan dengan mencocokkan nomor G yang didapat dalam perhitungan dengan tabel besar butir standar pada ASTM E112.

3.4.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian nilai kekerasan menggunakan standar ASTM E92 yaitu metode pengujian kekerasan Vickers. 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 yang dapat dihitung panjang diagonal-diagonalnya (lihat Gambar 3.13). Panjang diagonal jejak yang dihasilkan selama

proses penjejakan dapat dihitung dengan menggunakan skala penghitung yang terdapat pada mikroskop mesin uji kekerasan Vickers. Gambar 3.14. merupakan gambar mesin uji kekerasan Vickers yang digunakan selama penelitian. Setelah panjang diagonal-diagonalnya diketahui maka nilai kekerasan dari sampel dapat diketahui dengan menggunakan rumus kekerasan Vickers. Hasil kekerasan Vickers yang didapat kemudian dikonversikan ke nilai kekerasan Brinell dengan menggunakan tabel konversi pada ASTM E140.



Gambar 3.13. Ilustrasi Jejak yang dihasilkan Selama Penjejakan^[17]

Rumus kekerasan Vickers^[17]:

$$VHN = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

VHN = satuan kekerasan Vickers α = sudut piramida (136°)

P = beban (kgf) d = panjang diagonal penjejakan (mm)



Gambar 3.14. Mesin Uji Kekerasan Vickers

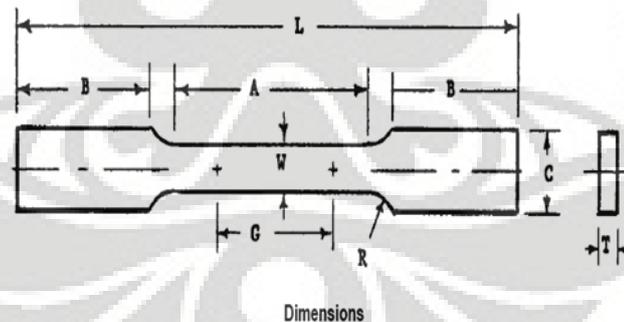
3.4.5 Pengujian Tarik

Dalam penelitian ini dilakukan 2 jenis pengujian tarik yaitu pengujian tarik standar untuk mengetahui nilai UTS dan nilai n, dan pengujian tarik untuk mengetahui nilai r dan Δr . Pengujian tarik standar untuk mengetahui nilai UTS

dan nilai n menggunakan standar ASTM E8 dan ASTM E646, sedangkan pengujian tarik untuk mengetahui nilai r dan Δr menggunakan standar ASTM E517. Pengujian tarik dalam penelitian ini menggunakan mesin uji tarik Servopulser Shimadzu yang tampak pada Gambar 3.15. Pengujian tarik ini digunakan 3 arah lembaran yaitu arah 0° atau paralel dari arah canai, 45° atau diagonal dari arah canai, dan 90° atau transversal dari arah canai. Tujuan pengambilan 3 arah ini adalah untuk mengetahui anisotropi pada lembaran kuningan. Contoh bentuk dan ukuran sampel uji tarik dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Gambar 3.15. Mesin Uji Tarik



		Specimen A			
		Standard		Alternative	
		in.	mm	in.	mm
G	Gage length	2.00 ± 0.01	50 ± 0.25	1.00 ± 0.005	25 ± 0.13
W	Width (Note 2 and Note 3)	0.500 ± 0.01	12.5 ± 0.25	0.500 ± 0.01	12.5 ± 0.025
T	Thickness	thickness of material			
R	Radius of fillet, min	$\frac{1}{2}$	13	$\frac{1}{2}$	13
L	Overall length, min	8	200	$7\frac{1}{4}$	180
A	Length of reduced section, min	3	75	$2\frac{1}{4}$	60
B	Length of grip section, min	2	50	2	50
C	Width of grip section, approximate	$\frac{3}{4}$	20	$\frac{3}{4}$	20

Gambar 3.16. Contoh Bentuk dan Dimensi Sampel Uji Tarik^[18]

Berbeda seperti halnya pengujian tarik standar yang dilakukan hingga sampel mengalami perpatahan, dalam pengujian tarik untuk mencari nilai r hanya dilakukan sampai sampel mengalami perpanjangan 10-20% dari panjang awal. Dalam penelitian ini sampel ditarik hingga mengalami perpajangan 20% dari panjang awal.

Untuk menghitung nilai UTS dan nilai n dapat dengan menggunakan rumus^[19] :

$$\sigma_{UTS} = \frac{F_{max}}{A_0} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\sigma = k\varepsilon^n \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\log \sigma_t = \log k + n \log \varepsilon_t \dots\dots\dots (3.7)$$

$$n = \frac{n_0 + 2n_{45} + n_{90}}{4} \dots\dots\dots (3.8)$$

Untuk menghitung nilai r dan Δr dapat dengan menggunakan rumus^[20]:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln(w_0/w_t)}{\ln(t_0/t_t)} \dots\dots\dots (3.9)$$

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \dots\dots\dots (3.10)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \dots\dots\dots (3.11)$$

Gambar 3.17 merupakan bentuk sampel uji tarik pelat kuningan yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3.17. Bentuk Sampel Uji Tarik

3.4.6 Pengujian Difraksi Sinar X

Pengujian difraksi sinar X atau XRD bertujuan untuk mengetahui kecenderungan tekstur atau arah orientasi kristal pada material. Pengujian ini menggunakan mesin XRD yang akan menembakkan sinar X ke arah sampel.

Sampel yang digunakan adalah sampel hasil canai dingin sebelum dianil dan sampel anil kondisi optimum. Sampel sebelumnya harus dipreparasi sama seperti persiapan sampel pada pengujian struktur mikro.

Ketika ditembakkan dengan sinar X maka bidang-bidang kristalografi pada sampel akan memantulkan dan menghamburkan sinar X. Hamburan sinar X itu kemudian akan ditangkap oleh suatu alat perekam yang tersambung ke komputer. Dari komputer tersebut kemudian didapatkan hasil pola difraksi dari sampel. Puncak (*peak*) tertinggi pada pola difraksi tersebut menunjukkan intensitas tertinggi pada bidang-bidang kristalografi. Bidang-bidang kristalografi dengan intensitas tertinggi tersebut merupakan bidang dan orientasi pilihan dari kristal. Dengan demikian melalui pengujian XRD ini dapat diketahui kecenderungan tekstur dari sampel.

3.4.7 Pengujian Kekasaran Permukaan

Pengujian kekasaran permukaan bertujuan untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan dari sebuah material. Pengujian kekasaran permukaan menggunakan mesin uji kekasaran permukaan yang tampak pada Gambar 3.18. Sampel yang digunakan dalam pengujian ini adalah sampel kuningan hasil canai dingin sebelum dianil dan sampel anil kondisi optimum.



Gambar 3.18. Mesin Uji Kekasaran Permukaan

Sampel yang akan diuji tidak dilakukan preparasi atau persiapan hanya diletakkan pada mesin. Hal tersebut dikarenakan jika dilakukan preparasi maka nilai kekasaran permukaan pada sampel akan berubah. Persiapan peralatannya yaitu dengan menghidupkan pompa vakum dan meja anti getaran kemudian komputer dinyalakan. Peralatan ini menggunakan mikroskop optik sehingga tidak

diperbolehkan menyentuh sampel selama pengujian. Hal yang harus diperhatikan dalam pengujian ini adalah mendapatkan fokus lensa yang sesuai dengan mengatur tinggi rendah posisi sampel. Setelah fokus lensa sesuai maka sampel dapat diuji.

Ketika sampel telah selesai diuji maka akan didapatkan data penampakan hasil kekasaran permukaan dalam bentuk 2 dimensi dan profil kekasaran permukaan. Melalui hasil dalam bentuk profil kekasaran permukaan dapat dihitung nilai kekasaran permukaannya.

3.4.8 Pengujian Fraktografi Hasil Uji Tarik

Tujuan dari pengujian fraktografi adalah untuk mengetahui bentuk perpatahan dari sampel pelat kuningan. Pengujian fraktografi menggunakan mikroskop elektron atau *Scanning Electron Microscope / SEM*. Sampel yang digunakan dalam pengujian ini adalah sampel hasil perpatahan pengujian tarik pada setiap arah dengan terlebih dahulu dipotong, di-*mounting*, dan di-*coating* (Gambar 3.19).



Gambar 3.19. Sampel Permukaan Patahan Hasil Uji Tarik

Sampel yang telah dipreparasi kemudian akan dimasukkan ke dalam mesin SEM yang akan menembakan sinar X pada sampel. Sebagian sinar akan dipantulkan oleh sampel dan sebagian lagi akan diteruskan menembus sampel. Sinar yang dipantulkan akan ditangkap oleh suatu alat yang tersambung dengan layar komputer. Melalui layar komputer akan terlihat jenis perpatahan pada permukaan sampel dan kemudian difoto.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Berdasarkan pengujian komposisi kimia yang dilakukan terhadap sampel kuningan 70/30 hasil proses canai dingin didapatkan hasil sebagai berikut (Tabel 4.1).

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Unsur	Sampel (% berat)	Standar Industri (% berat)
Cu	69,758	69,5-72
Zn	30,054	<i>Remainder</i>
Al	0,006	Maks. 0,03
Fe	0,057	Maks. 0,05
Ni	0,089	Maks. 0,20
Sn	0,016	Maks. 0,03
Pb	0,009	Maks. 0,05
P	0,001	---
Si	---	---
Mn	---	---
S	0,002	---
Sb	0,005	Maks. 0,01
Mg	0,0003	---
As	---	Maks. 0,02
Bi	---	Maks. 0,04

Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa kuningan 70/30 hasil canai dingin yang digunakan dalam penelitian ini telah sesuai dengan standar komposisi kimia yang ditetapkan oleh industri pelat kuningan. Kuningan dengan komposisi kimia yang standar tersebut sangat sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan nilai mampu tarik (*drawability*) yang tinggi.

Kuningan 70/30 memiliki unsur utama yang terdiri dari tembaga (Cu) dan seng (Zn). Kuningan merupakan tembaga yang dipadukan dengan seng (Zn). Keberadaan atom Zn ini akan menjadi atom pengganti (*substitutional atom*) dalam susunan atom Cu. Atom Zn memiliki jari-jari atom sebesar 0,133 nm, sedangkan atom Cu memiliki jari-jari atom sebesar 0,128 nm. Jika Zn dipadukan dengan Cu maka atom Zn akan menjadi atom pengganti dalam susunan atom Cu karena atom

Zn memiliki jari-jari yang hampir sama besar dengan jari-jari atom Cu. Atom Zn yang bertindak sebagai atom pengganti (*substitutional atom*) tersebut akan menghalangi dan menghambat pergerakan dislokasi. Pergerakan dislokasi yang terhambat akan menyebabkan material mengalami peningkatan nilai kekerasan dan nilai kekuatan. Dengan demikian peningkatan kadar Zn dalam paduan CuZn akan meningkatkan nilai kekuatan dan nilai kekerasan^[1].

Keberadaan unsur Zn dalam kuningan juga akan mempengaruhi terbentuknya fasa β . Fasa β merupakan fasa dengan struktur *Body Centered Cubic* (BCC) sehingga keberadaan fasa β dalam kuningan akan meningkatkan kekerasan dan kekuatan. Kuningan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kadar Zn sebesar 30,054 %. Dengan demikian fasa yang terbentuk pada kuningan 70/30 tersebut adalah fasa α tanpa adanya fasa β . Hal tersebut sesuai dengan diagram fasa CuZn dimana kelarutan maksimum Zn untuk membentuk fasa α adalah 39 % pada temperatur 453°C. Fasa β baru mulai akan terbentuk jika kandungan Zn pada kuningan lebih dari 39 %^[2].

Selain unsur Zn, di dalam kuningan juga terdapat unsur minor atau *impurities* lainnya seperti timbal (Pb), besi (Fe), fosfor (P), dan sebagainya. Setiap unsur minor tersebut memiliki efek atau pengaruh yang signifikan terhadap sifat fisik dan sifat mekanis kuningan. Unsur Pb dalam kuningan akan meningkatkan sifat mampumesin (*machinability*), unsur Fe akan meningkatkan kekuatan, kekerasan, dan meningkatkan sifat magnetik, sedangkan unsur P dapat mengendalikan pertumbuhan butir, meningkatkan kekuatan, namun akan menurunkan keuletan^[2]. Kadar unsur minor dalam kuningan 70/30 yang digunakan dalam penelitian ini sesuai dengan standar kuningan 70/30 yang digunakan dalam industri. Hanya unsur Fe sebesar 0,057 % yang melebihi standar industri yaitu maksimum 0,05 %. Namun perbedaan yang sedikit tersebut tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat fisik maupun sifat mekanis pelat kuningan 70/30.

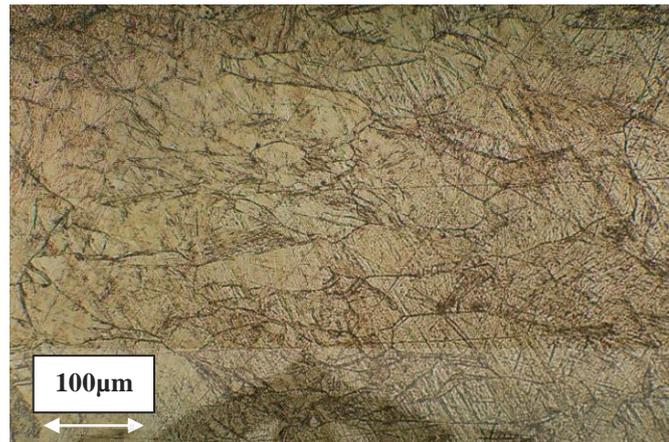
4.2 Pengujian Struktur Mikro

Struktur mikro dari suatu material sangat mempengaruhi sifat material tersebut dalam proses pengubahan bentuk (*forming*). Struktur mikro memiliki beberapa karakteristik diantaranya, fasa yang terbentuk, bentuk butir, dan ukuran butir. Perbedaan fasa yang terbentuk akan mempengaruhi sifat mekanis dari material. Hal tersebut dikarenakan struktur kristal dari fasa memiliki sifat-sifat yang berbeda. Dalam kuningan terdapat 3 fasa penting yaitu fasa α , fasa β , dan fasa γ . Namun fasa yang terbentuk pada kuningan 70/30 yang digunakan dalam penelitian ini hanya fasa α .

Bentuk dan ukuran butir juga dapat mempengaruhi sifat mekanis dari material. Material dengan bentuk butir pipih atau memanjang sebagai hasil dari proses pengubahan bentuk (misalkan proses canai) memiliki nilai kekuatan lebih tinggi dibandingkan dengan material dengan bentuk butir bulat. Hal tersebut dikarenakan butir pipih hasil proses pengubahan bentuk memiliki tegangan sisa (*residual stress*) yang dapat meningkatkan kekuatan namun akan menurunkan keuletan.

Material dengan ukuran butir yang kecil juga memiliki nilai kekuatan lebih tinggi dibandingkan dengan material dengan ukuran butir yang besar. Hal tersebut dikarenakan butir merupakan tempat bergeraknya dislokasi sehingga jika butir kecil maka dislokasi akan mudah terhambat oleh batas butir. Terhambatnya dislokasi akan menyebabkan material menjadi lebih kuat.

Perubahan bentuk dan ukuran butir dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya adalah melalui proses perlakuan panas anil (*annealing*). Hasil penelitian dan pengujian struktur mikro yang meliputi perubahan bentuk dan ukuran butir setelah proses anil rekristalisasi dapat dilihat secara lengkap pada pembahasan di bawah ini.



Gambar 4.1. Struktur Mikro Setelah Canai Dingin Posisi Permukaan.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3



Gambar 4.2. Struktur Mikro Setelah Canai Dingin Posisi Memanjang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3



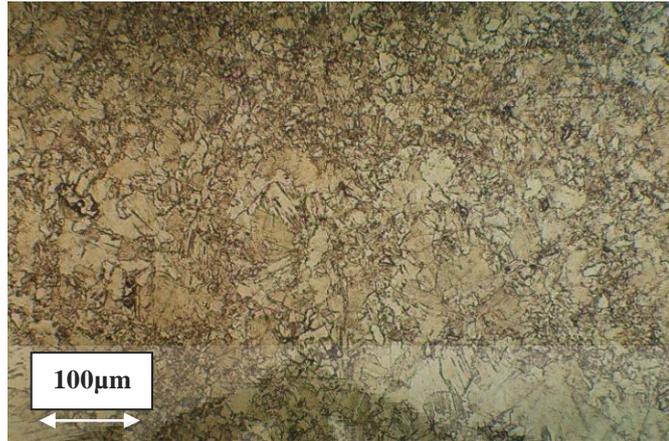
Gambar 4.3. Struktur Mikro Setelah Canai Dingin Posisi Melintang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

Struktur mikro dari pelat kuningan 70/30 kondisi setelah canai dingin menunjukkan butir-butir dengan bentuk yang pipih dan memanjang. Pada posisi permukaan (Gambar 4.1) terlihat butir yang pipih dan besar, pada posisi memanjang (Gambar 4.2) terlihat butir yang pipih, tipis, dan panjang, sedangkan pada posisi melintang (Gambar 4.3) terlihat butir yang bulat-bulat, dan panjang.

