



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PROSES ANIL REKRISTALISASI TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIS PELAT KUNINGAN
70/30 YANG MENGANDUNG ALUMINIUM KURANG DARI 1%
HASIL CANAI DINGIN**

SKRIPSI

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

**RESKI TAUFIK WASTIYANTO
0606029523**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI 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 : Reski Taufik Wastiyanto

NPM : 0606029523

Tanda Tangan :

Tanggal : 30 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Reski Taufik Wastiyanto

NPM : 06029523

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material.

Judul Skripsi : Pengaruh Proses Anil Rekrystalisasi Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Pelat Kuningan 70/30 Yang Mengandung Aluminium Kurang Dari 1% 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 1 : Dr. Ir. Winarto, M.Sc (.....)

Penguji 2 : Prof. Dr. Ir. Eddy S Siradj, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok, Universitas Indonesia

Tanggal : 30 Desember 2009

KATA PENGANTAR

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

1. Dr. Ir. Dedi Priadi DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Dr. Ir. Winarto M.Sc dan Prof. Dr. Ir. Eddy S. Siradj, M.Eng selaku penguji pada penelitian kali ini.
3. Bapak Mirza Wibisono, yang telah banyak membantu baik dalam bentuk pendanaan maupun tenaga, untuk membantu saya mendapatkan data penelitian.
4. Direksi, manajer produksi dan semua personil unit produksi PT. Jaya Sentosa Subur Terus (PT. JSST) Surabaya, yang telah banyak membantu dalam pembuatan sampel penelitian.
5. Semua Staff Laboratorium Departemen Metalurgi dan Material UI, yang telah membantu dalam melakukan pengujian penelitian.
6. Pimpinan dan personil sekretariat Departemen metalurgi dan Material, FTUI atas dukungan dalam pembuatan surat
7. Sahabat saya Aridho Obstrian, yang telah banyak membantu saya dalam melakukan penelitian ini.
8. Semua rekan-rekan mahasiswa Departemen Metalurgi dan Material terutama angkatan 2006.

9. Orang Tua dan semua keluarga, yang secara terus menerus memberikan dukungan motivasi, untuk tetap semangat dalam masa kuliah dan penyelesaian tugas akhir.
10. Semua pihak terkait yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan dukungan dan kemudahan dalam menyelesaikan perkuliahan dan tugas akhir ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu metalurgi dan material ke depan. Kami menyadari bahwa sebagai manusia tentunya isi penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangannya, mudah-mudahan untuk penyempurnaannya, dapat digunakan sebagai bahan untuk dilanjutkan oleh peneliti lainnya, sehingga semakin didapatkan hasil penelitian yang lebih lengkap, dan dapat dimanfaatkan oleh industri terkait di dalam negeri untuk pengembangan teknologi.

Depok, 30 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 : Reski Taufik Wastiyanto
NPM : 0606029523
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian 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 yang Mengandung Aluminium Kurang Dari 1% 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 : Depok
Pada tanggal : 30 Desember 2009

Yang menyatakan

(Reski Taufik Wastiyanto)

ABSTRAK

Nama : Reski Taufik Wastiyanto
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Proses Anil Rekristalisasi Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Pelat Kuningan 70/30 yang Mengandung Aluminium Kurang dari 1 % Hasil Canai Dingin.

Masalah utama industri pelat kuningan di Indonesia adalah penguasaan teknologi *rolling*. Ada banyak faktor yang menentukan dalam teknologi ini, salah satu faktor terpenting adalah proses anil rekristalisasi. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan karakteristik pelat kuningan 70/30 dengan kandungan Al < 1% yang sesuai dengan standar industri.

Beberapa pengujian telah dilakukan untuk mencapai tujuan tersebut. Pengujian awal (kekerasan dan besar butir) dilakukan untuk menentukan temperatur dan waktu tahan yang optimal. Setelah mendapatkan variabel optimal, dilakukan uji tarik anisotropi, SEM, kekasaran permukaan dan difraksi sinar x.

Hasil pengujian awal didapatkan proses anil optimal dengan variabel temperatur 600 °C dan waktu tahan 3 menit dengan nilai kekerasan 89 HVN dan besar butir 55 µm. Dari pengujian Tarik diperoleh nilai koefisien pengerasan regang ($n = 0,5$), anisotropi normal ($r = 1,7$), dan anisotropi planar ($\Delta r = 0,05$). Kekasaran permukaan menurun dari 0,42 µm menjadi 0,32 µm setelah anil. Hasil difraksi tidak menunjukkan perubahan bidang proyeksi akan tetapi ada perbedaan sudut pada puncak intensitas tertingginya.

Dari semua hasil pengujian disimpulkan bahwa setelah dilakukan proses anil rekristalisasi temperatur 600 °C dan waktu tahan 3 menit pada pelat kuningan 70/30 dengan kandungan Al < 1% untuk aplikasi selongsong peluru memenuhi standar yang ditentukan oleh industri.

Kata Kunci : Anil rekristalisasi, besar butir, kekerasan, anisotropi, kekasaran permukaan dan difraksi sinar x.

ABSTRACT

Name : Reski Taufik Wastiyanto
Study Program : Teknik Metalurgi dan Material
Title : The Effect of Annealed Recrystallization Process on Microstructure and Mechanical Properties Cold Rolled Brass 70/30 Plate with Added Aluminium Less Than 1%.

Main problem of brass plate industry in Indonesia is the controlling of rolling technology. There are many factors that determine in this technology, one of the important factors is anneal recrystallization process. The purpose of this study is to obtain characteristic of 70/30 brass plate containing aluminium less than 1% which is suitable with industrial standard.

Several testings were conducted to reach this purpose. The initial testings (hardness and grain size) are done to determine optimal temperature and holding time. After getting a optimum variables, then applied anisotropy tensile, SEM, surface roughness and X-ray diffraction testing.

The initial testing result is obtained optimal anneal process with variable temperature 600°C and holding time 3 minute with value of hardness 89 HVN and grain size $\pm 55 \mu\text{m}$. From tensile testing is obtained strain hardening exponent ($n = 0,5$), normal anisotropy ($r = 1,7$) and planar anisotropy coefficient ($\Delta r = 0,05$). Surface roughness is decreased from $0,42 \mu\text{m}$ to $0,32 \mu\text{m}$ after annealed process. X-ray diffraction result did not show change in projection plane but there is a different angle of peak intensity.

From all testing results were concluded that after anneal recrystallization process temperature 600°C and holding time 3 minute on 70/30 brass plate containing Al less than 1% for cartridge case application was satisfied with industrial standard.

Keyword : *Anneal recrystallization*, grain size, hardness, anisotropy, surface roughness, x-ray diffraction.

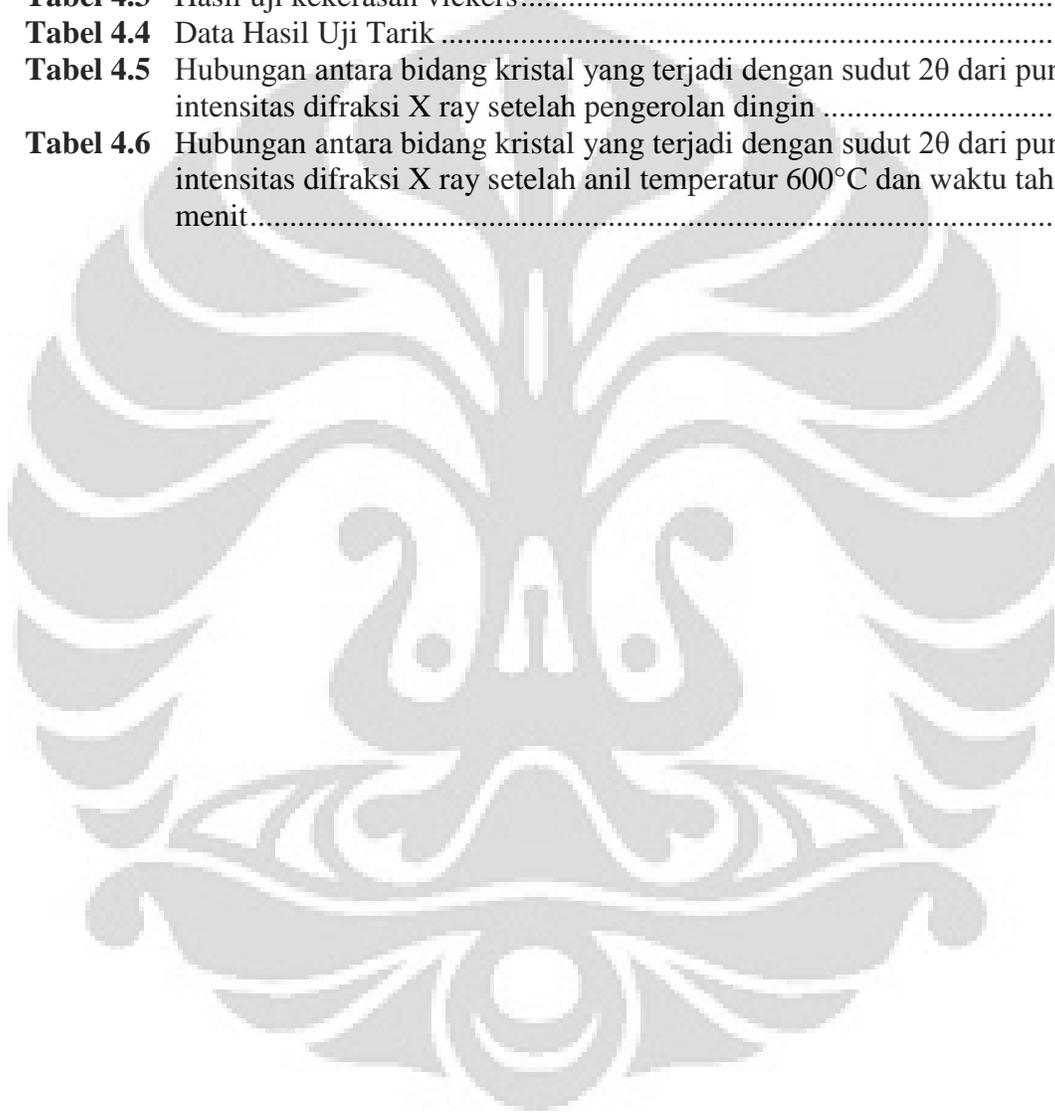
DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	vi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	2
1.3.1 Material	2
1.3.2 Parameter Penelitian.....	3
1.3.3 Tempat Penelitian.....	3
1.4 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Tembaga dan Paduannya.....	4
2.2 Kuningan	5
2.2.1 Diagram Kesetimbangan Kuningan (Cu-Zn)	5
2.2.2 Sistem Penamaan Kuningan.....	6
2.2.3 Kuningan 70/30	8
2.2.4 Pengaruh Unsur-Unsur Paduan	8
2.3 Anil Rekristalisasi	11
2.3.1 Pemulihan (<i>Recovery</i>)	12
2.3.2 Rekristalisasi	13
2.3.3 Kinetika Rekristalisasi.....	16
2.3.4 Pertumbuhan Butir (Grain Growth)	17
2.4 Pengujian Tarik Uniaksial	17
2.4.1 Kurva Tegangan dan Regangan	18
2.4.2 Kurva Tegangan dan Regangan Sesungguhnya	19
2.4.3 Koefisien Pengerasan Regang (n)	19
2.4.4 Koefisien Anisotropi Normal (r)	20
2.4.5 Koefisien Anisotropi Planar (Δr)	21
2.5 Kekasaran permukaan	21
2.6 Difraksi Sinar X	24
2.6.1 Sumber Dan Sifat Sinar X	26

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Alat Dan Bahan	30
3.2.1 Bahan.....	30
3.2.2 Peralatan	30
3.3 Prosedur Penelitian.....	31
3.3.1 Proses Pengecoran.....	31
3.3.2 Proses Pemanasan (Anil).....	32
3.3.3 Pengujian Komposisi.....	34
3.3.3 Preparasi Sampel Metalografi	35
3.3.4 Penghitungan Besar Butir.....	37
3.3.5 Pengujian Kekerasan	38
3.3.6 Pengujian Tarik Anisotropi	39
3.3.7 Pengujian Kekasaran	41
3.3.8 Pengujian Tekstur via difraksi X-ray	42
3.3.9 Pengujian SEM.....	43
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1 Komposisi Kimia	44
4.2 Struktur Mikro.....	45
4.2.1 Kondisi Setelah Pengerolan	46
4.2.2 Kondisi Anil Waktu Tahan 3 menit dengan Temperatur 500 °C	48
4.2.3 Kondisi Anil Waktu Tahan 3 menit dengan Temperatur 600 °C	50
4.2.4 Kondisi Anil Waktu Tahan 3 menit dengan Temperatur 700 °C	52
4.2.5 Kondisi Anil Temperatur 600 °C dengan Waktu Tahan 2 Menit.....	54
4.2.6 Kondisi Anil Temperatur 600 °C dengan Waktu Tahan 3 Menit.....	56
4.2.7 Kondisi Anil Temperatur 600 °C dengan Waktu Tahan 4 Menit.....	57
4.2.8 Hubungan Grafik Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Anil Terhadap Besar Butir.....	59
4.3 Kekerasan (<i>Hardness</i>).....	61
4.4 Tarik (<i>Tensile</i>).....	65
4.4.1 Pemuluran (<i>Elongation</i>)	65
4.4.2 Kekuatan Tarik Maksimum (UTS)	66
4.4.3 Koefisien pengerasan regang (<i>strain hardening exponent</i>).....	66
4.4.4 Koefisien anisotropi normal (r)	67
4.4.5 Koefisien Anisotropi Planar (Δr)	68
4.5 Permukaan Patahan (<i>Fractrografi</i>) Hasil Uji Tarik.....	68
4.6 Kekasaran Permukaan (<i>Surface Roughness</i>).....	70
4.7 Difraksi Sinar X	72
BAB 5 KESIMPULAN	75
5.1 Kesimpulan	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Ringkasan diagram kesetimbangan Cu-Zn.....	5
Tabel 2.2	Sifat mekanik kuningan 70/30.....	8
Tabel 3.1	Dimensi spesimen uji tarik.....	40
Tabel 4.1	Hasil pengujian komposisi	44
Tabel 4.2	Hasil pengukuran besar butir.....	45
Tabel 4.3	Hasil uji kekerasan vickers.....	61
Tabel 4.4	Data Hasil Uji Tarik	65
Tabel 4.5	Hubungan antara bidang kristal yang terjadi dengan sudut 2θ dari puncak intensitas difraksi X ray setelah pengerolan dingin	73
Tabel 4.6	Hubungan antara bidang kristal yang terjadi dengan sudut 2θ dari puncak intensitas difraksi X ray setelah anil temperatur 600°C dan waktu tahan 3 menit.....	74