Kondisi butir sampel kuningan 70/30 setelah mengalami proses canai dingin berbentuk pipih dan memanjang. Bentuk butir yang awalnya bulat menjadi panjang dan pipih selama proses canai. Hal tersebut disebabkan oleh beban tekan (*compressive*) yang diterima oleh material selama proses canai dengan reduksi ketebalan total sebesar 94 %. Nilai reduksi total yang sangat tinggi tersebut akan menjadikan material menjadi sangat tipis dan memiliki butir yang sangat pipih.

Butir yang pipih dan panjang tersebut memiliki tegangan sisa (*residual stress*) yang timbul saat proses canai. Tegangan sisa pada butir pipih tersebut berada di batas butir. Keberadaan tegangan sisa pada butir akan menghambat pergerakan dislokasi sehingga akan menyebabkan material menjadi lebih kuat dan lebih keras, namun keuletan (*ductility*) akan menurun. Jika material dengan kondisi butir pipih dan panjang dilakukan proses perubahan bentuk (*forming*) maka akan cenderung terjadi retak atau kegagalan pada material karena tegangan sisa dari proses canai dingin atau pengerjaan dingin masih sangat tinggi. Tegangan sisa yang tinggi tersebut dapat dikurangi atau dihilangkan dengan melakukan perlakuan panas seperti pemanasan anil (*annealing*).

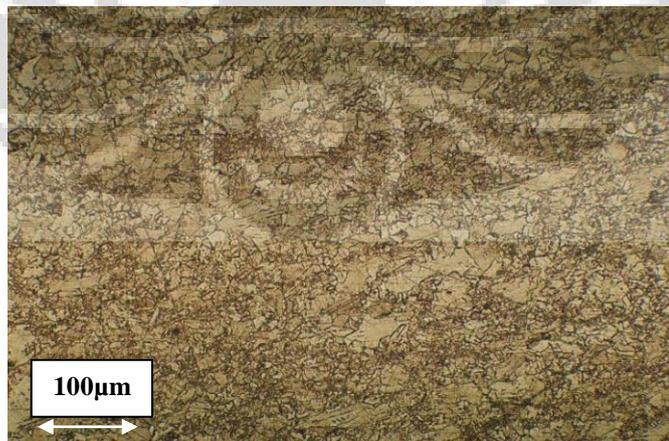
Material dengan butir yang pipih memiliki sifat mampu bentuk (*formability*) yang buruk dikarenakan tegangan sisa yang terdapat pada material masih sangat tinggi. Hal tersebut akan menjadikan material menjadi lebih kuat, keras, namun menjadi getas (*brittle*) dan keuletan menurun. Dalam proses perubahan bentuk umumnya dibutuhkan material dengan sifat keuletan yang tinggi.



Gambar 4.4. Struktur Mikro Setelah Anil 500°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Permukaan.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3



Gambar 4.5. Struktur Mikro Setelah Anil 500°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Memanjang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

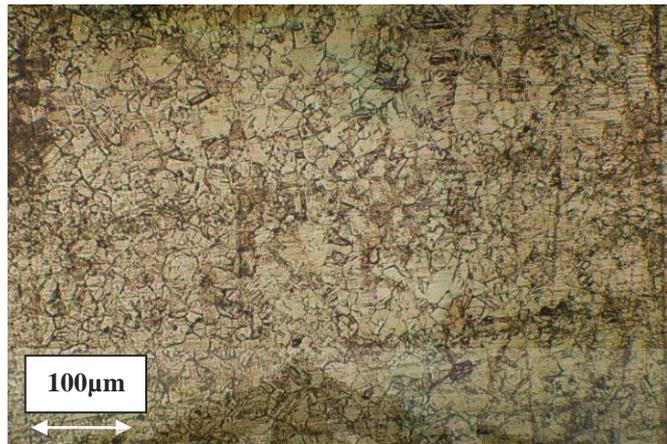


Gambar 4.6. Struktur Mikro Setelah Anil 500°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Melintang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

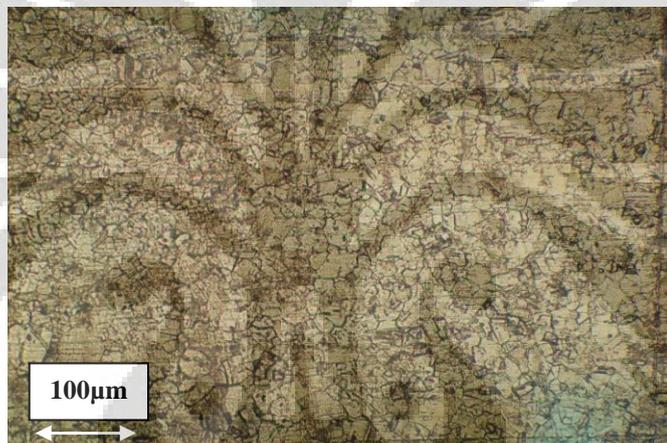
Setelah proses anil dengan temperatur 500°C selama waktu tahan 3 menit, struktur mikro dari pelat kuningan 70/30 menunjukkan terjadinya perubahan butir-butir menjadi kecil dan bulat. Perubahan butir ini merupakan awal dari proses rekristalisasi. Pada posisi permukaan (Gambar 4.4) terlihat butir yang kecil dan bulat namun hanya sebagian yang mengalami rekristalisasi. Terlihat pada beberapa bagian masih terdapat butir-butir yang pipih dan panjang. Pada posisi memanjang (Gambar 4.5) tidak jauh berbeda dengan butir posisi permukaan, terlihat butir yang kecil dan bulat namun pada beberapa bagian masih terdapat butir yang pipih dan panjang. Pada posisi melintang (Gambar 4.6) juga terlihat butir kecil dan bulat yang menandakan adanya proses rekristalisasi namun tidak sempurna karena masih terdapat butir yang pipih dan panjang pada beberapa bagian.

Dalam proses anil dengan temperatur 500°C selama 3 menit, butir-butir kuningan 70/30 belum terekristalisasi secara sempurna. Hal tersebut disebabkan oleh waktu tahan anil yang kurang sehingga tidak semua butir mengalami rekristalisasi. Hanya sebagian butir yang memiliki energi dan regangan yang tinggi pada batas butirnya yang mengalami pengintian dan akhirnya mengalami rekristalisasi. Untuk mendapatkan butir-butir yang terekristalisasi sempurna dengan temperatur rendah (500°C) maka dibutuhkan waktu tahan yang lebih lama sehingga semua butir-butir akan mengalami rekristalisasi secara sempurna. Proses pengintian dipengaruhi oleh derajat deformasi dan energi yang diberikan. Sehingga semakin tinggi regangan yang diberikan maka semakin banyak pengintian yang muncul dan akan tumbuh butir-butir baru yang kecil pada pada butirnya. Semakin tinggi energi yang diterima oleh material juga akan menyebabkan laju pengintian semakin tinggi sehingga laju tumbuhnya butir-butir baru pada batas butir juga semakin tinggi^[13].

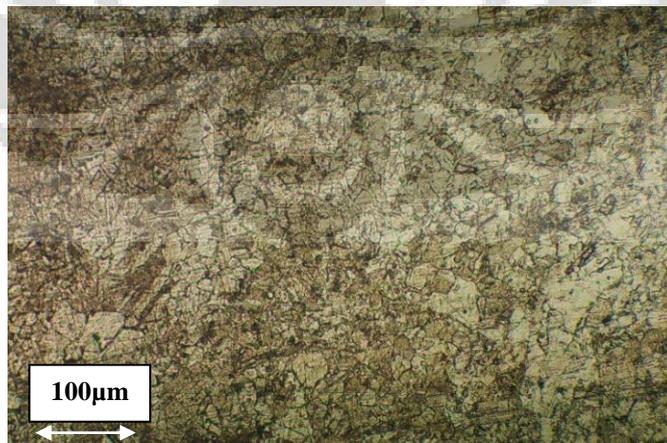
Sifat mampu bentuk dari material ini kurang baik. Hal tersebut dikarenakan hanya pada beberapa bagian saja butir mengalami rekristalisasi sedangkan pada bagian lainnya butir masih belum terekristalisasi sehingga masih memiliki tegangan sisa yang akan membuat sifat mampu bentuk material menjadi kurang baik.



Gambar 4.7. Struktur Mikro Setelah Anil 600°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Permukaan.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3



Gambar 4.8. Struktur Mikro Setelah Anil 600°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Memanjang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

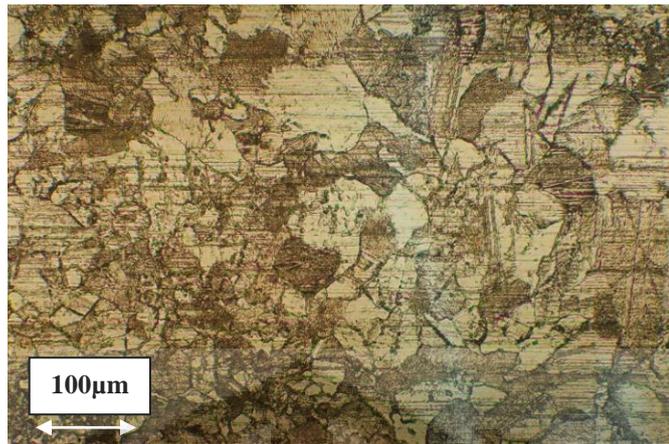


Gambar 4.9. Struktur Mikro Setelah Anil 600°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Melintang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

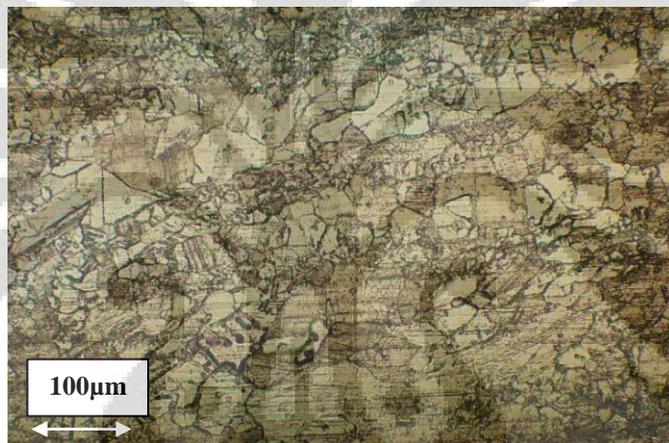
Struktur mikro dari pelat kuningan 70/30 kondisi setelah proses anil dengan temperatur 600°C selama waktu tahan 3 menit menunjukkan terjadinya perubahan butir-butir menjadi bulat-bulat dan seragam. Perubahan butir ini merupakan tanda bahwa telah terjadi rekristalisasi secara sempurna. Pada posisi permukaan (Gambar 4.7) terlihat butir yang bulat-bulat kecil dan seragam. Hal tersebut menunjukkan telah terjadi rekristalisasi sempurna pada material. Pada posisi memanjang (Gambar 4.8) juga terlihat butir yang kecil dan bulat pada semua bagian. Pada posisi melintang (Gambar 4.9) terlihat butir kecil, bulat dan seragam yang menandakan adanya proses rekristalisasi sempurna.

Butir-butir kuningan 70/30 telah mengalami proses rekristalisasi dengan sempurna dalam kondisi proses anil dengan temperatur 600°C selama 3 menit. Hal ini ditandai dengan struktur mikro yang memiliki butir-butir yang kecil, bulat dan seragam pada semua bagian. Butir-butir dalam kondisi ini merupakan butir-butir baru yang muncul dan tumbuh dari proses pengintian pada batas butir. Proses pengintian yang muncul pada batas butir selanjutnya akan mengalami pertumbuhan butir baru yang kecil. Butir baru tersebut akan tumbuh dan menggantikan butir-butir lama yang pipih setelah proses canai. Dalam kondisi ini energi yang diberikan cukup dan sempurna sehingga semua butir mengalami rekristalisasi. Butir-butir rekristalisasi ini merupakan butir yang bebas dari regangan. Hal tersebut dikarenakan energi termal yang diberikan mampu mendorong untuk terjadinya pengintian dan mampu menghilangkan energi regangan (tegangan sisa) yang masih tersimpan pada batas butir^[13]. Dengan demikian dapat diambil kesimpulan bahwa kondisi ini merupakan kondisi anil optimum karena butir telah mengalami rekristalisasi dengan sempurna.

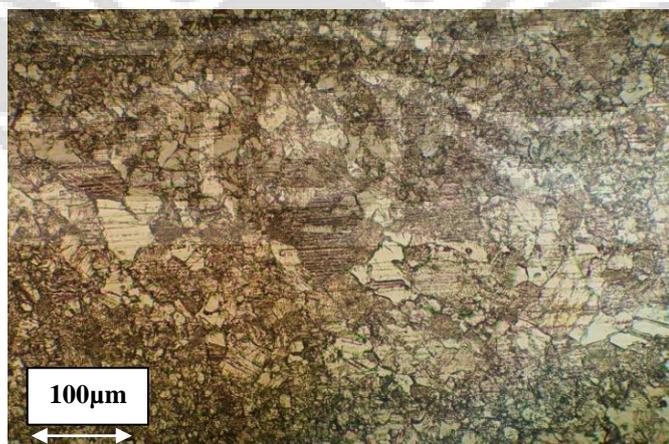
Material dengan butir yang bulat dan seragam ini memiliki sifat mampu bentuk yang baik. Hal tersebut dikarenakan semua butir telah mengalami rekristalisasi secara sempurna dan terbebas dari tegangan sisa sehingga ketika dalam proses pengubahan bentuk selanjutnya material tidak mengalami kegagalan.



Gambar 4.10. Struktur Mikro Setelah Anil 700°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Permukaan.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3



Gambar 4.11. Struktur Mikro Setelah Anil 700°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Memanjang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

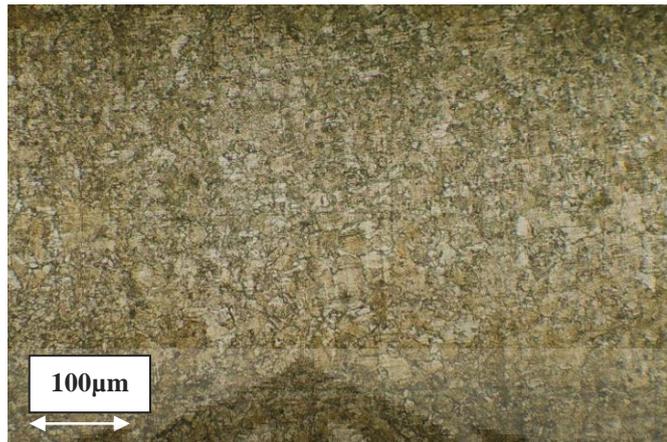


Gambar 4.12. Struktur Mikro Setelah Anil 700°C Waktu Tahan 3 Menit Posisi Melintang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

Dalam kondisi setelah proses anil dengan temperatur 700°C selama waktu tahan 3 menit terjadi perubahan butir-butir menjadi bulat dan besar pada sebagian tempat pada pelat kuningan 70/30. Perubahan butir ini merupakan tanda bahwa telah terjadi pertumbuhan butir (*grain growth*) pada beberapa tempat. Pada posisi permukaan (Gambar 4.10) terlihat butir yang bulat-bulat dan besar pada beberapa bagian namun pada bagian lain masih terdapat butir-butir yang bulat dan kecil. Hal tersebut menunjukkan telah terjadi proses pertumbuhan butir (*grain growth*). Pada posisi memanjang (Gambar 4.11) juga terlihat butir bulat dan besar. Selain itu juga terlihat adanya kembaran (*twinning*) pada beberapa bagian. Fenomena kembaran tersebut terjadi mekanisme luncur (*slip*) akibat pergerakan butir. Pada posisi melintang (Gambar 4.12) terlihat butir yang bulat-bulat dan besar sebagai tanda bahwa telah terjadi tahapan pertumbuhan butir.

Pada proses anil dengan temperatur 700°C selama 3 menit, butir-butir kuningan 70/30 telah mengalami tahapan pertumbuhan butir (*grain growth*) pada beberapa bagian. Ketika suatu material diberikan energi termal yang besar (temperatur yang tinggi) maka laju rekristalisasi akan semakin cepat dan mempercepat pertumbuhan butir. Pertumbuhan butir ini ditandai dengan membesarnya ukuran butir-butir rekristalisasi sebagai akibat dari pemberian energi termal yang tinggi^[13]. Fenomena kembaran (*twinning*) terjadi akibat adanya pergerakan atom-atom pada suatu bidang luncur (*slip plane*). Pergerakan atom itu akan menyebabkan butir-butir mengalami mekanisme luncur (*slip*) sehingga membentuk suatu cerminan butir yang sama seperti butir sebelahnya (kembaran)^[13].

Pelat kuningan 70/30 setelah pemanasan anil dengan temperatur 700°C selama 3 menit memiliki sifat mampu bentuk yang kurang baik. Hal tersebut dikarenakan pertumbuhan butir akan menghasilkan butir-butir yang besar. Butir-butir yang besar tersebut akan menurunkan sifat mekanis seperti kekerasan dan kekuatan dari suatu material. Hal ini sesuai dengan persamaan *Hall-Petch* dimana ukuran butir yang semakin besar akan menurunkan nilai kekuatan^[3].



Gambar 4.13. Struktur Mikro Setelah Anil 2 Menit Temperatur 600°C Posisi Permukaan.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3



Gambar 4.14. Struktur Mikro Setelah Anil 2 Menit Temperatur 600°C Posisi Memanjang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

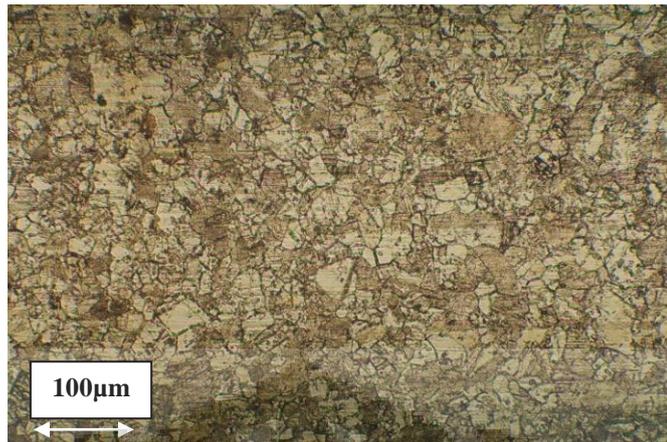


Gambar 4.15. Struktur Mikro Setelah Anil 2 Menit Temperatur 600°C Posisi Melintang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

Struktur mikro dari pelat kuningan 70/30 kondisi setelah proses anil selama 2 menit dengan temperatur 600°C menunjukkan terjadinya perubahan menjadi butir-butir yang kecil dan bulat pada beberapa tempat. Perubahan butir ini menunjukkan adanya awal dari proses rekristalisasi dimana mulai tumbuh butir-butir baru yang kecil sebagai akibat dari proses pengintian pada batas butir. Tahapan ini merupakan tahapan selanjutnya setelah proses *recovery* atau penghilangan tegangan sisa. Pada posisi permukaan (Gambar 4.13) terlihat butir yang bulat dan kecil-kecil yang tersebar pada beberapa tempat. Pada posisi memanjang (Gambar 4.14) juga terlihat butir bulat dan kecil. Pada posisi melintang (Gambar 4.15) juga hampir sama seperti 2 posisi lainnya yaitu terlihat butir yang bulat-bulat dan kecil sebagai tanda bahwa telah terjadi tahapan pengintian atau pembentukan *nuclei*.

Dalam kondisi proses anil selama 2 menit dengan temperatur 600°C , butir-butir kuningan 70/30 telah mengalami tahapan rekristalisasi namun belum sempurna. Hal tersebut ditandai dengan munculnya butir-butir baru yang bulat dan kecil-kecil hanya pada beberapa tempat, sedangkan pada tempat lain masih terdapat butir-butir pipih dan panjang akibat adanya proses deformasi canai. Waktu anil yang diberikan masih belum cukup untuk membuat semua butir sempurna terekristalisasi. Semakin lama waktu anil maka kesempatan butir untuk mengalami rekristalisasi akan semakin besar^[13].

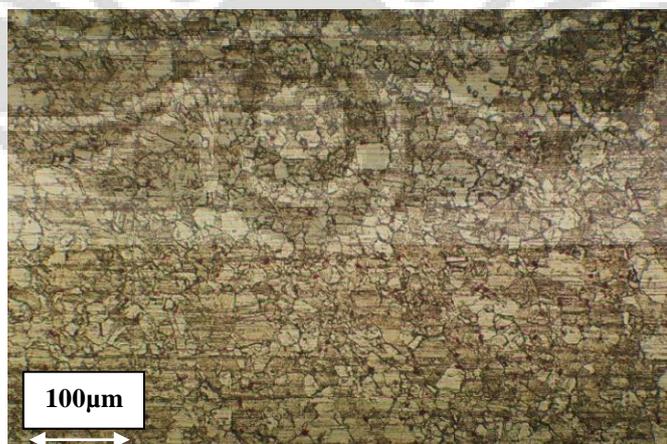
Pelat kuningan 70/30 dengan butir yang hanya terekristalisasi sebagian atau tidak sempurna ini memiliki sifat mampu bentuk yang kurang baik. Hal tersebut dikarenakan hanya pada beberapa bagian saja butir mengalami rekristalisasi sedangkan pada bagian lainnya butir masih belum terekristalisasi sehingga masih memiliki tegangan sisa yang akan membuat sifat mampu bentuk material menjadi kurang baik.



Gambar 4.16. Struktur Mikro Setelah Anil 3 Menit Temperatur 600°C Posisi Permukaan.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3



Gambar 4.17. Struktur Mikro Setelah Anil 3 Menit Temperatur 600°C Posisi Memanjang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3



Gambar 4.18. Struktur Mikro Setelah Anil 3 Menit Temperatur 600°C Posisi Melintang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl_3

Setelah proses anil selama 3 menit dengan temperatur 600°C, struktur mikro dari pelat kuningan 70/30 mengalami perubahan butir-butir yang awalnya pipih menjadi bulat dan seragam pada semua bagian. Perubahan butir ini merupakan tanda bahwa telah terjadi rekristalisasi sempurna. Pada posisi permukaan (Gambar 4.16) terlihat butir yang bulat-bulat dan seragam. Pada posisi memanjang (Gambar 4.17) juga terlihat butir yang bulat pada semua bagian. Pada posisi melintang (Gambar 4.18) terlihat butir bulat dan seragam yang menandakan proses rekristalisasi telah berjalan sempurna.

Proses anil dengan temperatur 600°C selama 3 menit menghasilkan butir-butir yang telah mengalami proses rekristalisasi dengan sempurna. Hal ini ditandai dengan struktur mikro yang memiliki butir-butir yang bulat dan seragam pada semua bagian. Butir-butir dalam kondisi ini merupakan butir-butir baru yang muncul pada batas butir dan mengalami rekristalisasi. Butir baru tersebut akan tumbuh dan mengalami rekristalisasi menggantikan butir-butir lama yang pipih setelah proses canai. Dalam kondisi ini energi yang diberikan cukup dan sempurna sehingga semua butir mengalami rekristalisasi. Butir-butir rekristalisasi ini merupakan butir yang bebas dari regangan. Hal tersebut dikarenakan energi termal yang diberikan mampu mendorong untuk terjadinya pengintian dan mampu menghilangkan energi regangan (tegangan sisa) yang masih tersimpan pada batas butir^[13]

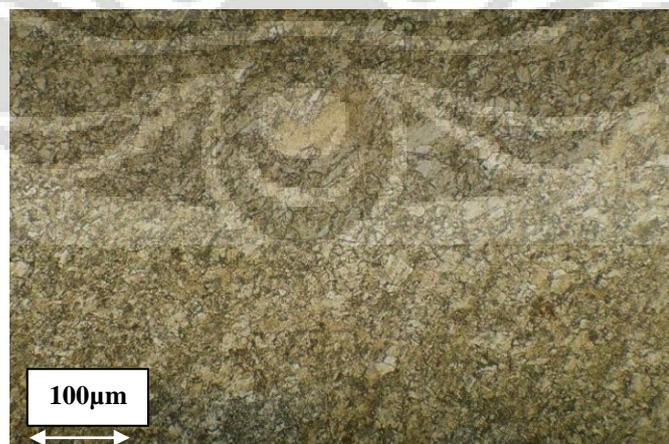
Kuningan 70/30 dengan butir yang bulat dan seragam ini memiliki sifat mampu bentuk yang baik. Hal tersebut dikarenakan semua butir telah mengalami rekristalisasi secara sempurna dan terbebas dari tegangan sisa sehingga sifat mekanis dari material akan meningkat. Sifat mekanis material yang baik ini akan menjadikan material memiliki sifat mampu bentuk (*formability*) yang baik.



Gambar 4.19. Struktur Mikro Setelah Anil 4 Menit Temperatur 600°C Posisi Permukaan.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl₃



Gambar 4.20. Struktur Mikro Setelah Anil 4 Menit Temperatur 600°C Posisi Memanjang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl₃



Gambar 4.21. Struktur Mikro Setelah Anil 4 Menit Temperatur 600°C Posisi Melintang.
Perbesaran 200x, Etsa FeCl₃

Struktur mikro dari pelat kuningan 70/30 kondisi setelah proses anil selama 4 menit dengan temperatur 600°C menunjukkan terjadinya perubahan butir-butir menjadi bulat dan berukuran besar pada beberapa bagian. Perubahan butir ini merupakan tanda bahwa telah terjadi pertumbuhan butir (*grain growth*) pada beberapa butir. Pada posisi permukaan (Gambar 4.19) terlihat butir yang bulat-bulat dan terdapat beberapa butir yang telah membesar (tumbuh). Pada posisi memanjang (Gambar 4.20) juga terlihat butir yang bulat namun tidak seragam dalam ukuran. Pada posisi melintang (Gambar 4.21) terlihat butir bulat dan beberapa butir telah membesar atau mengalami pertumbuhan.

Dalam kondisi proses anil selama 4 menit dengan temperatur 600°C , butir-butir kuningan 70/30 telah mengalami tahapan rekristalisasi dan beberapa butir mengalami pertumbuhan (*grain growth*). Hal tersebut ditandai dengan munculnya butir-butir baru yang poligon dan pada beberapa tempat butir telah membesar atau mengalami pertumbuhan. Waktu anil yang diberikan terlalu lama sehingga menyebabkan butir yang telah mengalami rekristalisasi menjadi semakin besar dan tumbuh. Hal ini sesuai dengan literatur dimana jika waktu anil yang diberikan terlalu lama maka laju pertumbuhan butir akan semakin besar sehingga dihasilkan butir-butir dengan ukuran yang besar^[13].

Material dengan butir yang telah mengalami proses pertumbuhan butir ini memiliki sifat mampu bentuk yang kurang baik. Hal ini dikarenakan pertumbuhan butir akan menghasilkan butir-butir yang besar menyebabkan pergerakan dislokasi tidak terhambat sehingga sifat mekanis yang meliputi kekerasan dan kekuatan akan menurun. Pernyataan ini sesuai dengan literatur yang dapat dibuktikan melalui persamaan *Hall-Petch* dimana semakin besar ukuran butir maka kekuatan dari sebuah material akan menurun^[3].

4.3 Pengujian Besar Butir

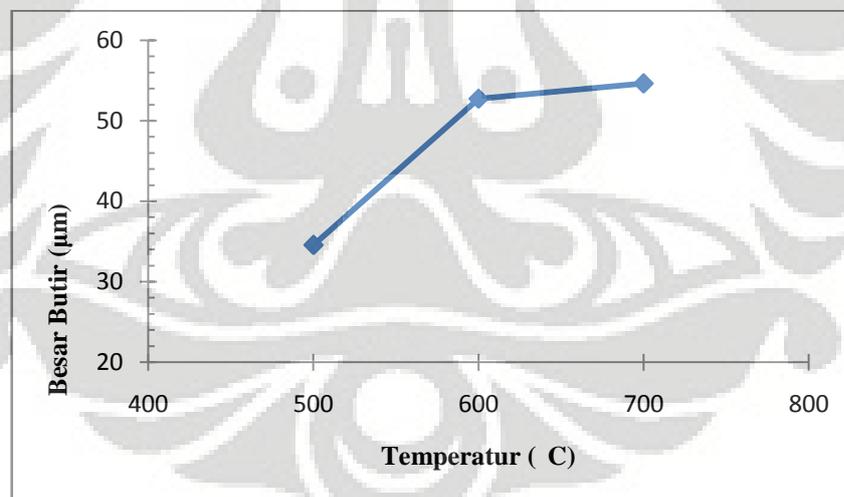
Berdasarkan pengujian besar butir yang dilakukan pada semua hasil foto mikro didapatkan hasil yang tercantum dalam Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2. Hasil Pengujian Besar Butir

No.	Kondisi Sampel	Besar Butir Sampel (μm)	Besar Butir Standar Industri (μm)
1.	Canai dingin	$63,18 \pm 4,10$	30 - 70
2.	Anil temperatur 500°C selama 3 menit	$34,56 \pm 1,41$	
3.	Anil temperatur 600°C selama 3 menit	$52,73 \pm 0,86$	
4.	Anil temperatur 700°C selama 3 menit	$54,61 \pm 3,85$	
5.	Anil selama 2 menit temperatur 600°C	$50,52 \pm 3,35$	
6.	Anil selama 3 menit temperatur 600°C	$52,21 \pm 1,03$	
7.	Anil selama 4 menit temperatur 600°C	$52,8 \pm 1,05$	

4.3.1 Pengaruh Temperatur Anil terhadap Besar Butir

Hubungan antara temperatur anil dengan besar butir pelat kuningan 70/30 dapat digambarkan pada Gambar 4.22. di bawah ini.



Gambar 4.22. Grafik Hubungan antara Temperatur Anil dengan Besar Butir

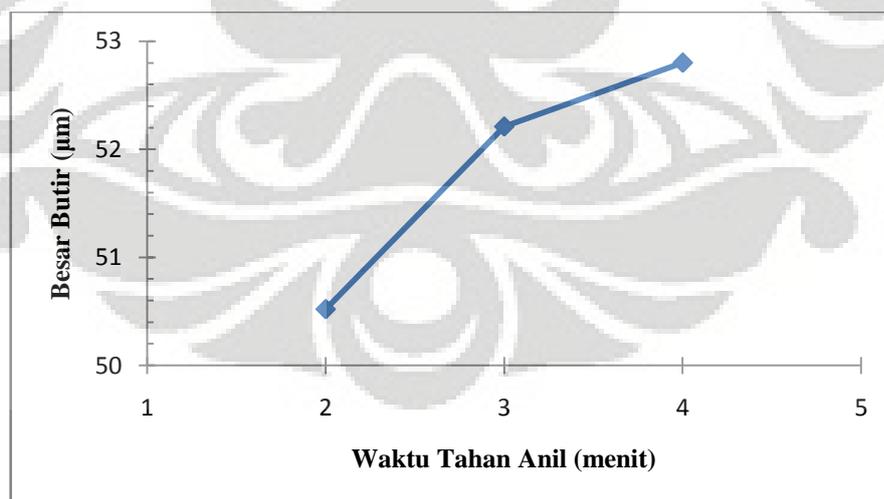
Besar butir yang didapat dari pengujian yang dilakukan pada berbagai sampel yang telah dianil dengan temperatur beragam dan waktu tahan selama 3 menit menunjukkan hasil sebagai berikut; anil dengan temperatur 500°C menghasilkan butir dengan ukuran $34,56 \mu\text{m}$, anil dengan temperatur 600°C

menghasilkan butir dengan ukuran 52,73 μm , dan anil dengan temperatur 700°C menghasilkan butir dengan ukuran 54,61 μm . Dengan demikian dapat diambil kesimpulan bahwa seiring dengan kenaikan temperatur anil maka besar butir pelat kuningan 70/30 akan semakin membesar. Hal tersebut sesuai dengan literatur yang menjelaskan bahwa seiring dengan meningkatnya temperatur pemanasan maka ukuran butir akan semakin besar^[13].

Pertumbuhan butir terjadi dengan pergerakan atau migrasi batas butir. Pergerakan batas butir terjadi karena adanya difusi atom-atom dari suatu butir ke butir lainnya yang menyebabkan berubahnya batas butir. Pertambahan temperatur atau peningkatan temperatur akan menyebabkan bertambahnya energi yang diberikan terhadap butir. Temperatur tinggi akan menyebabkan meningkatnya energi getaran termal sehingga mempercepat atom berdifusi melalui batas butir dari butir yang kecil menuju butir yang besar. Oleh sebab itu dengan peningkatan temperatur maka akan didapat ukuran butir yang relatif besar^[3].