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	<i>Thermomechanical control process</i>	2
Gambar 2.1	Diagram kesetimbangan Cu-Zn dan sifat mekanik <i>brass</i>	5
Gambar 2.2	Kekerasan pada tembaga dengan kandungan Al yang berbeda. (a) Berdasarkan derajat deformasi sebelum anil, (b) Berdasarkan derajat deformasi setelah anil	10
Gambar 2.3	Konduktivitas listrik Cu dengan Al berbeda (a) sebelum anil dan (b) setelah anil	10
Gambar 2.4	<i>Softening mechanism</i>	13
Gambar 2.5	Perubahan struktur dislokasi saat <i>recovery</i>	13
Gambar 2.6	Hubungan besar butir, temperatur anil dan % CW.....	14
Gambar 2.7	Perbedaan rekristalisasi dinamik dan statis	14
Gambar 2.8	Mikrostruktur dari <i>α-brass sheet</i> hasil canai dingin 92%-93% dan dianil pada temperatur dan waktu : (a) <i>as-rolled</i> , (b) 18 jam pada 252 °C, (c) 18.5 jam pada 297 °C, (d) 22 jam pada 353 °C, (e) 18 jam pada 403 °C, (f) 18.5 jam pada 452 °C.....	15
Gambar 2.9	Perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik akibat anil.....	17
Gambar 2.10	Kurva tegangan-regangan rekayasa dari sebuah benda uji yang terbuat dari baja ulet	18
Gambar 2.11	Kurva tegangan regangan rekayasa dan sesungguhnya.....	19
Gambar 2.12	Ilustrasi kekasaran permukaan, gelombang dan bentuk umum permukaan	22
Gambar 2.13	Hubungan regangan, besar butir dan kekasaran permukaan	23
Gambar 2.14	Skema tabung sinar X.....	26
Gambar 2.15	Pemantulan sinar x oleh bidang (hkl) dari kristal.....	27
Gambar 2.16	Contoh pola difraksi pada 2θ.....	28
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	29
Gambar 3.2	Diagram alir pembuatan sampel.....	31
Gambar 3.3	Sampel hasil pengecoran dan pengerolan.....	32
Gambar 3.4	Proses Anil Rekristalisasi	32
Gambar 3.5	Dapur Naberthem	33
Gambar 3.6	Sampel pengujian komposisi kimia dengan <i>spectrometer</i>	34
Gambar 3.7	Arah pemotongan sampel	35
Gambar 3.8	a. Contoh cetakan mounting, b. Hasil mounting	35
Gambar 3.9	Mesin Amplas.....	36
Gambar 3.10	Mesin poles.....	37
Gambar 3.11	Mikroskop optik	37
Gambar 3.12	Contoh prinsip pengujian metode planimetri	38
Gambar 3.13	Alat uji vickers	39
Gambar 3.14	Skema pengujian kekerasan vickers	39
Gambar 3.15	Mesin uji tarik <i>hoytom</i>	40
Gambar 3.16	Arah anisotropi sampel dan bentuk spesimen uji tarik.....	40
Gambar 3.17	Sampel uji tarik.....	41

Gambar 3.18	Peralatan pengujian kekasaran permukaan.....	42
Gambar 3.19	XRD 6000 Shimadzu untuk pengujian difraksi sinar x.....	43
Gambar 3.20	Sampel SEM.....	43
Gambar 4.1	Menunjukkan butir pipih pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	46
Gambar 4.2	Menunjukkan potongan melintang butir pipih pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	46
Gambar 4.3	Menunjukkan potongan memanjang butir pipih dilihat dari atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	46
Gambar 4.4	Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	48
Gambar 4.5	Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	48
Gambar 4.6	Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	48
Gambar 4.7	Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	50
Gambar 4.8	Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	50
Gambar 4.9	Menunjukkan butir bulat-bulat ini tidak beraturan menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	50
Gambar 4.10	Menunjukkan butir bulat yang menunjukkan telah terjadi pertumbuhan butir, selain itu terdapat fenomena <i>twinning</i> pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	52
Gambar 4.11	Menunjukkan butir bulat yang menunjukkan telah terjadi pertumbuhan butir, selain itu terdapat fenomena <i>twinning</i> pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	52
Gambar 4.12	Menunjukkan butir bulat yang menunjukkan telah terjadi pertumbuhan butir, selain itu terdapat sedikit fenomena <i>twinning</i> pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	52
Gambar 4.13	Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	54
Gambar 4.14	Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	54
Gambar 4.15	Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	54

Gambar 4.16	Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	56
Gambar 4.17	Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeC.....	56
Gambar 4.18	Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	56
Gambar 4.19	Menunjukkan butir bulat yang menunjukkan telah terjadi pertumbuhan butir pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	58
Gambar 4.20	Menunjukkan butir bulat yang menunjukkan telah terjadi pertumbuhan butir pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	58
Gambar 4.21	Menunjukkan butir bulat yang menunjukkan telah terjadi pertumbuhan butir pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl ₃	58
Gambar 4.22	Grafik pengaruh waktu tahan anil terhadap besar butir.....	59
Gambar 4.23	Grafik pengaruh temperatur anil terhadap besar butir.....	59
Gambar 4.24	Grafik hubungan waktu tahan anil terhadap kekerasan kuningan 70/30, Al < 1 %	61
Gambar 4.25	Grafik hubungan temperatur anil terhadap kekerasan kuningan 70/30, Al < 1 %	62
Gambar 4.26	Grafik hubungan besar butir dan kekerasan pada variabel waktu dan temperatur anil.....	64
Gambar 4.27	Permukaan patahan arah 0 ⁰ menunjukkan ciri-ciri bekas deformasi plastis terlebih dulu sebelum perpatahan yang berarti pelat ini <i>ductile</i> , dimana ada ciri-ciri dimpel. Perbesaran 1000X	69
Gambar 4.28	Permukaan patahan arah 45 ⁰ menunjukkan ciri-ciri bekas deformasi plastis terlebih dulu sebelum perpatahan yang berarti pelat ini <i>ductile</i> , dimana ada ciri-ciri dimpel. Perbesaran 1000X	69
Gambar 4.29	Permukaan patahan arah 90 ⁰ menunjukkan ciri-ciri bekas deformasi plastis terlebih dulu sebelum perpatahan yang berarti pelat ini <i>ductile</i> , dimana ada ciri-ciri dimpel. Perbesaran 1000X	69
Gambar 4.30	Kekasaran permukaan setelah pengerolan dingin menyebabkan permukaan pelat menjadi tinggi (kiri warna merah) beserta profil distribusi kekasaran (kanan)	71
Gambar 4.31	Kekasaran permukaan setelah proses anil menyebabkan kekasaran permukaan pelat turun (kiri warna kuning) beserta profil distribusi kekasaran (kanan).....	71
Gambar 4.32	Grafik perubahan kekasaran permukaan setelah pengerolan dan anil...	72
Gambar 4.33	Intensitas difraksi X Ray setelah pengerolan dingin	73
Gambar 4.34	Intensitas difraksi X Ray setelah anil temperatur 600°C dan waktu tahan 3 menit	74

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Uji Komposisi Kimia.....	79
Lampiran 2 : Konversi Nilai Kekerasan.....	80
Lampiran 3 : Sifat material untuk <i>small arm ammunition</i>	82
Lampiran 4 : Tabel Konversi Nilai G	83
Lampiran 5 : Penghitungan Besar Butir.....	84
Lampiran 6 : Penghitungan Kekerasan	85
Lampiran 7 : Penghitungan Uji Tarik Nilai UTS.....	86
Lampiran 8 : Penghitungan Nilai n	87
Lampiran 9 : Penghitungan Nilai r dan Δr	88
Lampiran 10 : Kekasaran Permukaan	89
Lampiran 11 : Data XRD	90
Lampiran 12 : Data mentah uji tarik n	92
Lampiran 13 : Grafik uji tarik n arah 0^0	94
Lampiran 14 : Grafik uji tarik n arah 45^0	96
Lampiran 15 : Grafik uji tarik n arah 90^0	98
Lampiran 16 : Data mentah uji tarik r.....	100
Lampiran 17 : Grafik uji tarik r arah 0^0	102
Lampiran 18 : Grafik uji tarik r arah 45^0	103
Lampiran 19 : Grafik uji tarik r arah 90^0	104

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Industri pelat kuningan dalam negeri pada saat melaksanakan proses produksi masih berdasarkan pengalaman dari pendahulu-pendahulunya. Mereka kurang memahami bahwa proses perlakuan panas dapat berguna sekali pada hasil produksi. Kelemahan yang paling menonjol adalah berasal dari penguasaan teknologi termomekanikal (rekayasa dari kombinasi proses pengerolan panas, pengerolan dingin dan perlakuan panas pelunakan), untuk mendapatkan pelat kuningan yang sesuai dengan persyaratan besar butir dan tekstur tertentu di dalam struktur mikronya.

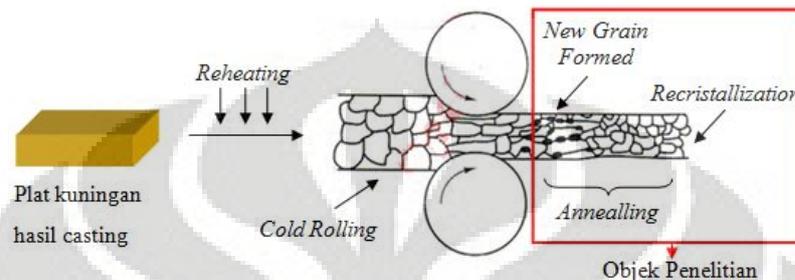
Pada proses termomekanikal (lihat Gambar 1.1) ukuran butir, sifat mekanis, mampu bentuk dan orientasi kristalnya dapat diatur sesuai dengan persyaratan aplikasi kulit yang diinginkan. Salah satu parameter penting dari proses termomekanikal adalah dengan mengontrol :

1. Temperatur
 2. Waktu tahan
 3. Besar deformasi canai / pengerolan panasnya
 4. Waktu tahan sebelum pendinginan / proses anil rekristalisasi
 5. Kecepatan pendinginan
- } *Reheating*
- } Kontrol besar butir

Variabel-variabel diatas sangat berpengaruh terhadap hasil yang didapatkan setelah proses selesai. Untuk itu perlu adanya suatu kontrol tertentu, baik pada saat reheating maupun besar butir. Akan tetapi biasanya penelitian difokuskan pada kontrol besar butir. Ini dikarenakan dengan mengontrol besar butir maka akan berpengaruh besar terhadap sifat mekanis, tekstur, dan mampu bentuk dari pelat kuningan tersebut.

Dalam proses termomekanikal tidak lepas dari pembuatan material kuningan dimana sering kali ditambahkan unsur paduan untuk meningkatkan sifat mekanis dan mampu bentuk dari kuningan tersebut. Biasanya unsur paduan yang ditambahkan adalah Al, Fe, Mn, Sn dan Pb. Pada penelitian kali ini dilakukan untuk melihat pengaruh dari proses anil terhadap sifat mekanis dan struktur mikro dari kuningan 70/30 yang memiliki kandungan aluminium <1%. Penambahan Al biasanya berpengaruh pada besar butir dan sifat mekanis dari pelat kuningan^[1]

Faktor yang berpengaruh pada proses termomekanikal yang tidak kalah pentingnya adalah proses canai. Pada umumnya canai dingin dilakukan pada kondisi ruang dan memberikan efek pengerasan kerja / *work hardening*. Untuk proses selanjutnya logam perlu dipulihkan ke kondisi awal dengan melakukan anil rekristalisasi. Dengan demikian keuletan logam akan meningkat dan proses pengubahan bentuk memberikan hasil yang baik.



Gambar 1.1 Thermomechanical control process.

1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas maka penelitian ini bertujuan untuk :

- Mengamati perubahan struktur mikro (besar butir) dan sifat mekanis (kekerasan) dari material pelat kuningan 70/30 yang mempunyai kandungan aluminium <1% setelah dilakukan proses anil rekristalisasi.
- Untuk mengetahui mampu bentuk dari pelat kuningan setelah anil rekristalisasi dengan melihat nilai koefisien anisotropi normal (r), pengerasan regang (n), anisotropi planar (Δr) dan kekasaran permukaan.
- Melihat kecenderungan bidang kristal pada difraksi sinar x yang menjadi dasar untuk mencari *pole figure* tekstur.
- Mendapatkan karakteristik kuningan 70/30, Al < 1% untuk aplikasi selongsong peluru (*cartridge case*) sesuai dengan standar industri pelat kuningan.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

1.3.1 Material

- Pelat Kuningan dengan kandungan aluminium <1 % (70 wt.% Cu dan 30 wt.% Zn) hasil canai dingin.