4.3.2 Pengaruh Waktu Tahan Anil terhadap Besar Butir

Hubungan antara waktu tahan anil dengan besar butir pelat kuningan 70/30 dapat digambarkan pada Gambar 4.23. di bawah ini.



Gambar 4.23. Grafik Hubungan antara Waktu Tahan Anil dengan Besar Butir

Dari pengujian besar butir yang dilakukan pada berbagai sampel yang telah dianil dengan waktu tahan yang beragam pada temperatur 600°C

menunjukkan hasil sebagai berikut; anil dengan waktu tahan 2 menit menghasilkan butir dengan ukuran 50,52 μm , anil dengan waktu tahan 3 menit menghasilkan butir dengan ukuran 52,21 μm , dan anil dengan waktu tahan 4 menit menghasilkan butir dengan ukuran 52,80 μm . Dengan demikian dapat diambil kesimpulan bahwa seiring dengan kenaikan waktu tahan maka besar butir pelat kuningan 70/30 akan semakin membesar. Hal ini sesuai dengan literatur bahwa seiring dengan kenaikan waktu maka butir akan terekristalisasi dan mengalami pertumbuhan (*grain growth*)^[3].

Pertambahan waktu tahan akan memberikan lebih banyak waktu kepada atom-atom untuk berdifusi sehingga menyebabkan batas butir menjadi berubah dan ukuran butir akan membesar. Hal ini sesuai dengan literatur yang menjelaskan bahwa semakin lama waktu tahan pemanasan anil maka akan semakin banyak waktu yang digunakan butir untuk mengalami rekristalisasi dan tumbuh sehingga dihasilkan butir yang besar-besar^[13].

4.4 Pengujian Kekerasan

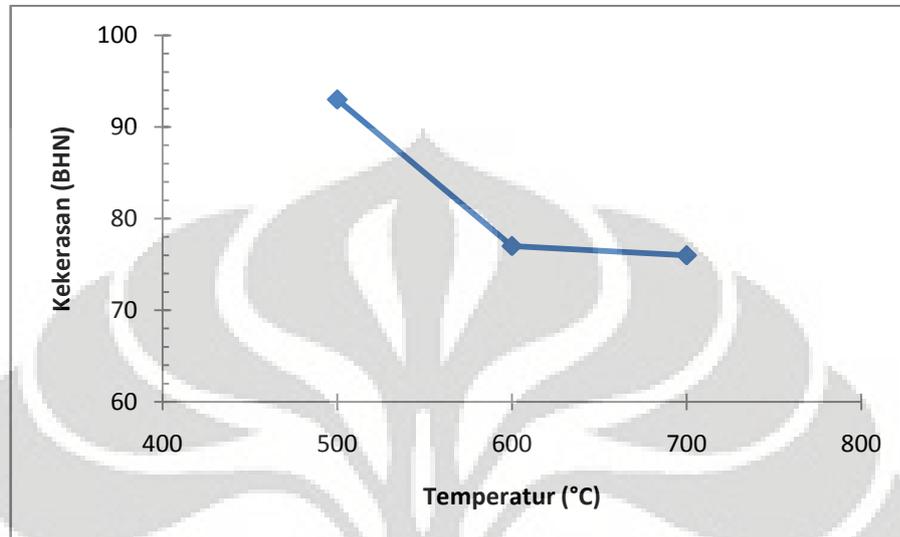
Pengujian kekerasan dilakukan pada sampel pelat kuningan 70/30 hasil proses canai dingin sebelum dianil dan sampel pelat kuningan 70/30 yang telah mengalami berbagai proses pemanasan anil. Metode pengujian nilai kekerasan yang digunakan adalah metode Vickers. Nilai kekerasan Vickers tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan metode Brinell dengan menggunakan tabel perbandingan yang terdapat pada standar ASTM E140. Hasil pengujian nilai kekerasan secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Hasil Pengujian Kekerasan

No.	Kondisi Sampel	Nilai Kekerasan Vickers (VHN)	Nilai Kekerasan Brinell (BHN)	Standar Industri (BHN)
1.	Canai dingin	170 \pm 15	147	75 - 90
2.	Anil temperatur 500°C selama 3 menit	105 \pm 3	93	
3.	Anil temperatur 600°C selama 3 menit	86 \pm 3	77	
4.	Anil temperatur 700°C selama 3 menit	84 \pm 6	76	
5.	Anil selama 2 menit temperatur 600°C	111 \pm 4	98	
6.	Anil selama 3 menit temperatur 600°C	92 \pm 3	83	
7.	Anil selama 4 menit temperatur 600°C	91 \pm 4	81	

4.4.1 Pengaruh Temperatur Anil terhadap Kekerasan

Hubungan antara temperatur anil dengan kekerasan pelat kuningan 70/30 dapat digambarkan pada Gambar 4.24. di bawah ini.



Gambar 4.24. Grafik Hubungan antara Temperatur Anil dengan Kekerasan

Nilai kekerasan yang didapat dari pengujian pada sampel pelat kuningan 70/30 yang telah dianil dengan temperatur beragam selama 3 menit menunjukkan hasil sebagai berikut; anil dengan temperatur 500°C menghasilkan kekerasan 93 BHN, anil dengan temperatur 600°C menghasilkan kekerasan 77 BHN, dan anil dengan temperatur 700°C menghasilkan 76 BHN. Dengan demikian dapat disimpulkan seiring dengan peningkatan temperatur anil maka nilai kekerasan dari pelat kuningan 70/30 mengalami penurunan. Hal ini sesuai dengan literatur yang menjelaskan bahwa peningkatan temperatur anil akan menyebabkan ukuran butir yang dihasilkan akan semakin besar sehingga nilai kekerasan dari material akan menurun^[11].

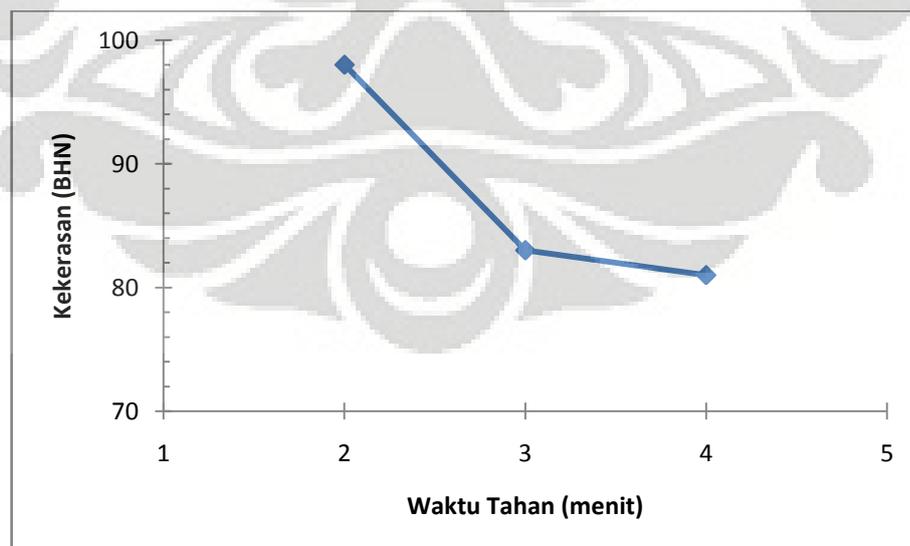
Penurunan nilai kekerasan pada pelat kuningan 70/30 seiring dengan peningkatan temperatur anil disebabkan oleh ukuran butir yang semakin membesar. Pemanasan anil pada dasarnya adalah memberikan energi termal yang akan menggetarkan atom-atom sehingga terjadi difusi atom antara butir yang satu ke butir yang lainnya. Difusi atom tersebut terjadi melalui batas butir dari butir yang kecil menuju yang besar. Oleh sebab itu akan didapat ukuran butir yang

relatif besar setelah proses pemanasan. Jika temperatur ditingkatkan berarti energi yang diberikan semakin tinggi sehingga laju difusi atom juga semakin tinggi. Hal ini akan mengakibatkan butir mengalami pertumbuhan (*grain growth*) semakin besar.

Ukuran butir yang besar akan mengurangi nilai kekerasan dari suatu material. Hal ini disebabkan material dengan butir yang relatif besar memiliki batas butir yang lebih sedikit dibandingkan dengan material yang memiliki butir kecil. Batas butir ini merupakan penghalang yang akan menghambat pergerakan dislokasi. Jika batas butirnya sedikit maka dislokasi akan semakin mudah bergerak sehingga material semakin mudah dideformasi dan memiliki nilai kekerasan lebih rendah dibandingkan dengan material yang memiliki butir kecil. Material dengan butir yang kecil akan memiliki batas butir yang banyak sehingga pergerakan dislokasi akan semakin mudah terhambat. Pergerakan dislokasi yang terhambat ini akan menyebabkan material sulit untuk dideformasi sehingga sifat mekanis material seperti kekerasan dan kekuatan akan semakin tinggi^[11].

4.4.2 Pengaruh Waktu Tahan Anil terhadap Kekerasan

Hubungan antara waktu tahan anil dengan kekerasan pelat kuningan 70/30 dapat digambarkan pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25. Grafik Hubungan antara Waktu Tahan Anil dengan Kekerasan

Berdasarkan pengujian nilai kekerasan pada sampel pelat kuningan 70/30 yang telah dianil dengan waktu tahan anil beragam pada temperatur 600°C menunjukkan hasil sebagai berikut; anil dengan waktu tahan selama 2 menit menghasilkan kekerasan 98 BHN, anil dengan waktu tahan 3 menit menghasilkan kekerasan 83 BHN, dan anil dengan waktu tahan 4 menit menghasilkan kekerasan 81 BHN. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa seiring dengan peningkatan waktu tahan maka nilai kekerasan dari pelat kuningan 70/30 akan mengalami penurunan. Hal ini sesuai dengan literatur yang menjelaskan bahwa peningkatan waktu tahan anil akan menyebabkan butir terekristalisasi dan mengalami pertumbuhan menjadi semakin besar yang akan menurunkan sifat mekanis seperti kekuatan dan kekerasan^[11].

Peningkatan atau penambahan waktu tahan anil akan memberikan lebih banyak waktu kepada atom-atom untuk berdifusi sehingga menyebabkan batas butir menjadi berubah dan ukuran butir akan membesar. Membesarnya ukuran butir ini akan menyebabkan pergerakan dislokasi menjadi lebih mudah karena tidak ada penghalang. Salah satu penghalang pergerakan dislokasi adalah batas butir. Material dengan butir yang besar akan memiliki batas butir yang sedikit sehingga pergerakan dislokasi menjadi lebih mudah. Pergerakan dislokasi yang tidak terhalang ini akan menyebabkan material menjadi semakin mudah terdeformasi sehingga sifat mekanis seperti kekerasan akan menurun.

4.4.3 Pengaruh Proses Anil terhadap Kekerasan

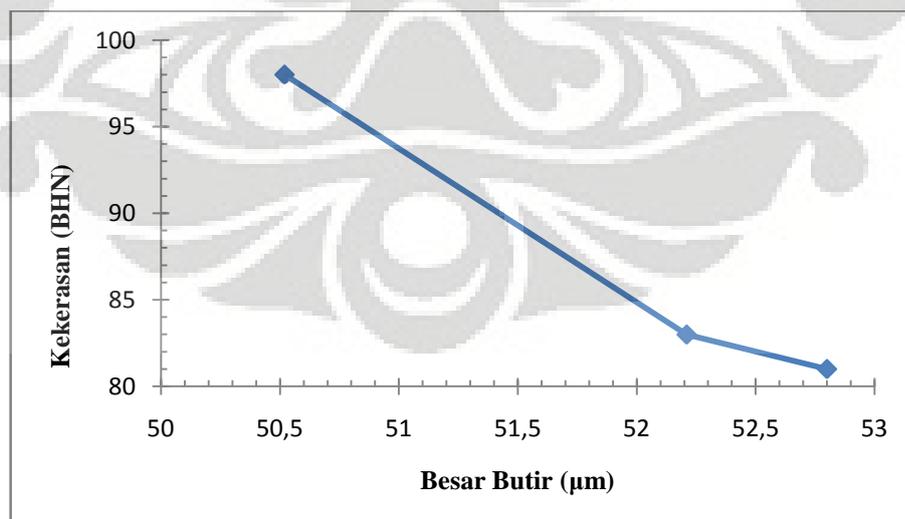
Proses anil akan menurunkan kekerasan pelat kuningan 70/30 hasil proses canai dingin. Hal ini sesuai dengan literatur yang menjelaskan bahwa proses pemanasan anil rekristalisasi akan menghasilkan butir-butir poligon baru yang terbebas dari tegangan sisa sehingga nilai kekerasannya akan menurun^[13].

Nilai kekerasan pelat kuningan 70/30 setelah proses canai dingin menunjukkan nilai kekerasan yang sangat tinggi. Nilai kekerasan yang tinggi ini disebabkan oleh deformasi yang diberikan selama proses canai dingin. Semakin tinggi deformasi yang diberikan maka nilai kekerasan akan semakin tinggi. Selain itu, butir yang dihasilkan setelah proses canai dingin memiliki tegangan sisa (*residual stress*) yang tinggi pada batas butirnya. Tegangan sisa inilah yang akan

menghambat pergerakan dislokasi sehingga material memiliki nilai kekerasan yang tinggi.

Nilai kekerasan dari pelat kuningan 70/30 menurun ketika dilakukan proses pemanasan anil. Hal tersebut dikarenakan energi termal dari proses pemanasan akan menghilangkan tegangan sisa pada batas butir hasil proses canai. Proses penghilangan tegangan sisa ini lebih dikenal dengan istilah *recovery*. Dalam tahapan ini tidak terjadi perubahan butir pada butir yang memipih setelah proses canai dingin. Namun terjadi penghilangan tegangan sisa pada batas butir sehingga kekerasan dari material akan berkurang. Jika energi yang diberikan cukup tinggi maka akan terjadi pembentukan *nuclei* pada batas butir. *Nuclei* tersebut akan mengalami transformasi nukleasi sehingga timbul butir-butir poligon baru yang bebas dari tegangan. Tahapan ini dikenal dengan istilah rekristalisasi.

Peningkatan temperatur anil akan memberikan energi yang lebih tinggi kepada butir sehingga butir yang telah mengalami rekristalisasi akan tumbuh dan membesar (*grain growth*). Membesarnya butir ini akan menyebabkan pergerakan dislokasi menjadi semakin mudah sehingga nilai kekerasan akan menurun. Grafik hubungan antara besar butir dengan nilai kekerasan dapat dilihat pada Gambar 4.26. di bawah ini.



Gambar 4.26. Grafik Hubungan Besar Butir dengan Kekerasan

4.5 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan pada sampel kondisi anil optimum sesuai standar industri yaitu anil dengan temperatur 600°C selama 3 menit. Melalui pengujian tarik ini dapat diketahui sifat mampu bentuk (*formability*) dan sifat mampu tarik (*drawability*) dari pelat kuningan 70/30. Pengujian tarik dilakukan pada sampel dengan 3 arah lembaran yang berbeda terhadap arah canai yaitu arah 0°, 45°, dan 90°. Hasil pengujian tarik yang didapat meliputi nilai kekuatan tarik maksimum (UTS), koefisien pengerasan regang, koefisien anisotropi normal, dan koefisien anisotropi planar. Secara lengkap hasil pengujian tarik terdapat pada Tabel 4.4. di bawah ini.

Tabel 4.4. Hasil Pengujian Tarik

No.	Parameter Pengujian	Posisi Sampel Terhadap Arah Canai			Nilai	Standar Industri
		0°	45°	90°		
1.	UTS (kg/mm ²)	37,74	36,87	38,21	37,6	28 - 36
2.	Koefisien pengerasan regang n	0,49	0,51	0,5	0,5	0 - 1
3.	Koefisien anisotropi normal r	1,75	1,46	1,65	1,58	>1
4.	Koefisien anisotropi planar Δr	---	---	---	0,24	=0

4.5.1 Kekuatan Tarik Maksimum (UTS)

Kekuatan tarik maksimum (UTS) merupakan tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum terjadinya perpatahan atau kegagalan. Hasil pengujian yang dilakukan pada 3 arah lembaran pelat kuningan 70/30 menghasilkan nilai kekuatan tarik maksimum sebagai berikut; pada arah 0° sebesar 37,74 kg/mm², pada arah 45° sebesar 36,87 kg/mm², dan pada arah 90° sebesar 38,91 kg/mm². Perbedaan nilai kekuatan ini disebabkan oleh sifat anisotropi pada pelat kuningan 70/30. Sifat anisotropi tersebut disebabkan oleh terbentuknya orientasi pilihan atau tekstur kristalografi akibat suatu proses deformasi. Pada saat proses canai, kristal pada logam akan cenderung berputar ke arah tertentu sehingga akan mengakibatkan bervariasinya nilai kekuatan^[5].