1.3.2 Parameter Penelitian

- a. Variasi waktu tahan anil rekristalisasi yaitu 2, 3 dan 4 menit dengan temperatur anil 600 °C.
- b. Variasi temperatur anil rekristalisasi yaitu 500, 600 dan 700 °C dengan waktu tahan 3 menit.

1.3.3 Tempat Penelitian

- a. Proses pengecoran dilakukan di PT. JSST.
- b. Pengujian komposisi dilakukan di Politeknik Bandung
- c. Pengujian tarik, kekerasan dan pengamatan mikrostruktur dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik dan Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- d. Analisa hasil patahan dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) di laboratorium SEM di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

1.4 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 Tembaga dan Paduannya

Tembaga umumnya dipadu dengan banyak elemen paduan. Karakteristik yang umum pada tembaga adalah adanya fasa α dan β . Fasa alpha (α) dalam semua paduan memiliki tipe mikrostruktur yang sama dan relatif tangguh dan ulet^[1]. Sedangkan fasa beta (β) muncul jika kandungan elemen paduan seperti Sn, Al, Zn dan sebagainya melebihi batas maksimum, sehingga akan muncul pada mikrostruktur dengan warna yang gelap. Selain itu fasa beta memiliki karakteristik kekakuan atau *stiffness* yang tinggi.

Tembaga dan paduannya umumnya dibagi menjadi menjadi dua yaitu adalah :

a. Paduan larutan padat (*solid solution alloys*)

Tembaga umumnya dibentuk dengan menambahkan elemen paduan dengan metode *solid solution*. Elemen yang termasuk sebagai paduan pembentuk *solid solution* antara lain Zn, Sn, Al, Si dan sebagainya. Dengan metode ini proses pengerasan dapat dicapai tanpa mengalami efek *brittleness* / kerapuhan. *Cartridge brass* merupakan salah satu material yang masuk dalam grup ini. Umumnya *cartridge brass* terdiri dari 30 % Zn dan tidak terdapat fasa beta didalamnya^[2].

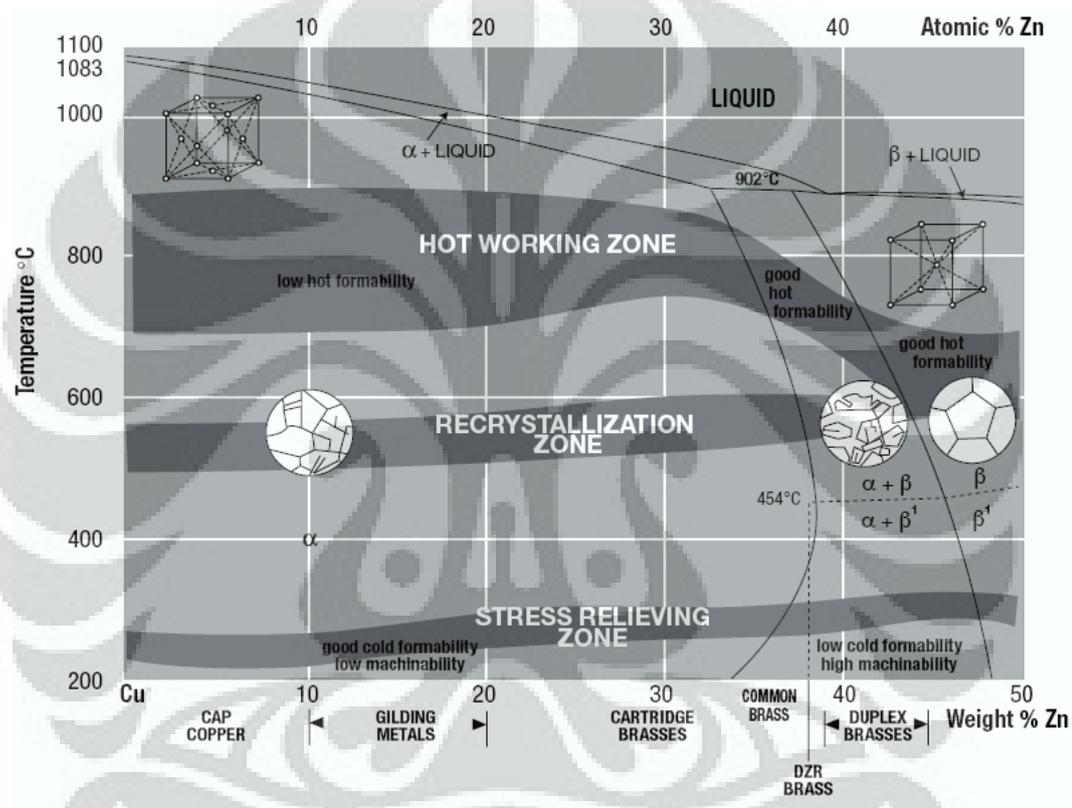
b. Paduan pengerasan dengan penuaan (*age hardenable alloys*)

Tembaga yang dibuat dengan metode age hardening menghasilkan sifat dengan kekuatan yang tinggi, tetapi hanya sebagian kecil dari *copper alloy* dibuat dengan metode *age hardenable*. *Beryllium copper* adalah salah satu paduan tembaga yang masuk kategori *age-hardenable copper alloy*. Selain itu ada C15000 (*zirconium copper*); C18200, C18400, dan C18500 (*chromium copper*); C19000 dan C19100 (*copper nickel phosphorus alloys*) dan C64700 (*copper nickel silicon alloy*)^[2].

2.2 Kuningan

2.2.1 Diagram Kesetimbangan Kuningan (Cu-Zn)

Kuningan merupakan paduan tembaga dengan unsur utama Zn. Kandungan seng dalam kuningan bervariasi yaitu dari 0 – 50 %. Dengan keadaan seperti ini kuningan memiliki sifat mekanik yang cukup luas, mudah dalam pengerjaannya, mempunyai variasi warna, dan ketahanan korosi yang tinggi dilingkungan air laut^[1]. Untuk lebih memahami karakteristik dan perbedaan dari kuningan maka perlu diketahui diagram fasa dari material ini, lihat Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram kesetimbangan Cu-Zn dan sifat mekanik brass^[1].

Diagram diatas dapat diringkas menjadi Tabel 2.1 sebagai berikut^[2] :

Tabel 2.1 Ringkasan diagram kesetimbangan Cu-Zn

Percentage Composition		Constituent just below the freezing point	Constituent after slow cooling to 400 ^o C
Copper	Zinc		
100 – 67.5	0 – 32.5	α	α
67.5 – 63	32.5 – 37	α + β	α
63 – 61	37 – 39	β	α
61 – 55.5	39 – 45.5	β	α + β'
55.5 – 50	45.5 – 50	β	β'
50 – 43.5	50 – 56.5	β	β' + γ
43.5 – 41	56.5 – 59	β + γ	β' + γ

Pada diagram kesetimbangan kuningan di atas dapat dilihat terdapat beberapa fasa yang terbentuk^[1] antara lain :

a. Fasa alpha (α)

Fasa alpha memiliki karakteristik sebagai berikut : (1) meningkatkan *tensile strength* dan *elongation*, (2) memiliki struktur FCC, (3) kelarutan maksimum dari seng adalah 37-39% pada temperatur 453 °C, (4) keberadaan fasa beta akan menurunkan elongasi dan meningkatkan *tensile strength*, sedangkan fasa gamma akan mengurangi kekuatan dan membuat material menjadi *brittle*.

b. Fasa beta (β)

Karakteristik dari fasa beta adalah : (1) meningkatkan kekuatan dan kekerasan dari kuningan, (2) memiliki struktur BCC yang *disordered* pada temperatur diatas 470 °C, akan tetapi akan berubah menjadi struktur yang *ordered* jika temperatur turun, ini dikarenakan transformasi atom seng dalam kisi dari acak (*random*) menjadi kisi yang teratur (*ordered lattice*).

c. Fasa gamma (γ)

Umumnya keberadaan fasa gamma dihindari, ini dikarenakan akan memberikan sifat keras dan rapuh pada paduan tembaga. Fasa gamma terbentuk disekitar garis horisontal peritektik kedua pada temperatur 834 °C antara solid β dan *residual liquid*. Fasa γ mempunyai karakteristik^[3] antara lain : (1) struktur kristal tipe *complex double cubic*, (2) bersifat keras dan rapuh. Biasanya paduan tembaga yang memiliki fasa γ adalah *brazing solder* yang memiliki kandungan Zn sekitar 50 %.

2.2.2 Sistem Penamaan Kuningan

Sistem penamaan dari kuningan didasarkan pada kandungan dari tembaga dan sengnya. Kuningan yang penting untuk dunia industri^[2] antara lain :

a. C 23000 - Red Brass (85 Cu, 15 Zn)

Paduan ini biasanya digunakan untuk ornament dan pelapis perhiasan karena warnanya yang menyerupai emas. Struktur mikronya lebih mengarah ke *dendritic*. Jika dilakukan pendinginan yang sangat lambat atau anil, akan

terjadi difusi dan membentuk butir *polyhedral* dengan komposisi yang seragam. Proses difusi tersebut dibantu oleh deformasi mekanik dengan *hot* atau *cold working* diikuti anil.

b. C 26000 - Cartridge Brass (70 Cu: 30 Zn)

Paduan ini sering digunakan untuk *cartridge case* yang membutuhkan keuletan yang tinggi dengan kekuatan yang cukup. Struktur berbentuk dendrit dengan fasa α yang lewat jenuh ketika pendinginan cepat. Fasa β tidak muncul dalam struktur hasil coran sampai kandungan seng tidak melebihi 32 %, kecuali ditambahkan Al atau Sn. Setelah anil paduan ini mengandung *homogeneous solid solution*, sehingga cocok untuk *cold working*.

c. C 28000 - Muntz Metal (60 Cu: 40 Zn)

Paduan ini merupakan kombinasi yang paling baik dari fasa alpha dan beta. Ketika pada temperatur 875 °C terbentuk struktur kristal beta. Selanjutnya diantara temperatur 770 dan 550 °C, fasa alpha mengendap disepanjang batas butir dari fasa beta. Pembentukan fasa alpha ini dapat dilakukan dengan pengerjaan panas pada rentang temperatur 700 – 600 °C dimana pada saat itu fasa alpha akan mengendap. Dengan adanya kedua fasa tersebut paduan ini memiliki pengerjaan dingin yang cukup baik dibawah temperatur 600 °C.

d. Brazing Solder (50 Cu: 50 Zn)

Paduan ini terbentuk jika dilakukan pendinginan lambat dan melewati daerah pendinginan yang mengandung fasa β yang homogen. Pada temperatur atmosfer akan terbentuk fasa β seluruhnya dengan 50 % Zn jika tidak ada pengotor, akan tetapi jika seng melebihi 50 % menyebabkan terbentuknya fasa γ yang sangat keras dan rapuh. Paduan ini juga memiliki *melting point* yang rendah^[1].

2.2.3 Kuningan 70/30

Berdasarkan standar, paduan ini sesuai dengan standar JIS C2600 dan ASM C26000. Sesuai standar komposisi kimia dari paduan ini adalah : Cu (68,5 – 71,5 %), Pb (0,07% max), Fe (0,05% max) dan sisanya Zn. Paduan ini sering digunakan untuk *cartridge case* yang membutuhkan keuletan yang tinggi dengan kekuatan yang cukup. Struktur berbentuk dendrit dengan fasa α yang lewat jenuh ketika pendinginan cepat. Fasa β tidak muncul dalam struktur hasil coran sampai kandungan seng tidak melebihi 32 %, kecuali ditambahkan Al atau Sn^[1].

Sifat khusus dari kuningan 70/30 dalam berbagai kondisi dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini :

Tabel 2.2 Sifat mekanik kuningan 70/30^[1]

Kondisi	0.1% PS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	BHN
Chill Cast	6	16	65	60
Hard rolled sheet	Over 25	30-40	10-15	150-200
Annealed sheet	6	20-23	65-75	60

Keterangan : PS = *Proof Stress*, TS = *Tensile Stress*, EL = *Elongation*, BHN = *Brinell hardness*.

Beberapa sifat lain dari kuningan 70/30 ini^[4] antara lain adalah : (1) temperatur anil antara 425 – 750 °C, (2) Temperatur *hot working* antara 650 – 850 °C, (3) Temperatur lebur atau *liquidus* 955 °C dan *solidus* 915 °C. Berikut ini beberapa sifat fisik dari kuningan 70/30^[12].

Density	0.308	lbs per cu. in. @ 68°F (annealed)
Modulus of Elasticity	16	x 10 ⁶ PSI Tension
Electrical Conductivity	28	% IACS @ 68°F (annealed)
Thermal Conductivity	70	BTU per sq. ft. per hr. @ 68°F
Coef. Of Thermal Expansion	11.1	inches/inch/ F x 10x ⁻⁶ from 68°F to 572°F

2.2.4 Pengaruh Unsur-Unsur Paduan

Unsur paduan yang umum ditambahkan pada kuningan 70/30 adalah sebagai berikut :

a. Pengaruh Besi (Fe)

Besi sering ditambahkan ke dalam paduan Cu-Zn karena memberikan efek sebagai penghalus butir dimana disini Fe akan menjadi tempat pengintian^[5]. Dengan memiliki butir yang halus maka akan meningkatkan kekuatan tarik dan

kekerasan karena dengan semakin banyak batas butir dislokasi semakin susah untuk bergerak^[6]. Besi memiliki kelarutan maksimal didalam kuningan sebesar 0.2 % baik kuningan jenis alpha maupun beta, tetapi jika kandungannya mencapai 0.35 % maka besi tersebut akan menyebabkan terbentuknya struktur *windmastatten*^[1]. Besi yang melebihi 1% maka akan beresiko terbentuknya *hardspot* selama pembentukan jika terdapat Si^[1].

b. Pengaruh Mangan (Mn)

Biasanya Mn ditambahkan sekitar 2 % ke dalam paduan 60/40 brass yang sering disebut *manganese bronze*. Dengan adanya Mn maka kelarutan Fe juga meningkat dalam paduan Cu-Zn. Kandungan Mn diatas 2.5 % akan menjadi tempat pengintian seperti Fe sehingga berfungsi sebagai penghalus butir. Akan tetapi dengan butir yang halus keuletan akan menurun^[1].

c. Pengaruh Seng (Zn)

Dalam kuningan seng merupakan paduan utama. Jenis kuningan yang terbentuk sangat tergantung pada kandungan sengnya, ini dikarenakan seng mempengaruhi persentase pembentukan fasa α , β dan γ . Kelarutan Zn dalam kuningan maksimal adalah 39 %. Fasa β belum terbentuk sampai mencapai maksimal 32 %, jika melebihi batas maksimum ini maka akan terbentuk fasa β . Untuk itu dengan meningkatnya kandungan Zn maka akan meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan, tetapi menurunkan keuletan^[1,4].

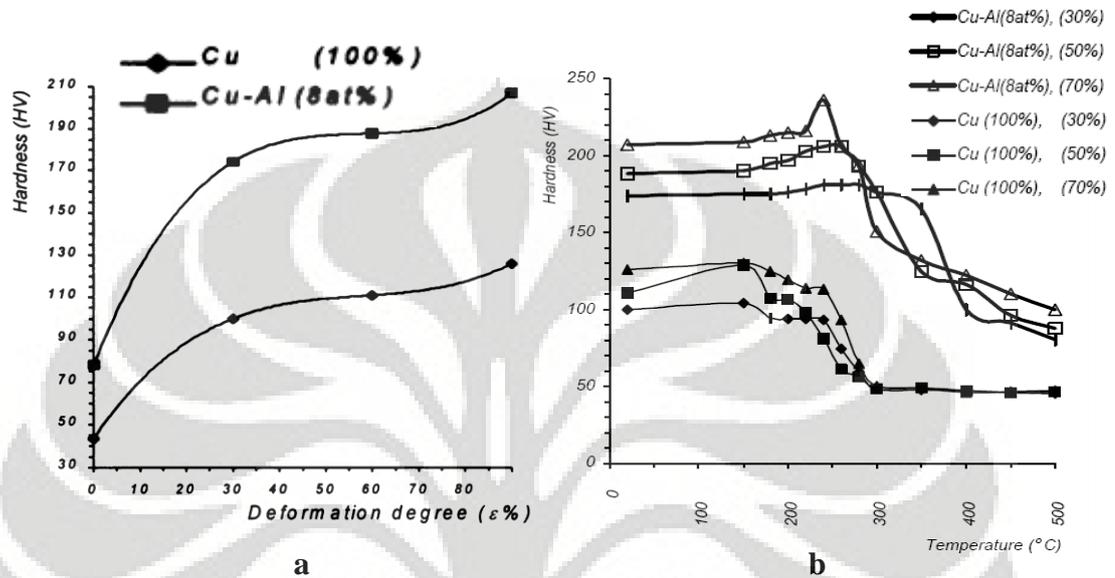
d. Pengaruh Timah (Sn)

Penambahan Sn akan meningkatkan *tensile strength* tetapi menurunkan *ductility* ketika kandungan Sn melebihi 1 %, ini dikarenakan terbentuknya *hardspot* yang bersifat *brittle*. Sn juga meningkatkan ketahanan korosi dalam paduan tembaga, terbukti dengan adanya paduan *naval brass* (Cu 61 ; Sn 1)^[1].

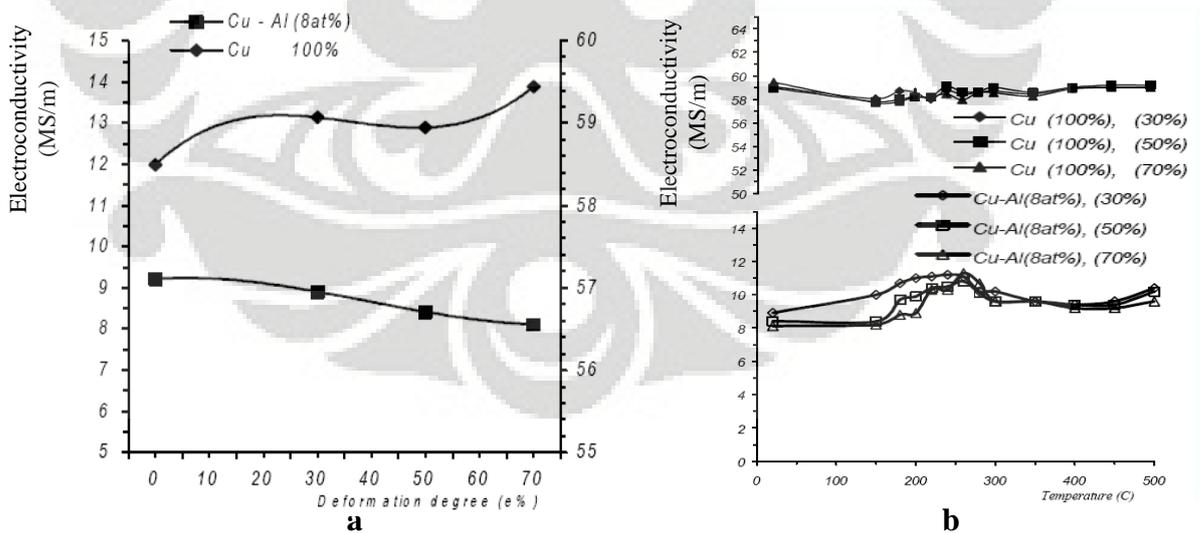
e. Pengaruh Aluminium (Al)

Penambahan aluminium memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap paduan kuningan. Dengan meningkatnya kadar Al maka akan meningkatkan kekuatan tarik kuningan (1% Al meningkatkan *tensile strength* 88 N/mm²)^[1]. Selain itu penambahan Al meningkatkan kecenderungan terbentuknya fasa β , kestabilan meningkat, dan mencegah terjadinya *grain growth* sehingga butir yang dihasilkan lebih halus. Sifat khusus dari kuningan yang mengandung Al adalah

adanya lapisan *aluminium oxide* yang akan menyebabkan efek *soldering*^[1], sehingga menyulitkan pada saat casting, tetapi dengan adanya Al akan meningkatkan mampu alir cairan logam. Selain itu Al juga menurunkan konduktifitas listrik dari kuningan. Efek penambahan Al dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan 2.3.



Gambar 2.2 Kekerasan pada tembaga dengan kandungan Al yang berbeda. (a) Berdasarkan derajat deformasi sebelum anil, (b) Berdasarkan derajat deformasi setelah anil^[11].



Gambar 2.3 Konduktivitas listrik Cu dengan Al berbeda (a) sebelum anil dan (b) setelah anil^[11].

f. Pengaruh Timbal (Pb)

Penambahan Pb 0.4 % akan memperbaiki sifat paduan dalam proses deformasi ekstrusi dan *rolling*, serta membuat logam bersifat *ductile* pada temperatur kamar^[4]. Penambahan Pb 0.5-3 % akan meningkatkan sifat mampu mesin dari kuningan. Akan tetapi untuk *hot working*, Pb harus dijaga kurang dari 0.01 % untuk mengurangi efek retak panas (*hot shortness*) pada temperatur diatas 300 °C^[7].

2.3 Anil Rekristalisasi

Pengerjaan dingin suatu logam memiliki keuntungan yaitu meningkatkan kekuatan dan kekerasan dalam aplikasinya. Meskipun demikian untuk melakukan proses pengubahan bentuk seperti *deep drawing*, membutuhkan material yang lunak. Jadi perlu dilakukan *softening* dari material hasil pengerjaan dingin tersebut. *Softening* dilakukan dengan memanaskan logam sampai temperatur dimana dapat menjadikan material tersebut kembali pada kondisi yang stabil. Proses yang dimaksud adalah *annealing*.

Pada saat dilakukan *cold working* maka dislokasi akan bergerak dan saling menghambat. Karena gerakan dari dislokasi yang saling terhambat ini material akan menjadi keras dan kuat, tetapi keuletannya turun. Susunan dari dislokasi ini meningkatkan jumlah energi regangan yang tersimpan, sehingga material tersebut tidak cocok untuk dilakukan pengubahan bentuk karena rawan terjadi retak. Struktur sel dari hasil pengerjaan dingin ini stabil secara mekanik, tetapi tidak untuk termodinamis. Untuk itu logam yang mengalami deformasi tersebut akan berusaha mencari keadaan yang stabil dengan energi yang serendah-rendahnya.

Untuk kembali ke keadaan yang stabil tersebut tidak dapat terjadi secara spontan. Hal tersebut dapat terjadi dengan diberikan suatu *driving force* yang dapat membantu untuk melewati energi aktivasi dari material hasil pengerjaan dingin tersebut. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan memanaskan material dengan temperatur tinggi, dimana akan terjadi proses aktivasi thermal seperti difusi, *cross slip* dan *climb*^[12]. Proses pemanasan ini dapat menghilangkan tegangan sisa yang masih ada setelah pengerjaan dingin dan membuat dislokasi bergerak kembali ke posisi yang stabil bebas regangan.

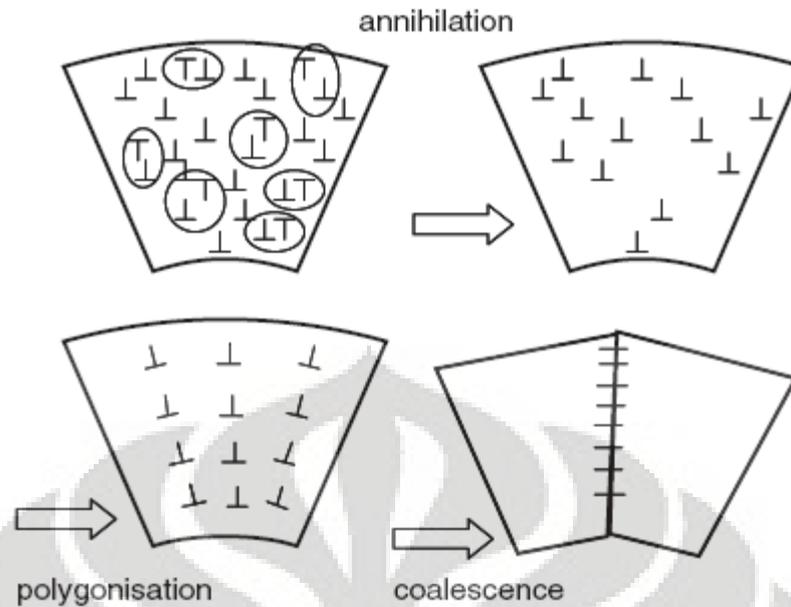
2.3.1 Pemulihan (*Recovery*)

Recovery merupakan tahap awal proses anil, dimana terjadi restorasi sifat fisis logam hasil pengerjaan dingin tanpa mengalami perubahan kekuatan dan kekerasan material (sifat mekanis)^[6]. Proses ini berlangsung pada temperatur rendah. Selama tahap ini *strain energy* yang tersimpan dilepaskan oleh pergerakan dislokasi. Efek utama *recovery* adalah pembebasan tegangan dalam atau *internal stress* yang disebabkan oleh pengerjaan dingin. Proses *recovery* sering dilakukan pada $< 0,3 T_m$ ^[11]. Proses *recovery* sering disebut juga sebagai proses *stress relieving* karena melepaskan sebagian tegangan dalam dan pengurangan tegangan sisa.

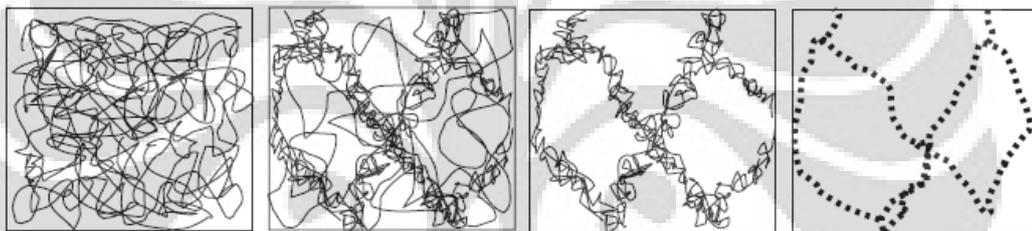
Jumlah fraksi energi yang dilepaskan dalam proses ini tergantung pada persentase *cold work* (% CW) yang dilakukan saat pengerolan. Pada % CW yang rendah, sebagian besar energi dalam dilepaskan, sehingga hanya terdapat sedikit energi yang tersisa untuk rekristalisasi. Pada %CW yang tinggi, sebagian kecil energi dalam dilepaskan dibandingkan jumlah energi saat rekristalisasi.