Semakin tinggi kekuatan tarik maka beban yang dibutuhkan untuk melakukan deformasi pada material secara plastis akan semakin tinggi. Perlakuan pemanasan anil akan menurunkan nilai kekuatan tarik. Hal tersebut dikarenakan

butir yang dihasilkan dari proses pemanasan anil cenderung lebih besar sehingga pergerakan dislokasi menjadi semakin mudah ketika material dideformasi. Dengan demikian maka nilai kekuatan tarik material akan menurun, namun nilai keuletan akan meningkat.

4.5.2 Koefisien Pengerasan Regang (n)

Koefisien pengerasan regang merupakan penambahan kekerasan suatu material akibat regangan sehingga tegangan yang dibutuhkan untuk deformasi plastis akan meningkat. Hasil pengujian yang dilakukan pada 3 arah lembaran pelat kuningan mendapatkan hasil sebagai berikut; 0,49 pada arah 0° , 0,51 pada arah 45° , dan 0,50 pada arah 90° . Perbedaan nilai ini dikarenakan oleh sifat anisotropi pada kuningan 70/30. Nilai koefisien pengerasan regang rata-rata yang didapatkan dalam pengujian yaitu 0,50. Nilai ini tidak jauh berbeda dengan nilai koefisien pengerasan regang kuningan 70/30 setelah mengalami proses pemanasan anil pada literatur yaitu 0,49^[4].

Nilai koefisien pengerasan regang berhubungan dengan sifat mampu bentuk dari material. Material dengan sifat mampu bentuk (*formability*) yang baik harus memiliki nilai koefisien pengerasan regang (n) antara 0 – 1^[4]. Nilai koefisien pengerasan regang yang didapat dari hasil pengujian termasuk ke dalam *range* 0 – 1 sehingga dapat disimpulkan bahwa pelat kuningan 70/30 yang telah mengalami proses anil pada temperatur 600°C selama 3 menit memiliki sifat mampu bentuk yang baik.

4.5.3 Koefisien Anisotropi Normal (r)

Koefisien anisotropi normal (r) merupakan perbandingan antara regangan sesungguhnya pada arah lebar terhadap regangan sesungguhnya pada arah tebal. Hasil pengujian yang dilakukan pada 3 arah lembaran pelat kuningan mendapatkan hasil sebagai berikut; 1,75 pada arah 0° , 1,46 pada arah 45° , dan 1,65 pada arah 90° . Perbedaan nilai tersebut disebabkan oleh perbedaan arah orientasi kristal dan *mechanical fibering* pada pelat kuningan 70/30 setelah proses canai dan proses pemanasan anil. Nilai koefisien anisotropi normal rata-rata yang didapatkan dalam pengujian yaitu 1,58 berbeda dengan nilai yang terdapat pada

literatur yaitu 0,6 – 0,9 untuk logam tembaga dan kuningan^[4]. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh perbedaan kondisi proses pemanasan anil yang dapat merubah nilai koefisien anisotropi normal.

Nilai koefisien anisotropi normal berhubungan dengan sifat mampu bentuk dari material. Material dengan sifat mampu bentuk (*formability*) yang baik harus memiliki nilai koefisien anisotropi normal lebih dari 1 ($r > 1$)^[5]. Jika $r > 1$ maka deformasi pada arah lebar lebih besar daripada arah tebal sehingga ketahanan material terhadap penipisan sangat baik. Material dengan nilai $r > 1$ sangat cocok untuk pengubahan bentuk selanjutnya seperti proses penarikan dalam (*deep drawing*). Nilai koefisien anisotropi normal yang didapat dari hasil pengujian adalah 1,58. Hal ini menunjukkan bahwa pelat kuningan 70/30 yang telah mengalami proses anil pada temperatur 600°C selama 3 menit memiliki sifat mampu tarik (*drawability*) yang baik.

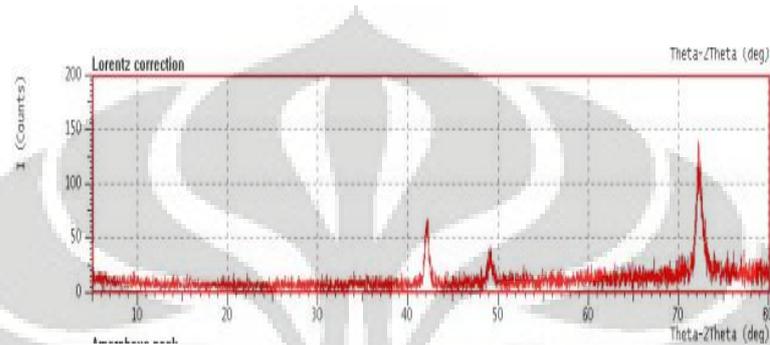
4.5.4 Koefisien Anisotropi Planar (Δr)

Koefisien anisotropi planar (Δr) merupakan perbedaan sifat material yang menyangkut arah pada bidang lembaran logam. Nilai Δr mempengaruhi terjadinya pengupingan (*earing*) dalam proses penarikan dalam (*deep drawing*). Jika nilai $\Delta r < 0$ maka pengupingan terjadi pada arah 45° bidang lembaran, sedangkan jika nilai $\Delta r > 0$ maka pengupingan terjadi pada arah 0° dan arah 90° bidang lembaran. Untuk proses penarikan dalam dibutuhkan material yang memiliki nilai Δr mendekati 0 sehingga pengupingan dapat dihindari. Hasil pengujian pada pelat kuningan 70/30 yang telah mengalami proses pemanasan anil pada temperatur 600°C selama 3 menit menunjukkan nilai sebesar 0,24.

Nilai koefisien anisotropi planar yang diinginkan dalam proses penarikan dalam (*deep drawing*) adalah mendekati 0 sehingga kemungkinan terjadinya pengupingan sangat kecil. Namun dari hasil pengujian didapatkan nilai anisotropi planar lebih dari 0 ($\Delta r > 0$) yang berarti pelat akan memiliki kecenderungan terjadinya pengupingan pada arah 0° dan arah 90° bidang lembaran. Proses pemanasan anil dapat meminimalkan terjadinya pengupingan karena akan terbentuk tekstur rekristalisasi pada lembaran logam yang akan meminimalkan pembentukan tekstur deformasi yang kuat^[10].

4.6 Pengujian Difraksi Sinar X

Pengujian difraksi sinar X ini dilakukan untuk mengetahui intensitas difraksi dari pelat kuningan 70/30 untuk selanjutnya dapat ditentukan bidang orientasi pilihan dan kecenderungan tekstur. Hasil pengujian untuk sampel pelat kuningan 70/30 hasil canai dingin sebelum mengalami proses pemanasan anil ditunjukkan pada Gambar 4.27. dan Tabel 4.5.



Gambar 4.27. Intensitas Difraksi Sinar X pada Sampel Kondisi Canai Dingin

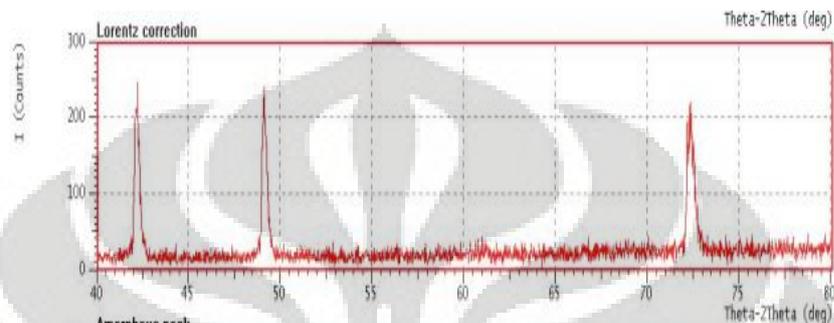
Tabel 4.5. Bidang Orientasi Kristal pada Sampel Kondisi Canai Dingin

No.	d	angle	h	k	l
1	3,67	24,18	1	0	0
2	2,6	34,47	1	1	0
3	2,12	42,55	1	1	1
4	1,83	49,54	2	0	0
5	1,64	55,86	2	1	0
6	1,5	61,74	2	1	1
7	1,3	72,67	2	2	0
8	1,22	77,87	3	0	0
9	1,16	82,97	3	1	0
10	1,1	88,02	3	1	1
11	1,06	93,05	2	2	2
12	1,01	98,1	3	2	0
13	0,98	103,22	3	2	1
14	0,91	113,85	4	0	0
15	0,89	119,48	4	1	0

Hasil pengujian menunjukkan intensitas difraksi tertinggi atau puncak tertinggi terdapat pada sudut $72,67^\circ$ dengan pola bidang (220), diikuti oleh intensitas pada sudut $42,25^\circ$ dengan pola bidang (111), dan selanjutnya yang

terakhir pada sudut $49,54^\circ$ dengan pola bidang (200). Dapat disimpulkan bahwa terdapat kecenderungan bidang pilihan tekstur pada bidang (220).

Pengujian juga dilakukan terhadap sampel pelat kuningan 70/30 setelah mengalami pemanasan anil pada temperatur 600°C selama 3 menit. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.28. dan Tabel 4.6.



Gambar 4.28. Intensitas Difraksi Sinar X pada Sampel Kondisi Anil 600°C

Tabel 4.6. Bidang Orientasi Kristal pada Sampel Kondisi Anil 600°C

No.	d	angle	h	k	L
1	3,67	24,19	1	0	0
2	2,6	34,47	1	1	0
3	2,12	42,56	1	1	1
4	1,83	49,55	2	0	0
5	1,64	55,88	2	1	0
6	1,5	61,76	2	1	1
7	1,3	72,67	2	2	0
8	1,22	77,89	3	0	0
9	1,16	82,99	3	1	0
10	1,1	88,04	3	1	1
11	1,06	93,07	2	2	2
12	1,01	98,13	3	2	0
13	0,98	103,25	3	2	1
14	0,91	113,88	4	0	0
15	0,89	119,51	4	1	0

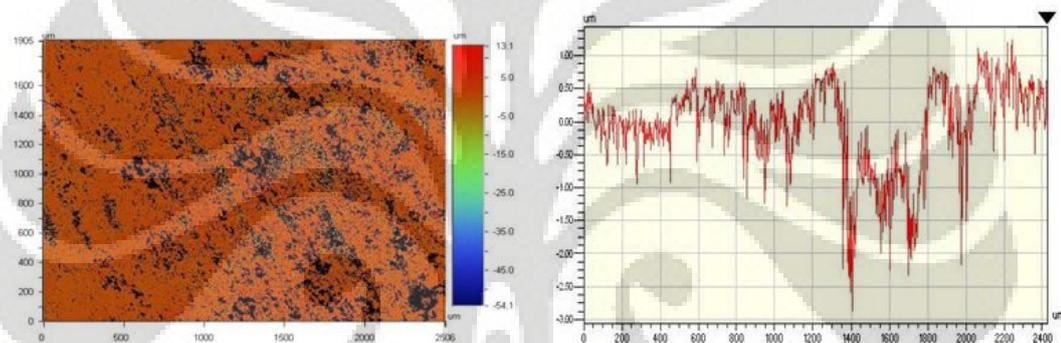
Setelah dilakukan proses pemanasan anil terjadi perubahan intensitas difraksi. Terdapat 2 intensitas dengan puncak tertinggi yang hampir sama yaitu pada sudut $42,56^\circ$ dengan kecenderungan membentuk bidang (111) dan pada sudut $49,55^\circ$ dengan kecenderungan membentuk bidang (200). Untuk intensitas

tertinggi berikutnya berada pada sudut $72,67^\circ$ yang cenderung membentuk bidang (220).

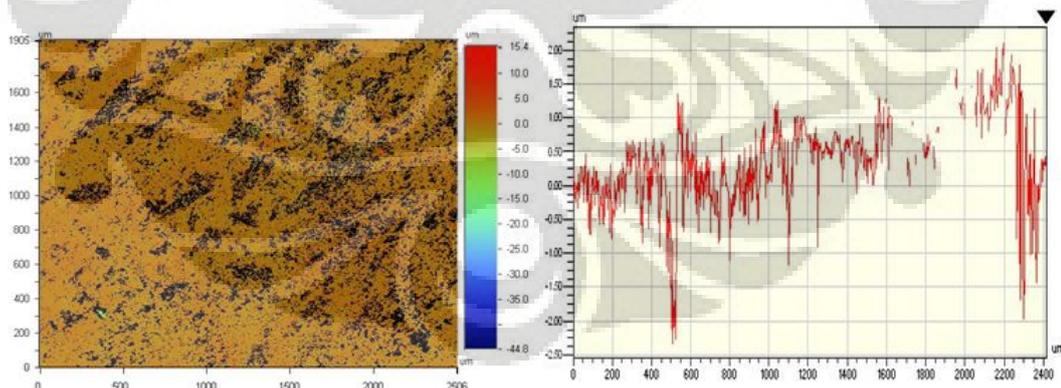
Proses anil dapat merubah besarnya intensitas difraksi sinar X pada sampel yang telah mengalami canai dingin. Intensitas terbesar ditunjukkan pada bidang (111), (200), dan (220). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pelat kuningan 70/30 hasil proses canai dingin yang telah mengalami proses pemanasan anil memiliki kecenderungan tekstur pada bidang kristal (111), (200), dan (220).

4.7 Pengujian Kekasaran Permukaan

Hasil pengujian kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 4.29. dan Gambar 4.30.



Gambar 4.29. Tampilan 2D dan Profil Kekasaran Permukaan Sampel Kondisi Canai Dingin



Gambar 4.30. Tampilan 2D dan Profil Kekasaran Permukaan Sampel Kondisi Setelah Anil

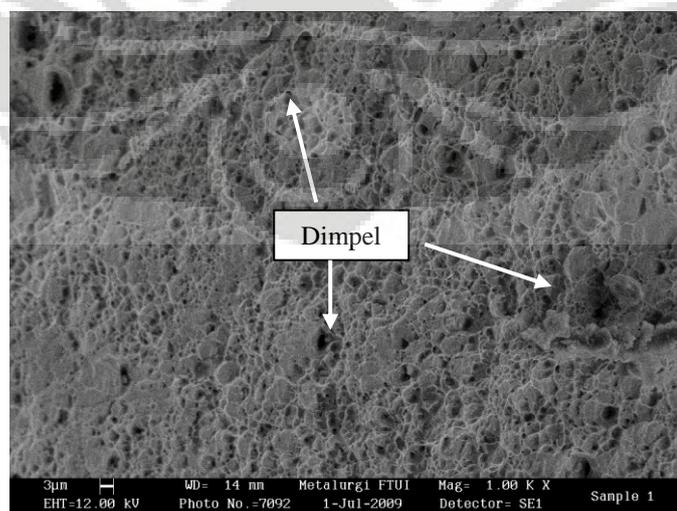
Nilai kekasaran permukaan (R_a) dari pelat kuningan 70/30 setelah dilakukan proses canai dingin adalah $0,50 \mu\text{m}$. Nilai kekasaran permukaan ini

turun menjadi 0,49 μm ketika pelat kuningan mengalami anil pada temperatur 600°C selama 3 menit.

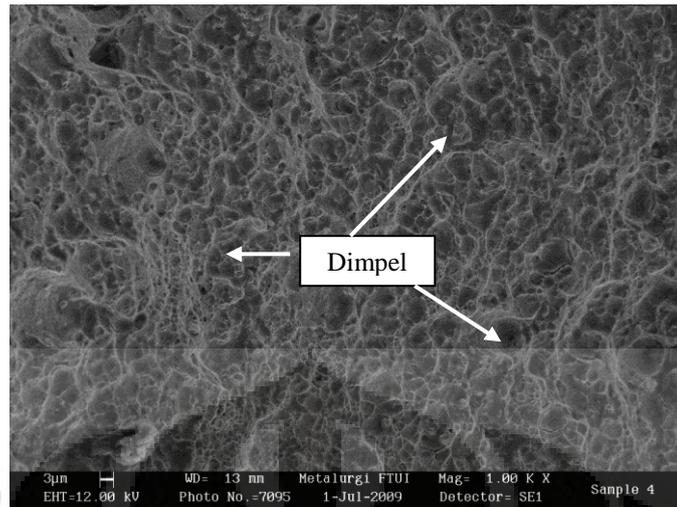
Dalam kondisi setelah canai dingin, pelat kuningan memiliki kekasaran permukaan yang relatif tinggi diakibatkan oleh proses deformasi pada saat canai. Proses deformasi tersebut mengakibatkan timbulnya tegangan sisa sehingga permukaan logam cenderung menjadi lebih kasar. Setelah dilakukan proses pemanasan anil maka tegangan sisa pada butir menjadi hilang sehingga permukaan logam menjadi lebih halus. Nilai kekasaran permukaan sangat penting dalam proses pembentukan lembaran. Nilai kekasaran permukaan yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya kegagalan sobek (*tearing*) dalam proses penarikan dalam (*deep drawing*)^[4]. Selain itu nilai kekasaran permukaan juga mempengaruhi kualitas permukaan produk yang dihasilkan. Semakin kecil nilai kekasaran permukaan maka sifat mampu bentuknya semakin baik dan permukaan produk menjadi semakin halus.

4.8 Pengujian Fraktografi Hasil Uji Tarik

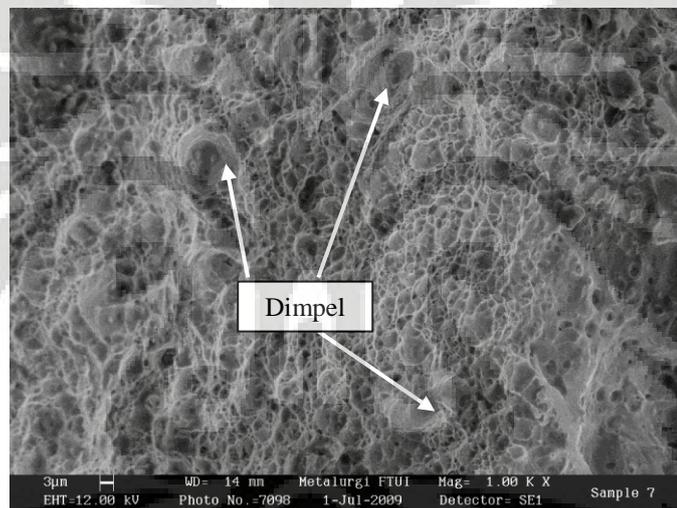
Pengujian fraktografi (perpatahan) hasil uji tarik bertujuan untuk mengetahui sifat dari pelat kuningan 70/30. Sampel yang digunakan adalah sampel perpatahan hasil uji tarik pelat kuningan 70/30 yang telah mengalami proses pemanasan anil pada temperatur 600°C selama 3 menit pada 3 arah lembaran yang berbeda. Hasil pengujian fraktografi dapat dilihat pada Gambar 4.31 hingga Gambar 4.33.



Gambar 4.31. Hasil SEM Permukaan Patahan 0°. Perbesaran 1000x



Gambar 4.32. Hasil SEM Permukaan Patahan 45°. Perbesaran 1000x



Gambar 4.33. Hasil SEM Permukaan Patahan 90°. Perbesaran 1000x

Secara umum sampel menunjukkan ciri perpatahan ulet (*ductile*). Hal ini ditandai dengan adanya dimpel-dimpel pada semua hasil permukaan patahan. Pada arah 0° (Gambar 4.33) terlihat dimpel-dimpel halus pada permukaannya. Pada arah 45° (Gambar 4.34) juga terlihat dimpel-dimpel, pada arah 90° (Gambar 4.35) dimpel-dimpel terlihat lebih jelas. Dimpel merupakan kumpulan dan penyatuan rongga-rongga kecil (*cavity*) selama pembebanan berlangsung. Dimpel inilah awal dari perpatahan. Dimpel juga merupakan tanda bahwa perpatahan terjadi melalui mekanisme pergeseran butir^[3]. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pelat kuningan 70/30 setelah proses anil pada temperatur 600°C selama 3 menit bersifat ulet (*ductile*).

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Proses anil rekristalisasi yang optimum untuk mendapatkan pelat kuningan 70/30 yang sesuai dengan standar industri adalah temperatur 600°C dengan waktu tahan selama 3 menit.
2. Ukuran butir pelat kuningan 70/30 hasil canai dingin akan mengalami penurunan dari $63,18 \pm 4,10 \mu\text{m}$ menjadi $52,73 \pm 0,86 \mu\text{m}$ ketika dilakukan proses anil rekristalisasi pada temperatur 600°C dengan waktu tahan 3 menit namun selanjutnya akan meningkat menjadi $54,61 \pm 3,85 \mu\text{m}$ jika temperatur anil ditingkatkan menjadi 700°C.
3. Nilai kekerasan pelat kuningan hasil canai dingin akan menurun dari 147 BHN menjadi 77 BHN ketika dilakukan proses anil rekristalisasi pada temperatur 600°C dengan waktu tahan 3 menit kemudian selanjutnya akan terus menurun menjadi 76 BHN jika temperatur anil ditingkatkan menjadi 700°C.
4. Proses pemanasan anil optimum akan menghasilkan pelat kuningan 70/30 yang memiliki sifat mampu bentuk yang baik dengan nilai rasio pengerasan regang 0,50, nilai anisotropi normal 1,58, dan nilai anisotropi planar 0,24.
5. Proses pemanasan anil pada temperatur 600°C dengan waktu tahan 3 menit akan menghasilkan kecenderungan orientasi kristal pada bidang (111), (200), dan (220) .
6. Proses pemanasan anil pada temperatur 600°C dengan waktu tahan 3 menit akan menurunkan nilai kekasaran permukaan pelat kuningan hasil canai dingin dari $0,50 \mu\text{m}$ menjadi $0,49 \mu\text{m}$ sehingga sifat mampu bentuknya semakin baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASM International Handbook Committee. 1990. *ASM Metal Handbook Volume 2 : Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Material*. ASM International : Metals Park, Ohio.
- [2] ASM International Handbook Committee. 1990. *ASM Metal Handbook Volume 3 : Alloy Phase Diagram*. ASM International : Metals Park, Ohio.
- [3] Callister, William D. 1997. *Material Science and Engineering : an Introduction*. John Wiley & Son : New York.
- [4] Kalpakjian, Serope dan S. R. Schmid. 2008. *Manufacturing Processes for Engineering Materials 5th ed*. Pearson Education : UK.
- [5] Mangonon, L. Pat.1999. *The Principle of Material Selection for Engineering Design*. Prentice-Hall International, Inc. : New Jersey.
- [6] www.keytometals.com
- [7] ASM International Handbook Committee. 1991. *ASM Metal Handbook Volume 3 : Heat Treating*. ASM International : Metals Park, Ohio.
- [8] I. M. Ghauri, M. Z. Butt, S. M. Raza. 1990. *Grain Growth in Copper and Alpha-Brasses*. Journal of Materials Science Volume 25 page 4782-4784.
- [9] Valerie Randle, Helen Davies. 2001. *Evolution of Microstructure and Properties in Alpha-Brass after Iterative Processing*. Metallurgical dan Materials Transactions A Volume 33A, June 2002 page 1853-1857.
- [10] Harris, John Noel. 1983. *Mechanical Working of Metals : Theory and Practice*. Pergamon Press : UK.
- [11] Smallman R.E, R.J Bishop. 1995. *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering : Science, Process and Applications*. Butterworth-Heinemann Limited : Oxford.
- [12] R. A Harding, C. Homer, B. Baudelet. 1980. *Recrystallization of 70/30 Brass During Induction Heating*. Journal of Materials Science Volume 15 page 1804-1813.
- [13] F. J. Humphreys, M. Hatherly. 2004. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Pergamon Materials Series, Elsevier : UK.

- [14] ASM International Handbook Committee. 1988. *ASM Metal Handbook Volume 14 : Forming and Forging*. ASM International : Metals Park, Ohio.
- [15] O. Wouters, W. P. Vellinga, R. Van Tijing, J. Th. M. de Hosson. 2005. *On The Evolution of Surface Roughness During Deformation of Polycrystalline Aluminum Alloys*. *Acta Materialia Journal* Volume 53 page 4043-4050.
- [16] ASTM E112. 2003. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*.
- [17] ASTM E92. 2003. *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*.
- [18] ASTM E8. 2004. *Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials*.
- [19] ASTM E646. 1998. *Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials*.
- [20] ASTM E517. 2000. *Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r Sheet Metal*.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Pelat Kuningan 70/30

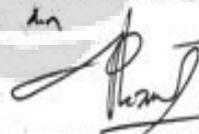
LAPORAN HASIL ANALISA (REPORT OF ANALYSIS)

Customer :
BPPT ENJINIRING
Jl. M.H. Thamrin No.8
Jakarta

Kode Sampel : BPPT 3
Analisa : Spectrometer
Program : CUBRAS
Hasil / Results :

Unsur	(%)
Sn	0,01603
Zn	30,05447
Pb	0,00993
Fe	0,05761
Ni	0,08965
Al	0,00685
P	0,00172
Si	-
Mn	-
S	0,00283
Sb	0,00517
Mg	0,00033
Cu	69,75358

Ka. Divisi Pengecoran.



ACHMAD SAMBAS, M.T
NIP. 132 144 637

Lampiran 2. Perhitungan Besar Butir

Kondisi Sampel	Posisi	M	f	n ₁	n ₂	n ₂ /2	NA	G (No ASTM)	Diameter Butir	Rata-Rata	Standar Deviasi
Canai Dingin	Permukaan	200	8	19	17	8,5	220	4,83	67,58	63,18	4,103319794
	Memanjang	200	8	26	19	9,5	284	5,20	59,46		
	Melintang	200	8	24	16	8	256	5,05	62,49		
Anil 500°C 3 menit	Permukaan	200	8	91	33	16,5	860	6,80	34,20	34,56	1,414779135
	Memanjang	200	8	81	30	15	768	6,64	36,12		
	Melintang	200	8	98	30	15	904	6,87	33,36		
Anil 600°C 3 menit	Permukaan	200	8	36	18	9	360	5,54	52,72	52,73	0,865043352
	Memanjang	200	8	34	19	9,5	348	5,49	53,60		
	Melintang	200	8	37	19	9,5	372	5,59	51,87		
Anil 700°C 3 menit	Permukaan	200	8	31	15	7,5	308	5,32	57,04	54,61	3,853496248
	Memanjang	200	8	34	10	5	312	5,34	56,63		
	Melintang	200	8	39	22	11	400	5,69	50,17		
Anil 2 menit 600°C	Permukaan	200	8	39	18	9	384	5,64	51,02	50,52	3,35803514
	Memanjang	200	8	36	15	7,5	348	5,49	53,60		
	Melintang	200	8	48	18	9	456	5,88	46,94		
Anil 3 menit 600°C	Permukaan	200	8	38	20	10	384	5,64	51,02	52,21	1,03406963
	Memanjang	200	8	37	16	8	360	5,54	52,72		
	Melintang	200	8	37	15	7,5	356	5,53	52,89		
Anil 4 menit 600°C	Permukaan	200	8	35	19	9,5	356	5,53	52,89	52,80	1,053106516
	Memanjang	200	8	37	20	10	376	5,60	51,70		
	Melintang	200	8	34	18	9	344	5,48	53,80		

Universitas Indonesia

Lampiran 3. Tabel Diameter Butir

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		$\bar{\tau}$ Mean Intercept		\bar{N}_L
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	No./mm
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	0.0566	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	2016	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	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	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

Lampiran 4. Perhitungan Nilai Kekerasan

Kondisi Sampel	Posisi	Indentasi 1		Indentasi 2		Indentasi 3		VHN1	VHN2	VHN3	VHN rata-rata	VHN	BHN
		A	B	A	B	A	B						
Canai Dingin	Permukaan	52	55,5	55	55,5	52,5	57	193	182	186	187		
	Memanjang	55,5	56,5	57	62	63,75	63	177	157	138	158	170	147
	Melintang	61	59,5	58,25	56,25	57,25	56	153	170	173	165		
Anil 500°C 3 menit	Permukaan	66,5	74	71	77	71	69	113	102	114	109		
	Memanjang	70,75	75	69	74,75	69,5	80	105	108	100	104	105	93
	Melintang	74,75	74,25	73,25	81,25	66,5	72,5	100	93	115	103		
Anil 600°C 3 menit	Permukaan	78	83,5	79	75,5	80	79,75	85	93	87	89		
	Memanjang	85,5	81,5	82,5	81	81	83,5	80	83	82	82	86	77
	Melintang	79,5	80	78,25	81	79	80,5	87	88	87	88		
Anil 700°C 3 menit	Permukaan	80	87,5	78,5	81	80,5	79,25	79	87	87	85		
	Memanjang	81	80,25	76	76	78,75	78,75	86	96	90	91	84	76
	Melintang	85,25	86,5	86,5	86	79,25	84,5	75	75	83	78		
Anil 2 menit 600°C	Permukaan	73	74	72	71	72,75	68,5	103	109	112	108		
	Memanjang	67,5	70	73,75	70	71,5	74	118	108	105	110	111	98
	Melintang	70,5	68,5	67,5	67,5	69,5	72,5	115	122	110	116		
Anil 3 menit 600°C	Permukaan	78,75	78	79,5	80	76,3	77,5	91	87	94	91		
	Memanjang	81	77,5	70,5	71,5	79	79,5	89	110	89	96	92	83
	Melintang	78,75	77,5	77,2	78	80,2	78	91	92	89	91		
Anil 4 menit 600°C	Permukaan	79,4	77	76	78	81,25	77,2	91	94	89	91		
	Memanjang	75	76	74,5	77	76	77	98	97	95	97	91	81
	Melintang	83,5	87	78	77	76	77	77	93	95	88		

Lampiran 5. Tabel Konversi Nilai Kekerasan

Vickers Hardness Number (HV)	Rockwell Hardness Number		Rockwell Superficial Hardness Number			Brinell Hardness Number
	B Scale, 100-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HRB)	F Scale, 60-kgf 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HRF)	15-T Scale, 15-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HR 15-T)	30-T Scale, 30-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HR 30-T)	45-T Scale, 45-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball (HR 45-T)	500-kgf, 10-mm Ball (HBS)
196	93.5	110.0	90.0	77.5	66.0	169
194	...	109.5	...	...	65.5	167
192	93.0	...	...	77.0	65.0	166
190	92.5	109.0	...	76.5	64.5	164
188	92.0	...	89.5	...	64.0	162
186	91.5	108.5	...	76.0	63.5	161
184	91.0	...	...	75.5	63.0	159
182	90.5	108.0	89.0	...	62.5	157
180	90.0	107.5	...	75.0	62.0	156
178	89.0	...	...	74.5	61.5	154
176	88.5	107.0	...	...	61.0	152
174	88.0	...	88.5	74.0	60.5	150
172	87.5	106.5	...	73.5	60.0	149
170	87.0	...	...	...	59.5	147
168	86.0	106.0	88.0	73.0	59.0	146
166	85.5	...	...	72.5	58.5	144
164	85.0	105.5	...	72.0	58.0	142
162	84.0	105.0	87.5	...	57.5	141
160	83.5	...	...	71.5	56.5	139
158	83.0	104.5	...	71.0	56.0	138
156	82.0	104.0	87.0	70.5	55.5	136
154	81.5	103.5	...	70.0	54.5	135
152	80.5	103.0	...	...	54.0	133
150	80.0	...	86.5	69.5	53.5	131
148	79.0	102.5	...	69.0	53.0	129
146	78.0	102.0	...	68.5	52.5	128
144	77.5	101.5	86.0	68.0	51.5	126
142	77.0	101.0	...	67.5	51.0	124
140	76.0	100.5	85.5	67.0	50.0	122
138	75.0	100.0	...	66.5	49.0	121
136	74.5	99.5	85.0	66.0	48.0	120

(Lanjutan)

136	74.5	99.5	85.0	66.0	48.0	120
134	73.5	99.0	...	65.5	47.5	118
132	73.0	98.5	84.5	65.0	46.5	116
130	72.0	98.0	84.0	64.5	45.5	114
128	71.0	97.5	...	63.5	45.0	113
126	70.0	97.0	83.5	63.0	44.0	112
124	69.0	96.5	...	62.5	43.0	110
122	68.0	96.0	83.0	62.0	42.0	108
120	67.0	95.5	...	61.0	41.0	106
118	66.0	95.0	82.5	60.5	40.0	105
116	65.0	94.5	82.0	60.0	39.0	103
114	64.0	94.0	81.5	59.5	38.0	101
112	63.0	93.0	81.0	58.5	37.0	99
110	62.0	92.6	80.5	58.0	35.5	97
108	61.0	92.0	...	57.0	34.5	95
106	59.5	91.2	80.0	56.0	33.0	94
104	58.0	90.5	79.5	55.0	32.0	92
102	57.0	89.8	79.0	54.5	30.5	90
100	56.0	89.0	78.5	53.5	29.5	88
98	54.0	88.0	78.0	52.5	28.0	86
96	53.0	87.2	77.5	51.5	26.5	85
94	51.0	86.3	77.0	50.5	24.5	83
92	49.5	85.4	76.5	49.0	23.0	82
90	47.5	84.4	75.5	48.0	21.0	80
88	46.0	83.5	75.0	47.0	19.0	79
86	44.0	82.3	74.5	45.5	17.0	77
84	42.0	81.2	73.5	44.0	14.5	76
82	40.0	80.0	73.0	43.0	12.5	74
80	37.5	78.6	72.0	41.0	10.0	72
78	35.0	77.4	71.5	39.5	7.5	70
76	32.5	76.0	70.5	38.0	4.5	68
74	30.0	74.8	70.0	36.0	1.0	66
72	27.5	73.2	69.0	34.0	...	64
70	24.5	71.8	68.0	32.0	...	63
68	21.5	70.0	67.0	30.0	...	62
66	18.5	68.5	66.0	28.0	...	61
64	15.5	66.8	65.0	25.5	...	59
62	12.5	65.0	63.5	23.0	...	57