Mekanisme *recovery* terdiri beberapa tahap antara lain^[11] :

- a. Penghilangan *point defect* (*vacancy* dan *interstitial*) dengan difusi untuk menghilangkan dislokasi.
- b. Penghilangan dislokasi satu sama lain (tahap ini membutuhkan sejumlah dislokasi *climb* atau *cross slip*). Proses anihilasi terjadi bila dua dislokasi yang berlawanan terletak pada bidang slip yang sama, sehingga jika bertemu akan saling menghilangkan.
- c. Poligonisasi adalah penyusunan kembali dislokasi menjadi dinding sel dan terjadi penurunan regangan kisi. Selama deformasi, sebagian daerah kisi melengkung. Kelengkungan disebabkan karena adanya penumpukan dislokasi dengan arah yang sama, terlihat pada Gambar 2.4 Pemanasan akan memungkinkan terjadi penyusunan sub batas butir atau dinding batas butir.
- d. *Coalescence* / penggabungan sub batas butir selama pertumbuhan sub butir, seperti terlihat Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Softening mechanism^[11].



Gambar 2.5 Perubahan struktur dislokasi saat *recovery*^[11].

2.3.2 Rekristalisasi

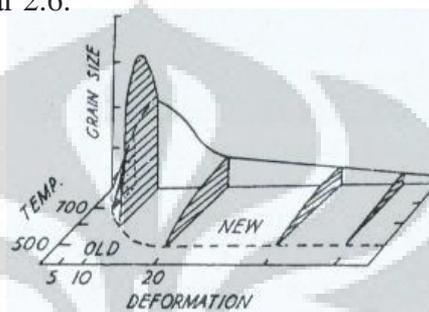
Ketika tahap *recovery* akan berakhir, pembentukan inti dari butir baru akan mulai terjadi. Proses rekristalisasi hampir sama dengan proses solidifikasi, dimana terjadi transformasi nukleasi dan pertumbuhan butir. Nukleasi butir baru muncul karena penggabungan *subgrain*. Permukaan untuk pertumbuhan *heterogeneous* ini merupakan cacat mikrostruktur yang berupa batas butir dan inklusi. Butir baru ini terbentuk dengan mengorbankan butir lama. Butir-butir ini bebas regangan dan terikat dengan batas butir bersudut besar dengan mobilitas yang tinggi.

Ketika butir yang lama tergantikan dengan butir yang baru bebas regangan, dapat dikatakan material tersebut telah terekristalisasi dengan sempurna (*fully recrystallized*). *Driving force* untuk proses rekristalisasi adalah energi yang tersimpan saat pengerjaan dingin dimana sering disebut % CW. Semakin tinggi % CW maka semakin kecil energi panas yang dibutuhkan ini berarti semakin rendah

temperatur rekristalisasinya. Jika % CW semakin rendah maka semakin besar energi panas yang dibutuhkan untuk menggerakkan dislokasi ini berarti semakin tinggi temperatur rekristalisasinya^[12].

Proses rekristalisasi dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain yaitu^[1] :

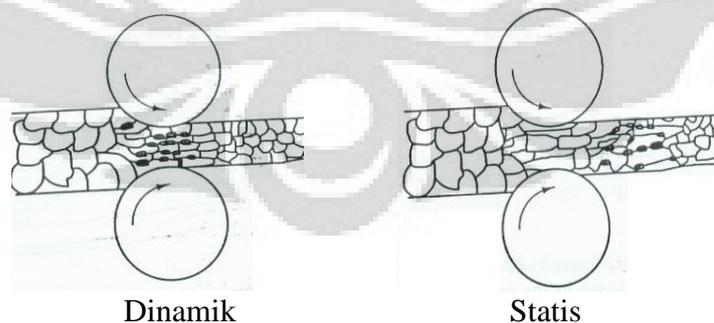
- Persentase *cold working* dimana semakin besar % CW maka temperatur rekristalisasi semakin rendah dan butir yang dihasilkan lebih kecil. Seperti terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Hubungan besar butir, temperatur anil dan % CW^[1].

- Temperatur dan waktu anil. Sebagai contoh untuk mendapatkan butir yang konstan pada besi selama 8 menit dibutuhkan temperatur 675 °C, tetapi jika temperatur diturunkan menjadi 550 °C dibutuhkan waktu 32 jam.
- Kelarutan *impurities* akan meningkatkan temperatur rekristalisasi.

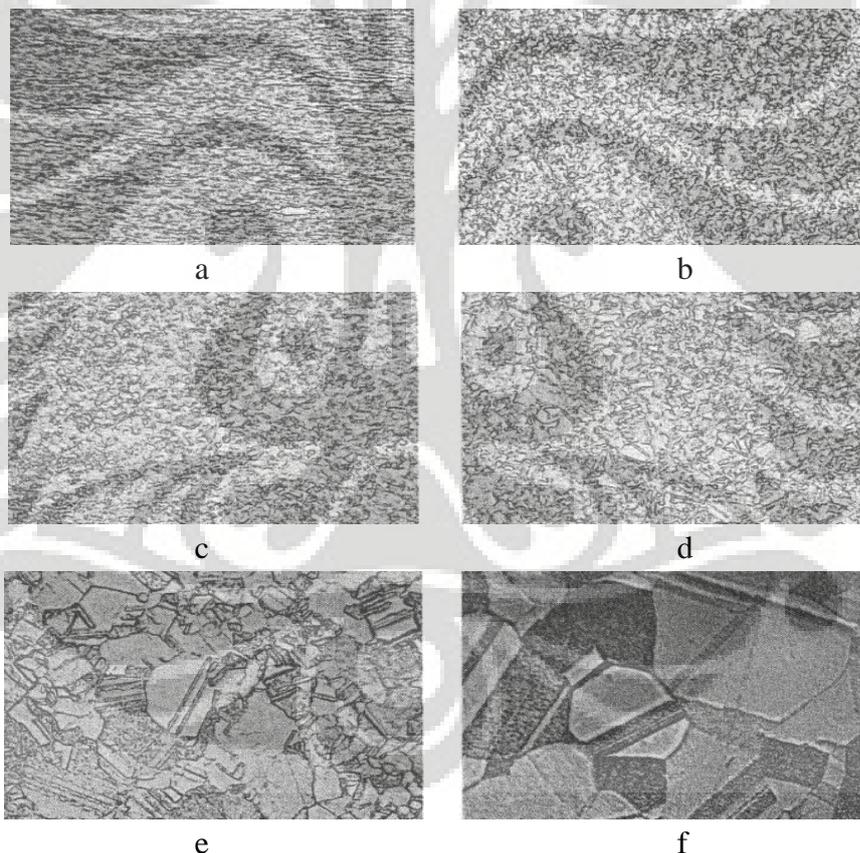
Dalam proses pengerolan, proses rekristalisasi dapat dibagi menjadi dua yaitu rekristalisasi dinamis dan statis. Proses rekristalisasi yang terjadi saat material sedang dideformasi disebut rekristalisasi dinamis sedangkan rekristalisasi statis terjadi sesaat setelah material mengalami deformasi. Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Perbedaan rekristalisasi dinamik dan statis^[12].

Pada rekristalisasi dinamis saat material mengalami deformasi, terjadi regangan pada material, dan jika regangan tersebut adalah regangan kritis (ϵ_0) maka akan tersedia energi yang cukup untuk terbentuk inti baru pada batas butir.

Sedangkan pada rekristalisasi statis hampir sama hanya pembentukan nuklei terjadi setelah deformasi. Prosesnya dilakukan dengan temperatur yang tinggi diatas temperatur rekristalisasi dari materialnya. Menurut J.R Relick dan A. Lawley^[13], temperatur rekristalisasi yang rendah membutuhkan waktu yang lama untuk terbentuk rekristalisasi secara sempurna. Dalam penelitiannya, dia menggunakan *α sheet brass* dengan variasi temperatur rendah dengan waktu yang lama. Pada baja setelah diroll butir terlihat pipih memanjang, kemudian dilakukan anil pada temperatur 252 °C selama 18 jam terjadi modifikasi butir menjadi *elongated*. Kemudian setelah dianil dengan temperatur 300 °C dan 350 °C selama 22 jam, mikrostruktur terbentuk sedikit butir yang terekristalisasi pada matriks *recovery*. Struktur terekristalisasi secara sempurna setelah dianil diatas temperatur 400 °C selama 18 jam. Perubahan struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Mikrostruktur dari *α-brass sheet* hasil canai dingin 92%-93% dan dianil pada temperatur dan waktu : (a) *as-rolled*, (b) 18 jam pada 252 °C, (c) 18.5 jam pada 297 °C, (d) 22 jam pada 353 °C, (e) 18 jam pada 403 °C, (f) 18.5 jam pada 452 °C^[13].

Proses rekristalisasi ini merupakan proses utama untuk mengendalikan besar butir dan sifat mekanik material. Untuk itu proses ini yang diperlukan oleh industri pembentukan logam untuk meningkatkan sifat mampu bentuk logam setelah proses pengerjaan dingin. Besar butir ketika rekristalisasi bergantung oleh derajat deformasi, temperatur anil, waktu tahan anil, dan komposisi material berdasarkan hukum rekristalisasi^[12].

- a. Diperlukan derajat deformasi kritis yang diperlukan sebelum terjadinya rekristalisasi.
- b. Peningkatan waktu anil menurunkan temperatur rekristalisasi.
- c. Semakin tinggi derajat deformasi dan semakin rendah temperatur anil maka butir akan semakin kecil.
- d. Semakin besar butir awal, semakin tinggi derajat deformasi yang dibutuhkan untuk menghasikan temperatur dan waktu rekristalisasi yang sama.
- e. Partikel terlarut dan dispersi halus partikel menghambat rekristalisasi.

2.3.3 Kinetika Rekristalisasi

Laju rekristalisasi merupakan gambaran dari proses transformasi nukleasi dan pertumbuhan. Ketika anil dilakukan secara *isothermal*, fraksi dari volume yang terrekristalisasi merupakan fungsi waktu. Pada laju rekristalisasi ini dibutuhkan waktu tertentu sebelum terjadi transformasi. Waktu ini biasanya disebut periode inkubasi yang diikuti oleh laju transformasi yang lambat ketika *nuclei* yang stabil mulai terbentuk. Kemudian laju transformasi yang tinggi terjadi secara konstan dan akhirnya diikuti dengan laju yang lambat pada akhir transformasi. Teori klasik tentang fenomena ini dapat diformulasikan sebagai berikut^[12] :

$$X_v = 1 - \exp(-Bt^k) \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana X_v sebagai fraksi volume terrekristalisasi, t = waktu (s), B dan k adalah konstanta proses. Jika menggunakan logaritma natural persamaan 2.1 dapat ditulis sebagai berikut :

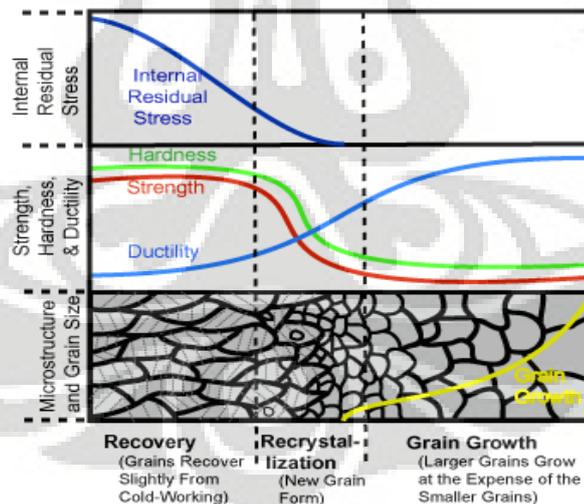
$$\ln(1 - X_v) = -Bt^k \dots\dots\dots(2.2)$$

2.3.4 Pertumbuhan Butir (Grain Growth)

Grain growth terjadi ketika rekristalisasi primer terbentuk secara sempurna. Karakteristik utama adalah terjadi penurunan kekuatan dari material dengan bertambahnya ukuran butir. Jika *driving force* dari *recovery* dan rekristalisasi berasal dari energi % *cold work* yang tersimpan, sebaliknya *driving force* untuk *grain growth* berasal dari energi permukaan batas butir. Jika butir logam bebas regangan dipanaskan pada temperatur yang tinggi dan waktu yang cukup lama, batas butir cenderung bermigrasi dan menghasilkan penambahan ukuran butir secara seragam. Ketika ukuran butir membesar, luas area total batas-butir berkurang sehingga energi logam menurun.

Pertumbuhan butir dapat dicegah dengan adanya fasa kedua yang terdispersi merata. Kemungkinan yang kedua adalah adanya suatu orientasi butir awal tertentu. Laju pertumbuhan butir meningkat dengan meningkatnya % *cold work* dan temperatur. Selain itu adanya *impurities* yang larut maupun tidak biasanya menurunkan laju pertumbuhan butir dan rekristalisasi.

Gambar 2.9 adalah grafik pengaruh hubungan proses anil terhadap sifat mekanis material.



Gambar 2.9 Perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik akibat anil^[14].