Universitas Indonesia

Lampiran 6. Perhitungan Nilai UTS

Kode Sampel	Arah	Dimensi Awal (mm)		A_0 (mm ²)	l_0 (mm)	Δl sampel (mm)	Δl grafik (mm)	P_{UTS} (Kg)	UTS (Kg/mm ²)	UTS rata-rata (Kg/mm ²)
		t_0	w_0							
1	0	3,1	12,4	38,44	50	21,1	23,5	1460	37,98	37,74
2		3,1	12,7	39,37	50	21,55	23,75	1480	37,59	
3		3,1	13,2	40,92	50	21,45	24,25	1540	37,63	
4	45	3,1	13,3	41,23	50	26,5	29,75	1500	36,38	36,87
5		3,1	12,9	39,99	50	25,4	27,5	1480	37,01	
6		3,1	13,35	41,385	50	25,65	29,5	1540	37,21	
7	90	3,1	12,5	38,75	50	24,65	26	1510	38,97	38,21
8		3,1	12,8	39,68	50	25,45	27,25	1490	37,55	
9		3,1	13,2	40,92	50	25,35	27,5	1560	38,12	

Lampiran 7. Perhitungan Nilai n

Kode Sampel	Arah	Dimensi Awal (mm)		A ₀ (mm ²)	dL (mm)	P (Kg)	ε	σ (Mpa)	ε _t	σ _t (Mpa)	n	n rata-rata	n tiap arah
		t ₀	w ₀										
1		3,1	12,4	38,44	10	1260	0,2	321,42	0,18	385,71	0,47	0,50	
					15	1380	0,3	352,04	0,26	457,65	0,52		
					20	1460	0,4	372,44	0,34	521,42	0,49		
2	0	3,1	12,7	39,37	10	1260	0,2	313,83	0,18	376,60	0,49	0,51	0,49
					15	1390	0,3	346,21	0,26	450,07	0,52		
					20	1470	0,4	366,14	0,34	512,59	0,50		
3		3,1	13,2	40,92	10	1340	0,2	321,12	0,18	385,34	0,42	0,46	
					15	1440	0,3	345,08	0,26	448,60	0,52		
					20	1520	0,4	364,25	0,34	509,95	0,46		
4		3,1	13,3	41,23	10	1220	0,2	290,16	0,18	348,19	0,52	0,52	
					15	1360	0,3	323,46	0,26	420,49	0,53		
					20	1440	0,4	342,48	0,34	479,48	0,52		
5	45	3,1	12,9	39,99	10	1240	0,2	304,06	0,18	364,87	0,47	0,50	0,51
					15	1360	0,3	333,49	0,26	433,53	0,53		
					20	1440	0,4	353,10	0,34	494,35	0,50		
6		3,1	13,35	41,385	10	1260	0,2	298,55	0,18	358,26	0,47	0,52	
					15	1380	0,3	326,99	0,26	425,08	0,58		
					20	1480	0,4	350,68	0,34	490,95	0,51		

(Lanjutan)

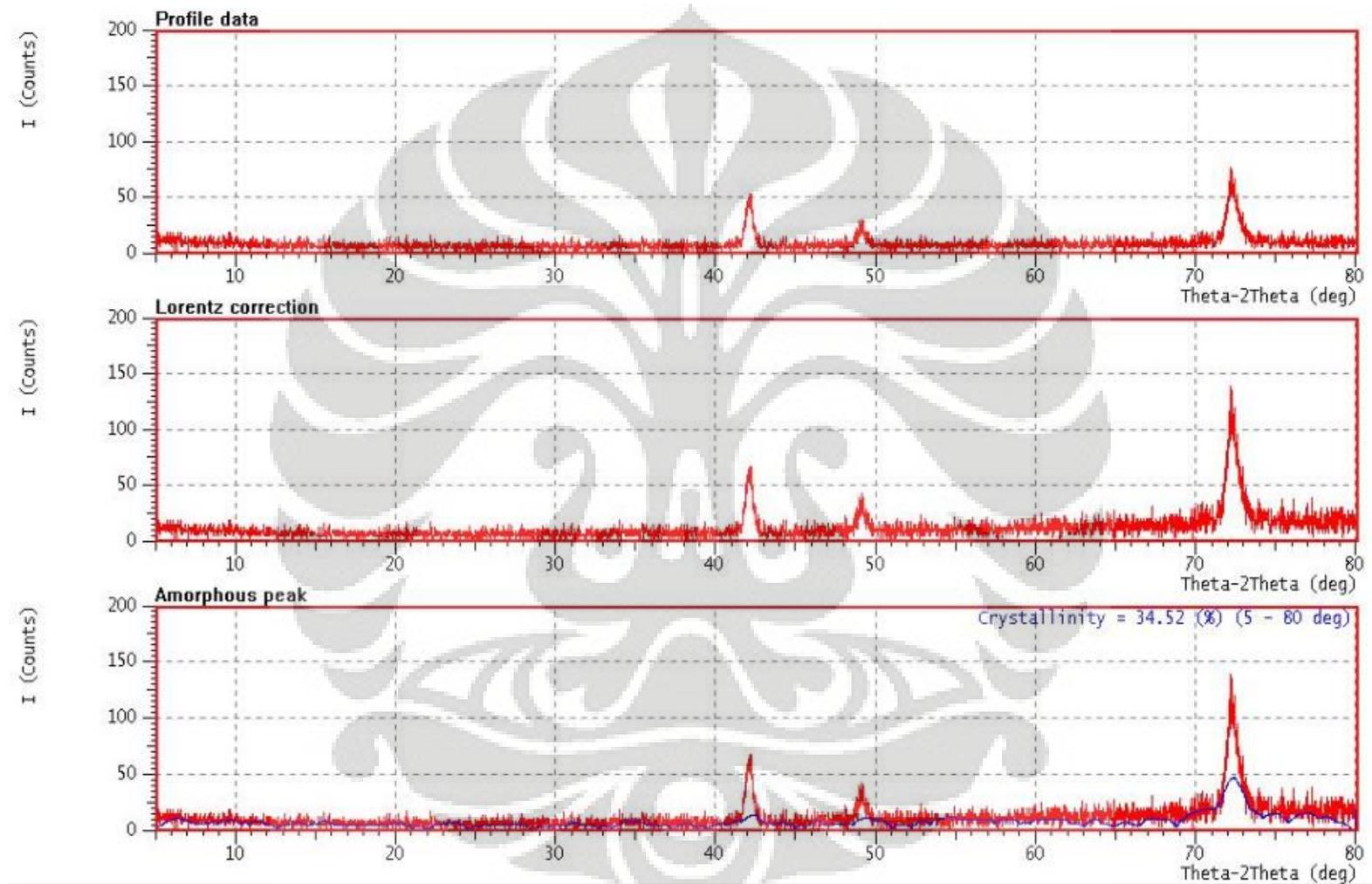
7	3,1	12,5	38,75	10	1280	0,2	323,91	0,18	388,70	0,51	0,50		
				15	1420	0,3	359,34	0,26	467,15	0,49			
				20	1490	0,4	377,06	0,34	527,88	0,50			
8	90	3,1	12,8	39,68	10	1240	0,2	306,44	0,18	367,73	0,47	0,50	0,50
					15	1360	0,3	336,09	0,26	436,92	0,53		
					20	1440	0,4	355,86	0,34	498,21	0,50		
9	3,1	13,2	40,92	10	1300	0,2	311,53	0,18	373,84	0,50	0,51		
				15	1440	0,3	345,08	0,26	448,60	0,52			
				20	1520	0,4	364,25	0,34	509,95	0,51			

Universitas Indonesia

Lampiran 8. Perhitungan Nilai r dan Δr

Kode Sampel	Arah	Dimensi Awal (mm)		A_0 (mm ²)	Dimensi Akhir (mm)		$\ln (w_f/w_0)$	$\ln (t_f/t_0)$	$\ln (w_f/w_0) : \ln (t_f/t_0)$	r tiap arah	Nilai r	Nilai Δr
		t_0	w_0		t_f	w_f						
1	0	3,1	12,85	39,84	3	12,2	-0,052	-0,033	1,58	1,75	1,58	0,24
2		3,1	12,9	39,99	3	12,1	-0,064	-0,033	1,95			
3		3,1	12,7	39,37	3	12	-0,057	-0,033	1,73			
4	45	3,1	13,1	40,61	3	12,5	-0,047	-0,033	1,43	1,46	1,58	0,24
5		3,1	12,6	39,06	3	12	-0,049	-0,033	1,49			
6		3,1	12,9	39,99	3	12,3	-0,048	-0,033	1,45			
7	90	3,1	13,35	41,39	3	12,5	-0,066	-0,033	2,01	1,65	1,58	0,24
8		3,1	13,1	40,61	3	12,5	-0,047	-0,033	1,43			
9		3,1	13,35	41,39	3	12,7	-0,050	-0,033	1,52			

Lampiran 9. Hasil Uji Difraksi Sinar X Sampel Canai Dingin



(Lanjutan)

crystal system:

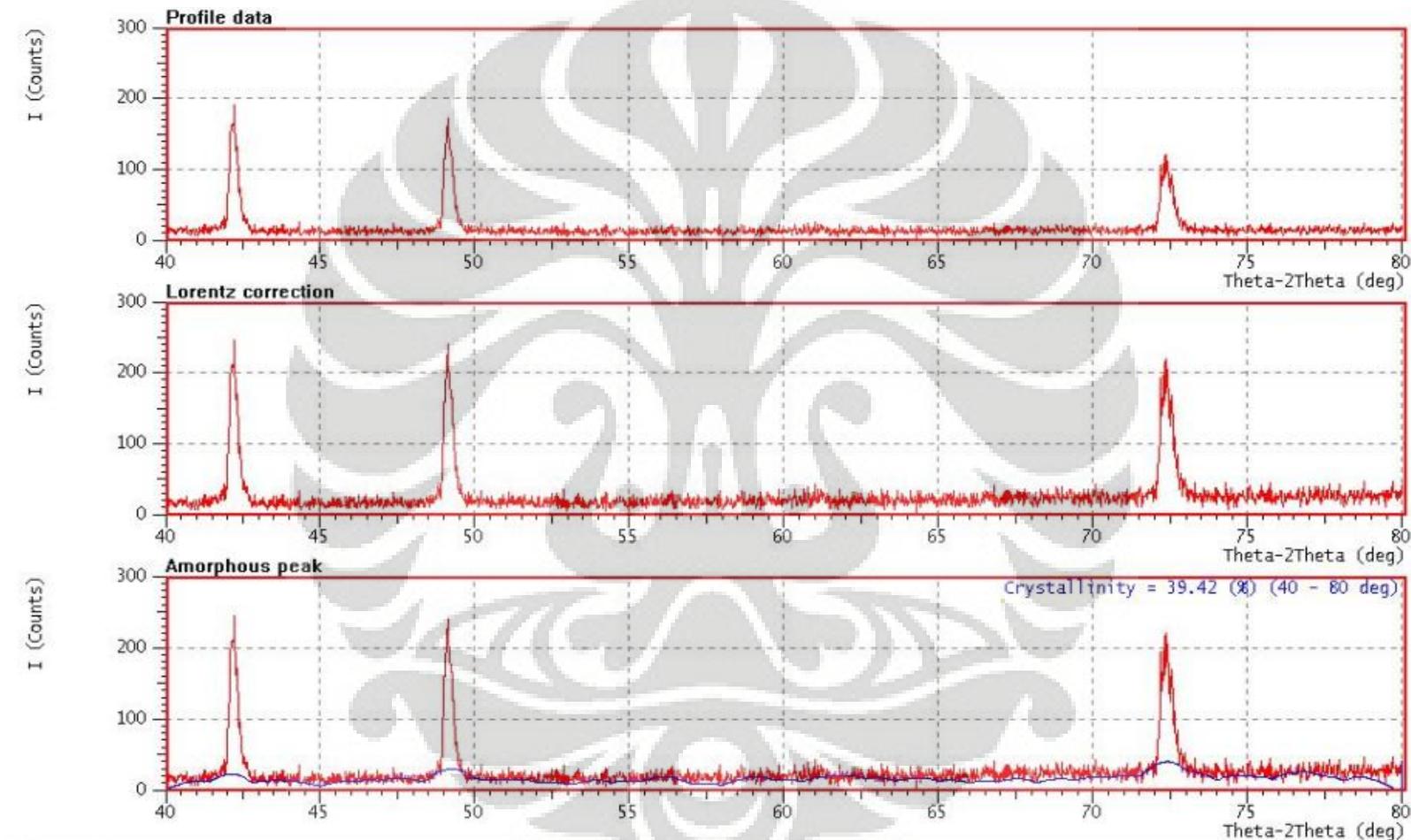
X-ray
target :
wavelength:

lattice constants
a = (Å)
b = (Å)
c = (Å)
alpha = (deg)
beta = (deg)
gamma = (deg)

no.	d	angle	H	K	L
1	3.6771	24.1847	1	0	0
2	2.6001	34.4664	1	1	0
3	2.1229	42.5500	1	1	1
4	1.8385	49.5400	2	0	0
5	1.6444	55.8649	2	1	0
6	1.5012	61.7464	2	1	1
7	1.3000	72.6724	2	2	0
8	1.2257	77.8739	3	0	0
9	1.1628	82.9756	3	1	0
10	1.1087	88.0217	3	1	1
11	1.0615	93.0524	2	2	2
12	1.0198	98.1069	3	2	0
13	0.9827	103.2259	3	2	1
14	0.9193	113.8493	4	0	0
15	0.8918	119.4789	4	1	0

Sample : 3f0t

Lampiran 10. Hasil Uji Difraksi Sinar X Sampel Setelah Anil



(Lanjutan)

crystal system:

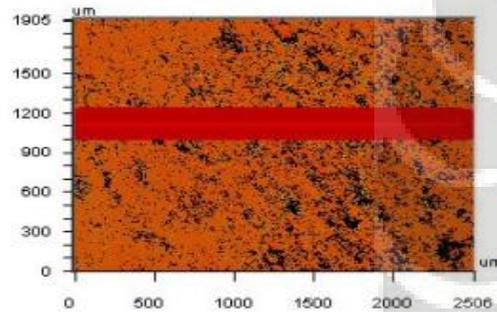
X-ray
target :
wavelength:

lattice constants
a = (Å)
b = (Å)
c = (Å)
alpha = (deg)
beta = (deg)
gamma = (deg)

no.	d	angle	H	K	L
1	3.6764	24.1894	1	0	0
2	2.5996	34.4731	1	1	0
3	2.1225	42.5584	1	1	1
4	1.8382	49.5500	2	0	0
5	1.6441	55.8764	2	1	0
6	1.5009	61.7593	2	1	1
7	1.2998	72.6884	2	2	0
8	1.2255	77.8914	3	0	0
9	1.1626	82.9947	3	1	0
10	1.1085	88.0426	3	1	1
11	1.0613	93.0752	2	2	2
12	1.0196	98.1318	3	2	0
13	0.9825	103.2532	3	2	1
14	0.9191	113.8825	4	0	0
15	0.8916	119.5160	4	1	0

Sample : 3f2t

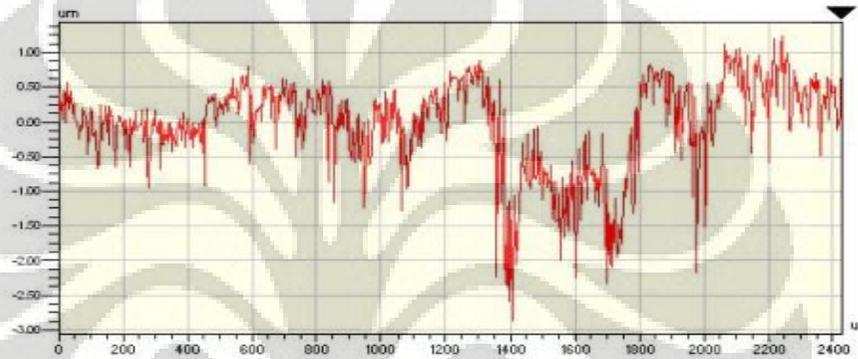
Lampiran 11. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Sampel Canai Dingin



	Delta		
X	20.46	2444.80	2424.34 um
Y	1113.86	1113.86	0.00 um
Ht	0.39	1.12	0.73 um
Dist		2424.34	um
Angle		0.00	°

Title:

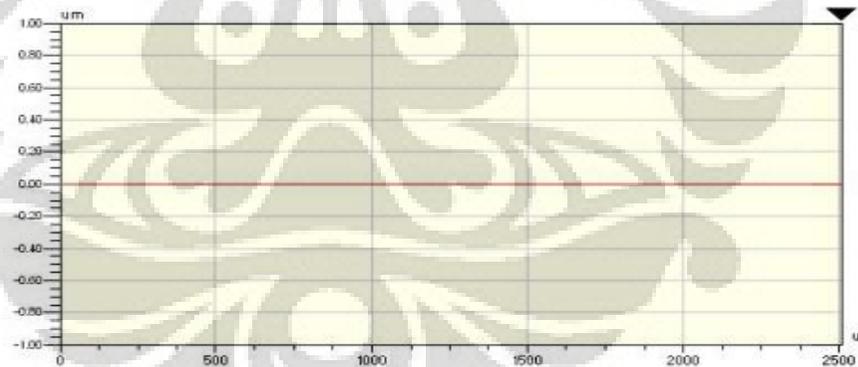
2 Point Profile



Rq	0.67 um
Ra	0.50 um
Rt	4.09 um
Rp	1.23 um
Rv	-2.86 um

Angle	-10.03 urad
Curve	-
Terms	None
Avg Ht	-0.04 um
Area	-106.14 um ²

(Inactive)

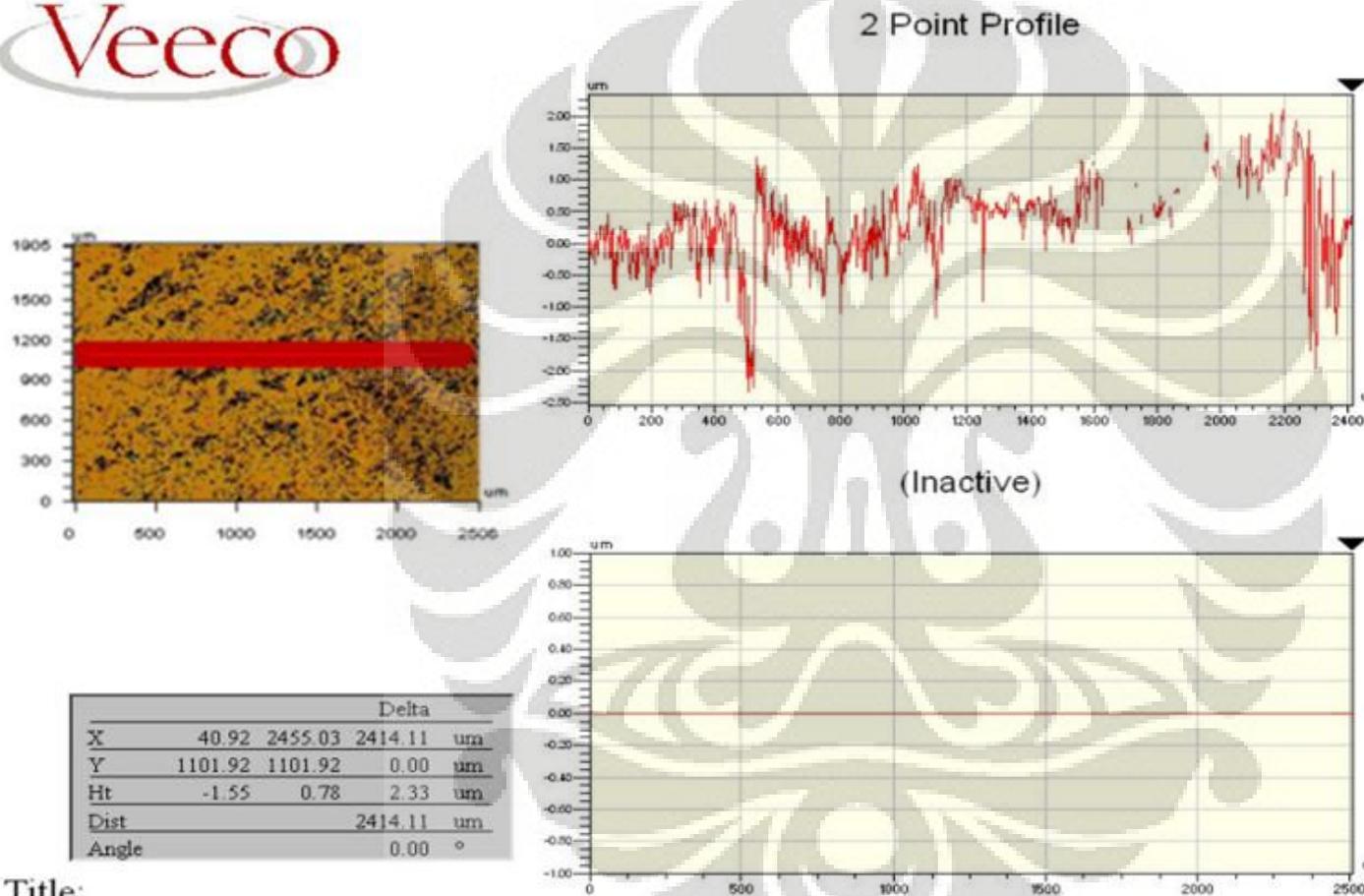


Rq	0.00 um
Ra	0.00 um
Rt	0.00 um
Rp	0.00 um
Rv	0.00 um

Angle	0.00 mrad
Curve	None
Terms	None
Avg Ht	0.00 um
Area	0.00 um ²

Universitas Indonesia

Lampiran 12. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Sampel Setelah Anil



Rq	0.65 um
Ra	0.49 um
Rt	4.44 um
Rp	2.12 um
Rv	-2.32 um

Angle	131.83 urad
Curve	-
Terms	None
Avg Ht	0.34 um
Area	821.88 um2

Rq	0.00 um
Ra	0.00 um
Rt	0.00 um
Rp	0.00 um
Rv	0.00 um

Angle	0.00 mrad
Curve	0.00 um
Terms	None
Avg Ht	0.00 um
Area	0.00 um2

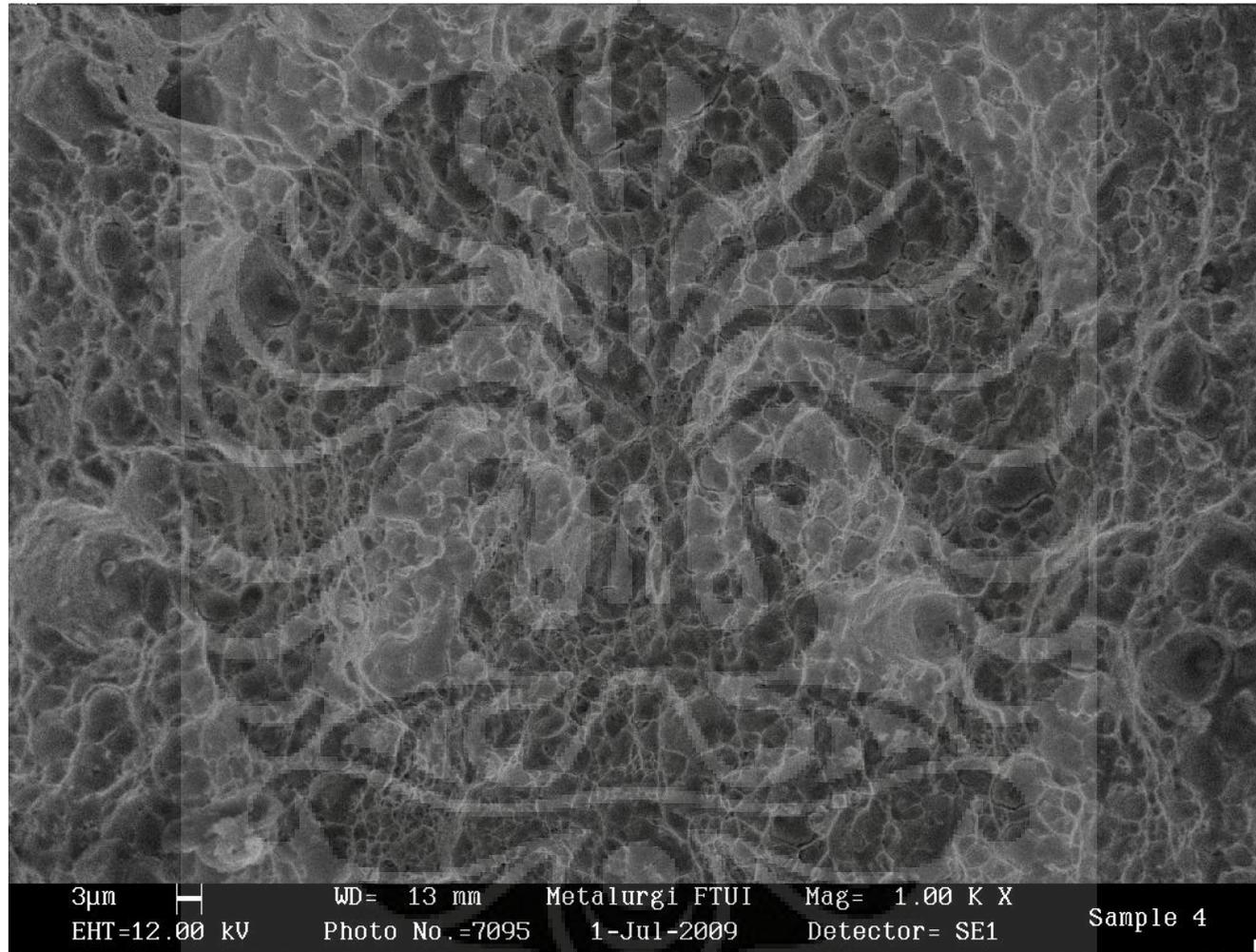
Title:

Universitas Indonesia

Lampiran 13. Hasil Uji SEM Perpatahan Uji Tarik Arah 0

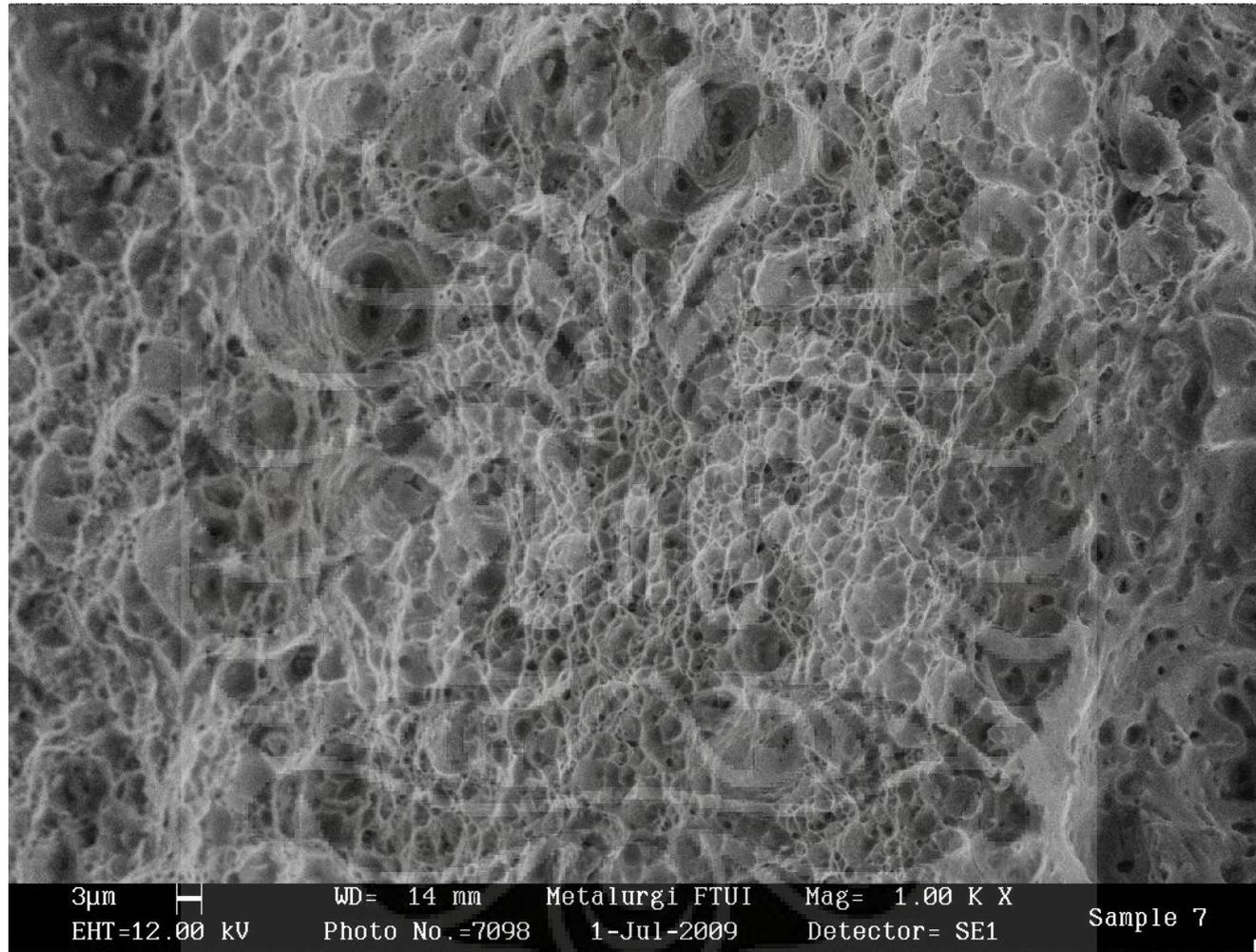


Lampiran 14. Hasil Uji SEM Perpatahan Uji Tarik Arah 45



Universitas Indonesia

Lampiran 15. Hasil Uji SEM Perpatahan Uji Tarik Arah 90



Universitas Indonesia

Lampiran 16. Tabel Standar Industri

 BADAN PENGKALIAN DAN PENERAPAN TEKNOLOGI (BPPT) P3TIP - TIRBR	KODE TU / PROYEK : 01.6401.A.d / PPK
	NO. DOKUMEN : HTC-007
	HALAMAN : 13 DARI 29

Tabel 1b. Material Properties For Small Arm Ammunitions

NO	MATERIAL	DIMENSION (mm)	HARDNESS (HB)	GRAIN SIZE (mm)	TENSILE STRENGTH (kg/mm ²)	CHEMICAL COMPOSITION (%)	APPLIED
1	CuZn10	1 ^{-0,02} X 30 ^{+0,2} X 2000 ⁺¹⁰	75-90	0,025-0,060	± 32	Cu=89-91; Sn=max.0,03; Pb=max.0,05;	Bullet jacket Cal. 5,56 mm
2	CuZn10	1,2 ^{+0,025} X 80 ^{+0,1} X 2120 ⁺¹⁰	80-90	0,015-0,045	26-31	Zn= remainder; Ni=max.0,20; Sb=max.0,01; Fe=max.0,05;	Bullet jacket Cal. 7,62 mm
3	CuZn10	2,5 ^{+0,05} X 37 ^{+0,2} X 2000 ⁺¹⁰ -0,3	75-90	0,040-0,100	± 32	As=max.0,02; Bi=max.0,04; Al=max.0,03	Bullet jacket Cal. 12,7 mm
4	CuZn28	0,9 ^{+0,02} X 69 ^{+0,5} X 2110	75-90	0,040-0,100	28-36	Cu=69,5-72 Zn=remainder	Bullet jacket Cal. 9 mm
5	CuZn28	3,6 ^{+0,04} X 99 ^{+0,5} X 2120 ^{+0,5}	75-90	0,035-0,080	28-36	Fe=max.0,05 Sn=max.0,03	Catridge case Cal. 7,62 mm
6	CuZn28	2,9 ^{+0,025} X 66 ^{+0,5} X 2110 ^{+0,5}	70-90	0,040-0,100	28-36	Ni=max.0,20 As=max.0,02	Catridge case Cal. 9 mm
7	CuZn28	3,1 ^{+0,02} X 41 ^{+0,2} X 2000 ⁺¹⁰	75-90	0,030-0,070	28-36	Pb=max.0,05 Sb=max.0,01 Bi=max.0,04 Al=max.0,03	Catridge case Cal. 5,56 mm
8	CuZn28	7,2 ^{+0,05} X Ø 38 ^{+0,1} (disc)	55-65	0,080-0,140	-		Catridge case Cal. 12,7 mm