2.4. Pengujian Tarik Uniaksial

Pengujian tarik uniaksial merupakan pengujian non simulatif yang penting dalam penelitian proses perubahan bentuk. Beberapa parameter yang diturunkan dari pengujian tarik, dapat digunakan sebagai indikasi untuk mengetahui berbagai

aspek mampu bentuk logam. Parameter ini meliputi kekuatan tarik, keuletan, nilai perpanjangan / elongasi, koefisien pengerasan regang (n), anisotropi normal (r) dan anisotropi planar (Δr)

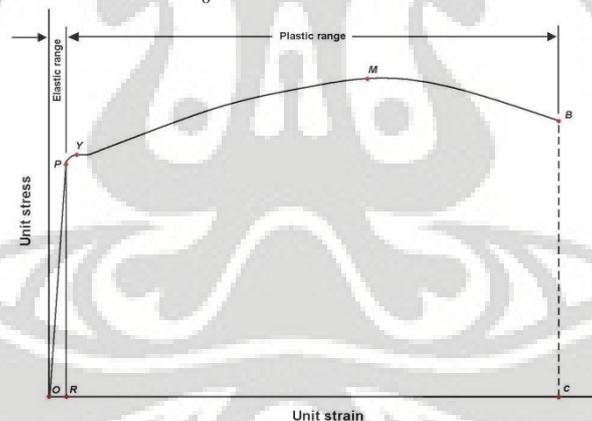
2.4.1 Kurva Tegangan dan Regangan

Kurva tegangan dan regangan rekayasa diperoleh melalui suatu pengujian tarik yaitu dari data-data beban dan pertambahan panjang / elongasi yang dihasilkan pada tiap kenaikan beban. Hasil pada pengujian tarik dipengaruhi oleh kondisi selama pengujian yaitu :

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

Gambar 2.10 menunjukkan kurva tegangan regangan rekayasa (*engineering stress-strain curve*) berikut bagian-bagiannya. Harga tegangan (σ) yang digambarkan pada sumbu y, dihitung dari besar beban yang diterima (P) dibagi dengan luas penampang benda uji mula-mula.

$$\sigma_e = \frac{P}{A_0} \dots\dots\dots (2.3)$$



Gambar 2.10 Kurva tegangan-regangan rekayasa dari sebuah benda uji yang terbuat dari baja ulet.

Sedangkan regangan (ϵ_E) sebagai sumbu x dari kurva dihitung berdasarkan pertambahan panjang dari panjang ukur (*gage*) benda uji, dibagi dengan panjang ukur mula-mula.

$$\epsilon_E = \left[\frac{(L_f - L_0)}{L_0} \right] \dots\dots\dots (2.4)$$

Dari kurva diatas kita dapat mengetahui beberapa parameter yang berhubungan dengan sifat mekanis suatu material seperti kekuatan tarik, keuletan, modulus elastisitas dan UTS.

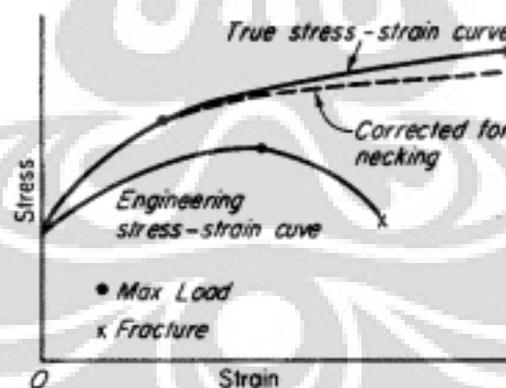
2.4.2 Kurva Tegangan dan Regangan Sesungguhnya

Kurva tegangan-regangan rekayasa didasarkan atas dimensi awal (luas area dan panjang) dari benda uji, sementara untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan sesungguhnya diperlukan luas area dan panjang aktual pada saat pembebanan setiap saat terukur. Perbedaan kedua kurva tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.11.

Pada kurva tegangan-regangan rekayasa, dapat diketahui bahwa benda uji secara aktual mampu menahan turunnya beban karena luas area awal A_0 bernilai konstan pada saat perhitungan tegangan $\sigma = P/A_0$. Sementara pada kurva tegangan-regangan sesungguhnya luas area aktual adalah selalu turun sehingga terjadi perpatahan dan benda uji mampu menahan peningkatan tegangan karena $\sigma_t = P/A$.

$$\sigma_t = \sigma (1 + \epsilon) \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\epsilon_t = \ln (1 + \epsilon) \dots \dots \dots (2.6)$$



Gambar 2.11 Perbandingan kurva tegangan regangan rekayasa dan sesungguhnya.

2.4.3 Koefisien Pengerasan Regang (n)

Pengerasan regang merupakan pertambahan kekerasan suatu logam akibat regangan sehingga tegangan yang diperlukan untuk deformasi plastis akan meningkat. Pada daerah plastis kurva tegangan regangan oleh *Ludwig* dirumuskan sebagai berikut^[12] :

$$\sigma = k \varepsilon^n \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana : n = Koefisien pengerasan regang

k = konstanta

Persamaan diatas menunjukkan bahwa dengan meningkatnya nilai koefisien pengerasan regang (n) maka tegangan pada bahan akibat adanya penarikan akan berkurang.

Dengan menurunkan persamaan 2.7 dengan metode logaritma maka diperoleh persamaan^[12] :

$$\log \sigma t = \log k + n \log \varepsilon \dots\dots\dots (2.8)$$

Dalam pengukuran dengan metode logaritmik, data tegangan dan regangan yang sesungguhnya diGambarkan secara logaritmik sampai harga beban maksimumnya. Maka akan diperoleh kurva berbentuk garis lurus, dimana n merupakan derajat kemiringan kurva dan k merupakan tegangan yang sesungguhnya pada $\varepsilon = 1$.

Nilai n akan berbeda pada tiap arah pemotongan dari material hasil pengerolan karena sifat anisotropinya. Pengukuran yang dilakukan adalah pada arah 0^0 , 45^0 dan 90^0 sehingga nilai n dari material tersebut diperoleh berdasarkan rumus :

$$n = \frac{(n_0 + n_{90} + 2n_{45})}{4} \dots\dots\dots (2.9)$$

Berdasarkan nilai n , sifat material dapat dijelaskan sebagai berikut^[12] :

- a. $n = 0 \rightarrow$ material bersifat plastis ideal
- b. $0 < n < 1 \rightarrow$ material bersifat plastis
- c. $n = 1 \rightarrow$ material bersifat elastis

2.4.4 Koefisien Anisotropi Normal (r)

Anisotropi merupakan ketidakseragaman plastis pada logam, khususnya logam hasil canai dingin berdasarkan arah pengerolan yang berbeda. Anisotropi terjadi karena ketidakseragaman kristal dan ketidakseragaman struktur yang dihasilkan oleh pengorientasian elemen struktur seperti batas butir dan fasa.

Anisotropi normal (r) dinyatakan sebagai perbandingan dari rata-rata regangan pada arah lebar dengan arah tebal dari benda uji tarik uniaksial, yang dinyatakan dalam rumus^[12] :

$$r = \varepsilon_w / \varepsilon_t = \ln (W_0/W_t) / \ln (t_0/t_t) \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan : $\varepsilon_w = \text{True Strain}$ arah lebar $W_0/W_t =$ lebar awal / akhir

$\varepsilon_t = \text{True Strain}$ arah tebal $t_0/t_t =$ tebal awal / akhir

Nilai r akan berbeda pada tiap arah pemotongan dari material hasil pengerolan karena sifat anisotropinya. Pengukuran yang dilakukan adalah pada arah 0° , 45° dan 90° sehingga nilai n dari material tersebut diperoleh berdasarkan rumus^[12] :

$$r = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \dots\dots\dots (2.11)$$

Sifat lembaran logam berdasarkan nilai r dapat diterangkan sebagai berikut^[12] :

- a. $r = 1$ menunjukkan deformasi pada arah lebar sama dengan deformasi pada arah tebal, ini berarti material bersifat anisotropi pada arah tebal.
- b. $r > 1$ menunjukkan ketahanan logam terhadap deformasi arah tebal lebih baik, sehingga material lebih tahan terhadap penipisan.
- c. $r < 1$ menunjukkan material kurang baik terhadap penipisan.

2.4.5 Koefisien Anisotropi Planar (Δr)

Anisotropi planar adalah perbedaan sifat yang menyangkut arah-arah pada bidang lembaran logam. Nilai koefisien anisotropi planar dinyatakan dengan persamaan^[12] :

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \dots\dots\dots (2.12)$$

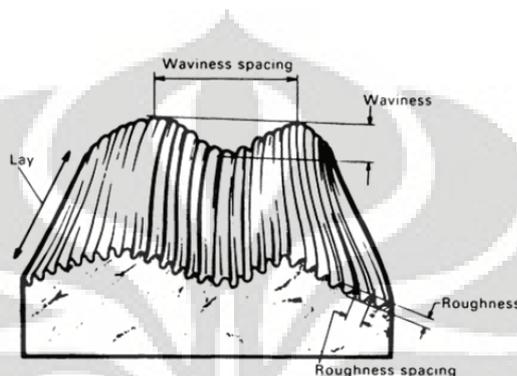
Nilai anisotropi planar menunjukkan pengupingan (*earing*) yang terjadi pada proses *deep drawing*. Semakin besar nilai Δr maka semakin besar juga persentase pengupingan yang terjadi. Nilai anisotropi planar yang diharapkan adalah mendekati 0. Sifat lembaran logam berdasarkan nilai Δr dapat diterangkan sebagai berikut :

- a. $\Delta r < 0$ menunjukkan pengupingan terjadi pada arah 45° .
- b. $\Delta r > 0$ menunjukkan pengupingan terjadi pada arah 0° atau 90° .

2.5 Kekasaran permukaan

Kekasaran adalah pengukuran tekstur permukaan yang dikuantitatifkan oleh penyimpangan vertikal permukaan sesungguhnya dari bentuk idealnya, jika

penyimpangan besar maka permukaan kasar, jika penyimpangannya kecil maka permukaan akan halus, lihat Gambar 2.12. Permukaan kasar menyebabkan terjadinya keausan lebih cepat dan memiliki koefisien gesekan lebih tinggi dari permukaan yang halus, seringkali kekasaran permukaan merupakan alat prediksi cepat terhadap sifat mekanis, karena kekasaran atau ketidakteraturan permukaan dapat berfungsi sebagai tempat awal terjadinya keretakan dan korosi.

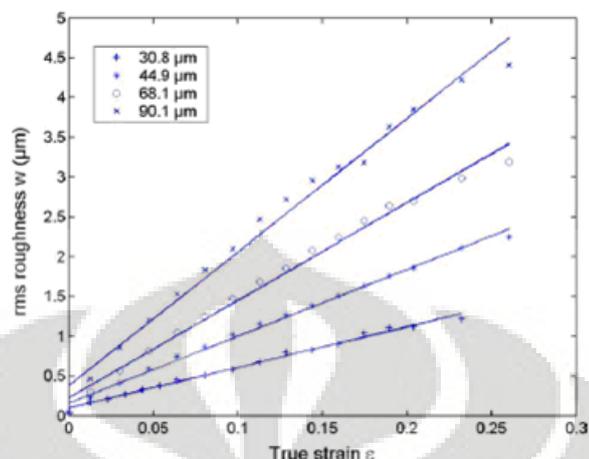


Gambar 2.12 Ilustrasi kekasaran permukaan, gelombang dan bentuk umum permukaan.

Sebagian besar permukaan logam memiliki jarak yang beraturan dan tidak, cenderung membentuk pola atau tekstur pada permukaannya. Tekstur permukaan ini disebabkan oleh proses manufaktur dan struktur mikro material. Sebagai contoh permukaan aluminium cor, umumnya menghasilkan permukaan bulat-bulat ketika dilakukan pemesinan, sedangkan paduan aluminium dari pengerolan pada saat dilakukan pemesinan, menghasilkan permukaan yang mengkilap, rata dan halus profilnya. Tegangan sisa yang terjadi setelah pemesinan pada material menyebabkan deformasi permukaan, sehingga permukaan logam menjadi kasar ketika deformasi. Kekasaran tidak hanya mempengaruhi material, tapi juga sifat permukaan lainnya seperti pemantulan, aliran pelumas, kemudahan pengelasan, dan penempelan^[15].

Kekasaran permukaan yang terjadi secara mikro berhubungan dengan regangan, ukuran butir dan tekstur (pengumpulan arah kristal). Hubungan antara kekasaran, regangan dan ukuran butir menunjukkan hubungan garis lurus, lihat Gambar 2.13, tetapi beberapa peneliti menemukan penyimpangan dari perilaku linear ini, terutama pada regangan yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan dalam arah kristalografi, menyebabkan perbedaan dalam kekerasan dan

pergeseran *incompatibilities* antar butir berdekatan, menyebabkan butir menjadi kasar, akhirnya dihasilkan profil permukaan kulit jeruk.



Gambar 2.13. Hubungan regangan, besar butir dan kekasaran permukaan.

Kekasaran yang timbul dikuasai oleh perbedaan-perbedaan struktur mikro yang diwujudkan pada skala butir^[16]. Butir lebih halus atau butir-butir yang karena arah mereka, lebih peka kepada aliran plastis, lebih mudah terdeformasi dibandingkan dengan butir-butir yang lebih keras, misalnya ketidakmerataan penipisan material dalam kondisi deformasi tarik, menjadikan permukaan kasar, karena arah butir-butir itu tidak berubah secara drastis selama regangan, perubahan bentuk skala butir prosesnya tetap. Dalam material polikristal butir adalah bagian besar struktur tiga dimensi, yang terdiri dari butir dengan semua arahnya berbeda, oleh karena itu perubahan bentuk suatu butir, akan ditentukan oleh kombinasi perubahan bentuk dari butir sekitarnya, membuat perubahan bentuk total dan menghasilkan kekasaran permukaan sulit ditentukan, menyebabkan kekasaran berbanding lurus antara regangan dan ukuran butir.

Kekasaran permukaan dari logam yang berbutir halus lebih rendah dibandingkan dengan yang berbutir kasar, di mana kekasaran meningkat secara berangsur-angsur selama deformasi plastis. Kecepatan pengkasaran meningkat dengan meningkatnya ukuran butir. Kualitas permukaan awal dan profil lembaran logam, berhubungan dengan tahapan pengerolan pada proses produksi, permukaan lebih halus didapatkan dari permukaan pengerol yang lebih halus di tahapan pengerolan akhir.

2.6 Difraksi Sinar X

Metode yang sering digunakan dan sangat berguna untuk mempelajari struktur kristal dikenal sebagai difraksi. Difraksi merupakan fenomena gelombang yang terbelokkan oleh penghalang dan menyebar setelah melintasinya. Difraksi dari berkas elektron sering digunakan untuk menguji struktur pada bagian tipis atau yang dekat dengan permukaan bahan. Sinar-X digunakan untuk bahan lebih tebal dan neutron untuk yang lebih tebal lagi. Sinar-X lebih umum digunakan karena merupakan peralatan yang harganya relatif terjangkau dan banyak disediakan oleh pabrik komersial^[17].

Sinar-X mempunyai panjang gelombang lebih pendek dibandingkan dengan panjang gelombang dari cahaya, sehingga kita dapat menggunakannya untuk mengamati posisi atom. Untuk kebanyakan bahan kristal, teknik ini cukup berguna. Sinar-X didifraksikan oleh bahan dan posisi atom relatif dapat ditentukan dari pola difraksi. Namun demikian, tidak semua atom dapat dengan mudah terlihat oleh sinar-X. Atom-atom ringan pada kulit manusia tidak menghamburkan sinar-X dan demikian pula amalgam penambal gigi. Sinar-X dihamburkan oleh elektron disekitar inti atom. Akibatnya, atom berat dengan banyak elektron (seperti merkuri) menghamburkan sinar-X lebih efisien dibandingkan dengan atom ringan (seperti oksigen atau hidrogen)^[17].

Spektroskopi difraksi sinar-X (*X-ray diffraction* / XRD) merupakan salah satu metode karakterisasi material yang paling tua dan paling sering digunakan hingga sekarang. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta untuk mendapatkan ukuran partikel

Difraksi sinar-X terjadi pada hamburan elastis foton-foton sinar-X oleh atom dalam sebuah kisi periodik. Hamburan monokromatis sinar-X dalam fasa tersebut memberikan interferensi yang konstruktif. Dasar dari penggunaan difraksi sinar-X untuk mempelajari kisi kristal adalah berdasarkan persamaan Bragg^[18] :

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta ; n = 1, 2, \dots \dots \dots (2.13)$$

Dengan λ adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan, d adalah jarak antara dua bidang kisi, θ adalah sudut antara sinar datang dengan bidang normal, dan n adalah bilangan bulat yang disebut sebagai orde pembiasan.

Berdasarkan persamaan *Bragg*, jika seberkas sinar-X di jatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal itu akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang sama dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor kemudian diterjemahkan sebagai sebuah puncak difraksi^[18]. Makin banyak bidang kristal yang terdapat dalam sampel, makin kuat intensitas pembiasan yang dihasilkannya. Tiap puncak yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. Puncak-puncak yang didapatkan dari data pengukuran ini kemudian dicocokkan dengan standar difraksi sinar-X untuk hampir semua jenis material.

Keuntungan utama penggunaan sinar-X dalam karakterisasi material adalah kemampuan penetrasinya, sebab sinar-X memiliki energi sangat tinggi akibat panjang gelombangnya yang pendek. Sinar-X adalah gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang 0,5-2,0 mikron. Sinar ini dihasilkan dari penembakan logam dengan elektron berenergi tinggi. Elektron itu mengalami perlambatan saat masuk ke dalam logam dan menyebabkan elektron pada kulit atom logam tersebut terpental membentuk kekosongan. Elektron dengan energi yang lebih tinggi masuk ke tempat kosong dengan memancarkan kelebihan energinya sebagai foton sinar-X^[18].

Metode difraksi sinar X digunakan untuk mengetahui struktur dari lapisan tipis yang terbentuk. Sampel diletakkan pada sampel *holder difractometer* sinar X. Proses difraksi sinar X dimulai dengan menyalakan difraktometer sehingga diperoleh hasil difraksi berupa difraktogram yang menyatakan hubungan antara sudut difraksi 2θ dengan intensitas sinar X yang dipantulkan. Untuk difraktometer sinar X, sinar X terpancar dari tabung sinar X. Sinar X didifraksikan dari sampel yang konvergen yang diterima dalam posisi simetris dengan respon ke fokus sinar X. Sinar X ini ditangkap oleh detektor sintilator dan diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal tersebut, setelah dieliminasi komponen noisenya, dihitung sebagai analisa pulsa tinggi. Teknik difraksi sinar x juga digunakan untuk menentukan ukuran

kristal, regangan kisi, komposisi kimia dan keadaan lain yang memiliki orde yang sama.

2.6.1 Sumber Dan Sifat Sinar X

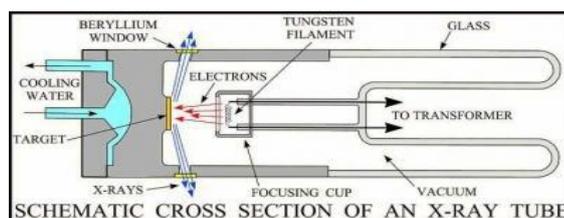
Pada umumnya, sinar diciptakan dengan percepatan arus listrik, atau setara dengan transisi kuantum partikel dari satu energi state ke lainnya. Contoh : radio (electron berosilasi di antenna) , lampu merkuri (transisi antara atom). Ketika sebuah elektron menumbuk anoda^[18] :

- Dengan kecepatan perlahan, dan menciptakan radiasi *bremstrahlung* atau panjang gelombang kontinyu
- Secara langsung menumbuk atom dan menyebabkan terjadinya transisi menghasilkan panjang gelombang garis

Sinar X merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV sampai 1 MeV. Sinar X dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom. Spektrum Sinar X memiliki panjang gelombang 10⁻⁵ – 10 nm, berfrekuensi 10¹⁷ -10²⁰ Hz dan memiliki energi 10³ -10⁶ eV. Panjang gelombang sinar X memiliki orde yang sama dengan jarak antar atom sehingga dapat digunakan sebagai sumber difraksi kristal^[18].

Difraksi Sinar X merupakan teknik yang digunakan dalam karakteristik material untuk mendapatkan informasi tentang ukuran atom dari material kristal maupun nonkristal. Difraksi tergantung pada struktur kristal dan panjang gelombangnya. Jika panjang gelombang jauh lebih dari pada ukuran atom atau konstanta kisi kristal maka tidak akan terjadi peristiwa difraksi karena sinar akan dipantulkan sedangkan jika panjang gelombangnya mendekati atau lebih kecil dari ukuran atom atau kristal maka akan terjadi peristiwa difraksi. Ukuran atom dalam orde angstrom (Å) maka supaya terjadi peristiwa difraksi maka panjang gelombang dari sinar yang melalui kristal harus dalam orde angstrom (Å)^[18,19].

Gambar 2.14 merupakan ilustrasi *x-ray tube*.

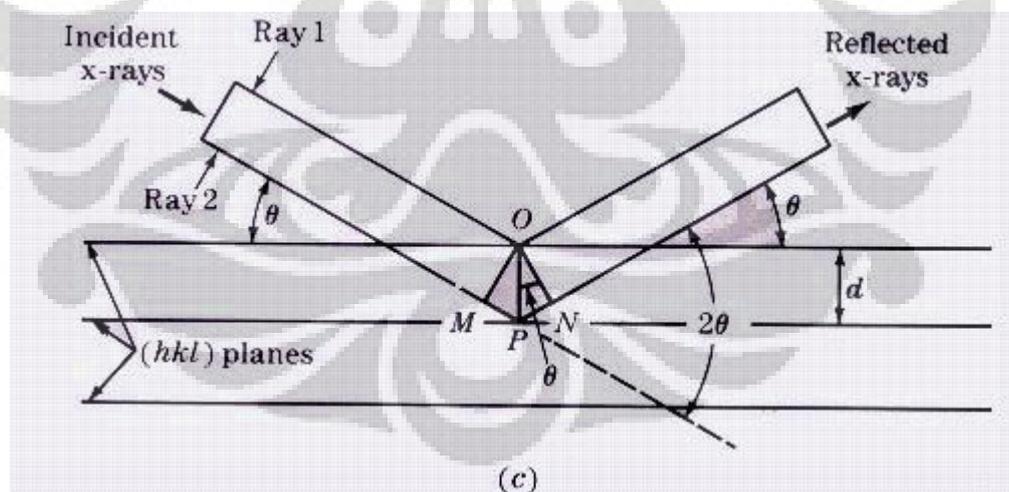


Gambar 2.14 Skema tabung sinar X^[18]

Ada beberapa informasi yang dapat diperoleh dari percobaan ini yaitu sebagai berikut^[19]:

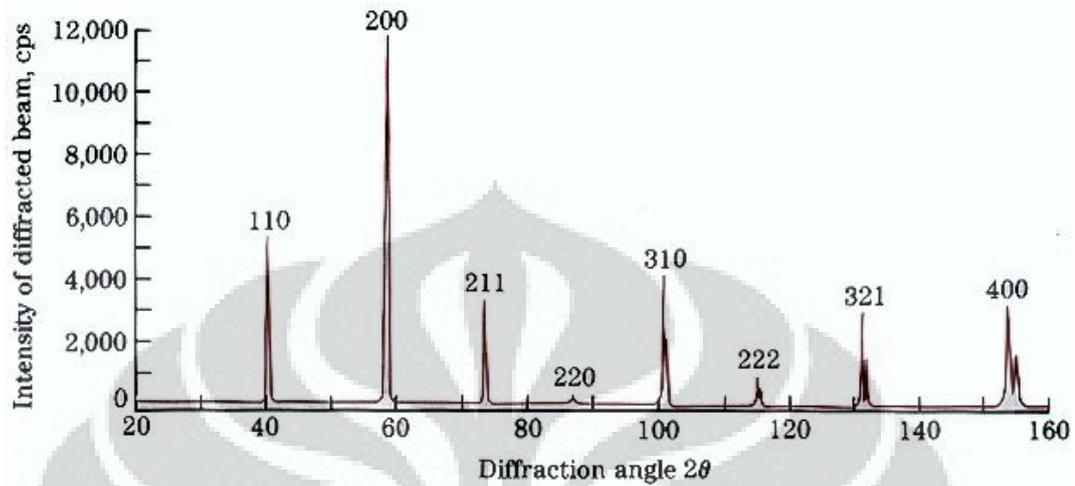
- Posisi puncak difraksi memberikan Gambaran tentang parameter kisi (a), jarak antar bidang (d_{hkl}), struktur kristal dan orientasi dari sel satuan (d_{hkl}) struktur kristal dan orientasi dari sel satuan.
- Intensitas relatif puncak difraksi memberikan Gambaran tentang posisi atom dalam sel satuan.
- Bentuk puncak difraksi memberikan Gambaran tentang ukuran kristalitik dan ketidaksempurnaan kisi (d_{hkl}) dikelompokkan dalam beberapa grup, dengan intensitas relative paling tinggi pertama disebut d_1 , kedua d_2 , ketiga d_3 dan seterusnya.

Pada metoda kristal tunggal, sebuah kristal yang berkualitas baik diletakkan sedemikian rupa sehingga dapat berotasi pada salah satu sumbu kristalnya. Ketika kristal itu diputar pada salah satu sumbu putar, seberkas sinar X monokromatik dipancarkan ke arah kristal. Ketika kristal berputar, perangkat-perangkat bidang yang ada dalam kristal berurutan akan memantulkan berkas sinar X. berkas sinar X yang dipantulkan ini kemudian direkam pada sebuah piringan fotografik^[18]. Ilustrasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.15 berikut ini :



Gambar 2.15 Pemantulan sinar x oleh bidang (hkl) dari kristal^[20]

Pemantulan sinar tersebut akan terlihat pada monitor berupa pola difraksi dengan pola intensitas yang berbeda-beda dan bidang yang berbeda juga (lihat Gambar 2.16).



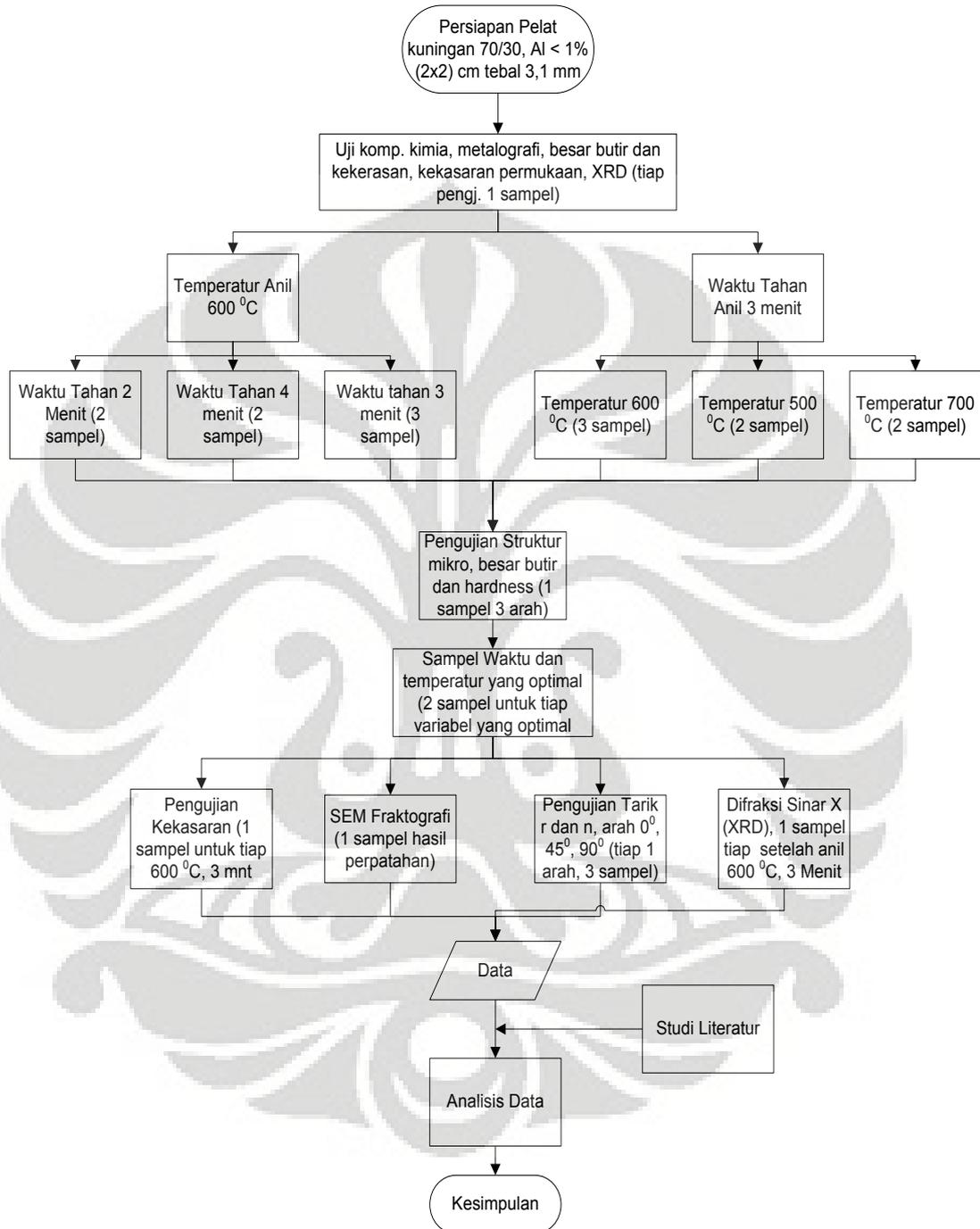
Gambar 2.16 Contoh pola difraksi pada 2θ ^[20]

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.2 Alat Dan Bahan

3.2.1 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian kali ini antara lain adalah :

- a. Pelat kuningan 70/30 dengan kandungan Al <1%
- b. Resin
- c. *Hardener*
- d. Alumina (Al_2O_3)
- e. Kertas amplas grit 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, dan 1500
- f. Kain poles / beludru (2 potong)
- g. Zat etsa FeCl_3 18% (18 ml) + alkohol 96% (100 ml) + HCl 2-3 tetes
- h. 1 Roll film isi 36 foto
- i. Lem *Power Glue*

3.2.2 Peralatan

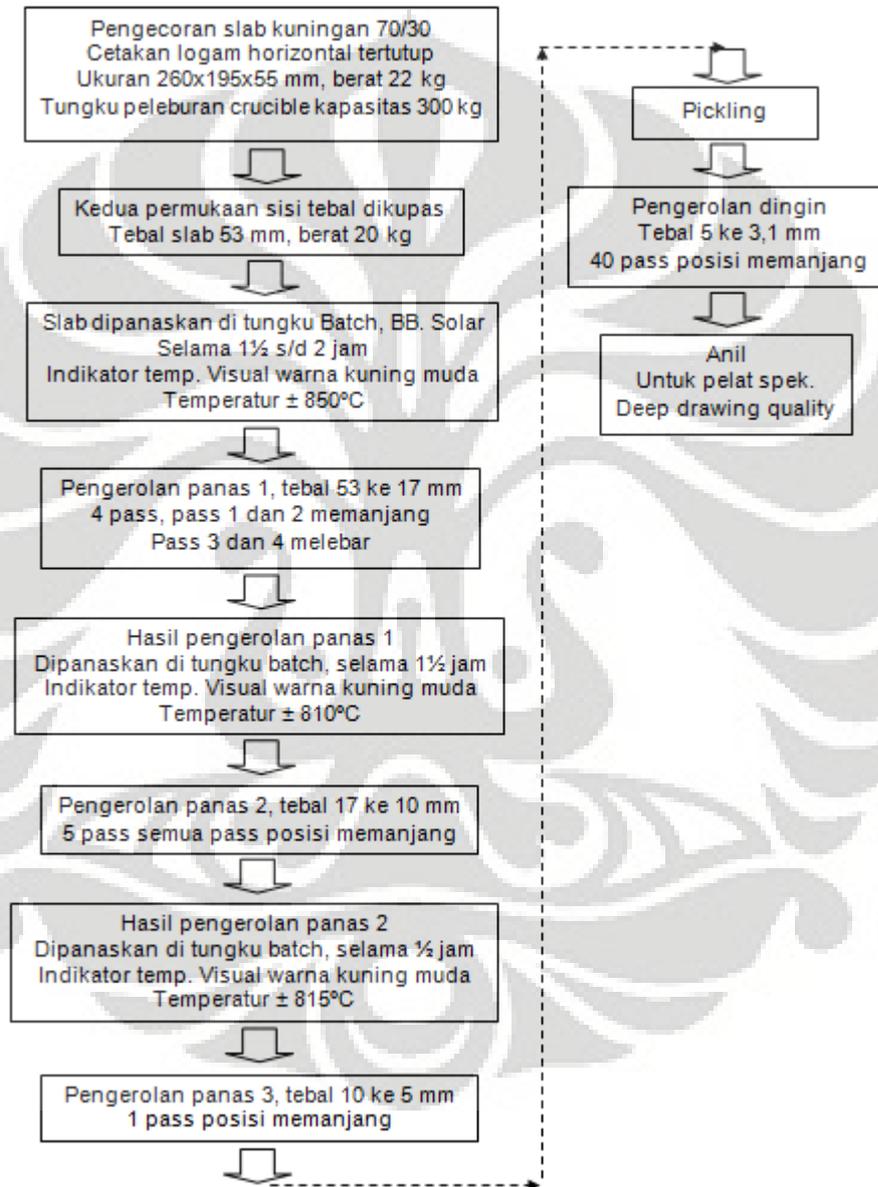
Peralatan yang digunakan pada penelitian kali ini antara lain adalah :

- a. Dapur Naberthem (*Naberthem Furnace*) maksimum temperatur 1400 °C
- b. Gergaji logam
- c. Mesin gerinda / amplas (*ecomet*)
- d. Mesin poles (*ecomet*)
- e. Mikroskop ukur
- f. Alat uji vickers
- g. Mikroskop optik
- h. Cetakan mounting
- i. Mesin bubut
- j. *Scanning Electron Microscope* (SEM)
- k. Alat uji tarik
- l. Alat *Spectrometer*
- m. XRD 6000 Shimadzu
- n. Alat uji *Roughness*
- o. Lain-lain : label, kantong plastik, spidol, tang penjepit, palu, penggaris, dan sarung tangan

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Proses Pengecoran

Pembuatan sampel dilakukan oleh PT. JSST Surabaya yang berada di kawasan Jawa Timur dengan proses *conventional casting* berbentuk *slab* yang kemudian dilakukan canai panas dan dingin. Adapun proses pembuatan sampel dapat dilihat pada Gambar 3.2 dibawah ini :



Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan sampel.

Proses pengecoran slab kuningan menggunakan material kuningan dengan kandungan Cu 70 % dan Zn 30 %, dengan penambahan Al < 1 %. Peleburan dilakukan pada tungku *crucible* dengan kapasitas 300 kg dengan posisi horizontal

ukuran 260 x 195 x 55 mm, berat 22 kg. Setelah sampel membeku dalam bentuk slab, sampel akan masuk ke tahap pengerolan.

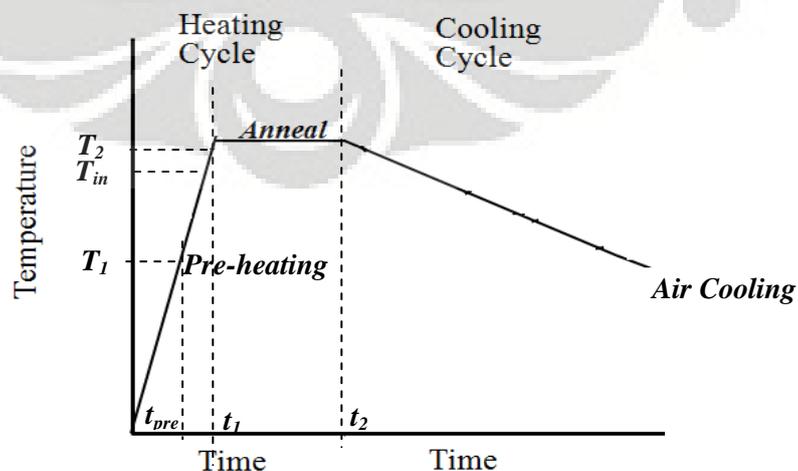
Proses pengerolan dilakukan dengan cara bertahap. Dimulai dari canai panas dengan temperatur 850 °C selama 1,5 - 2 jam, dimana terjadi reduksi tebal slab dari 53 - 17 mm. Kemudian hasil pengerolan pertama dipanaskan lagi dengan temperatur 810 °C selama 1,5 jam dan selanjutnya dilakukan pengerolan kedua dimana terjadi reduksi ketebalan dari 17 – 10 mm. Setelah itu dipanaskan lagi dengan temperatur 815 °C selama 0,5 jam dan dilakukan pengerolan ketiga untuk mereduksi ketebalan kuningan dari 10 – 5 mm. Proses *pickling* diperlukan, setelah proses canai panas yang dimaksudkan untuk menghilangkan *scale* atau *grease* yang masih menempel pada lembaran kuningan sisa canai panas. Pada tahap akhir dilakukan proses canai dingin dari ketebalan 5 mm menjadi 3,1 mm, yang kemudian akan masuk proses anil. Contoh sampel dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Sampel hasil pengecoran dan pengerolan.

3.3.2 Proses Pemanasan (Anil)

Pemanasan dilakukan dengan dapur naberthem di Departemen Metalurgi. Siklus pemanasan dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut :



Gambar 3.4 Proses Anil Rekrystalisasi.

Temperatur rekrystalisasi (T_2) diambil berdasarkan diagram fasa dari kuningan 70/30. Pada diagram tersebut titik lebur dari kuningan 70/30 adalah sekitar $980\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga jika berdasarkan ketentuan temperatur rekrystalisasi yaitu $0,4-0,6 T_m^{[10]}$, maka diambil temperatur optimal untuk rekrystalisasi adalah sekitar $580 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sedangkan temperatur $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, diambil untuk melihat fenomena perubahan yang terjadi setelah anil baik pada struktur mikro dan sifat mekanis. Selain itu juga digunakan sebagai faktor pembanding penelitian.

Sedangkan waktu 2, 3 dan 4 menit diambil berdasarkan ketentuan dari perusahaan yang menggunakan prinsip anil cepat. Proses anil cepat disini bertujuan untuk membuat struktur dari kuningan hasil canai dingin lebih homogen dan stabil. Gambar 3.5 merupakan dapur pemanas yang digunakan untuk memanaskan sampel.



Gambar 3.5 Dapur Naberthem.

Sebelum melakukan pemanasan, dapur harus di atur dengan tombol panel. Temperatur T_1 diatur dengan menggunakan rumus $0,6T_2$ dengan kenaikan temperatur $10^{\circ}/\text{menit}$ atau $11^{\circ}/\text{menit}$ sehingga kita dapat mengatur waktu (t_{pre}) pemanasan sampai T_1 dengan rumus $(0,6T_2) - T_{dapur}/10$, rumus ini diambil sesuai kemampuan operasi dapur. Setelah itu temperatur dapur akan naik sesuai temperatur T_2 dengan waktu (t_1). T_{in} merupakan temperatur masuk dari sampel. Sampel masuk pada temperatur $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ sebelum T_2 , kemudian akan mengalami pemanasan selama waktu (t_2) yang diatur pada dapur. Setelah t_2 selesai, sampel dikeluarkan dan didinginkan dengan udara. T_{in} diambil atas pertimbangan sampel

yang digunakan adalah kuningan, dimana memiliki konduktivitas panas yang sangat bagus, selain itu ketebalan sampel yang cukup tipis. Berdasarkan data literatur koefisien ekspansi termal dari material kuningan 70/30 adalah $10,3 \text{ inc}^{\circ}\text{F}$. Jadi jika dimasukkan pada awal pemanasan dikhawatirkan akan terjadi perbedaan temperatur jika telah mencapai T_2 . Selain itu juga akan mempengaruhi hasil yang didapat seperti besar butir, kekerasan dan kekuatan tariknya.

Contoh pengaturan temperatur pada dapur :

Diinginkan : $T_2 = 600^{\circ}\text{C}$ $t_2 = 3 \text{ menit}$ $T_{\text{dapur}} = 30^{\circ}\text{C}$

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

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

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

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

Ini berarti temperatur *pre-heating* T_1 adalah 330°C , membutuhkan waktu (t_{pre}) 30 menit. Selanjutnya temperatur akan meningkat ke T_2 , membutuhkan waktu sekitar 27 menit sesuai kemampuan dapur. Sebelum mencapai T_2 sampel dimasukkan pada T_{in} yaitu sekitar 570°C . Selanjutnya sampel akan mengalami penahanan temperatur dari $t_1 - t_2$. Kemudian sampel dikeluarkan dan akan mengalami pendinginan udara.

3.3.3 Pengujian Komposisi

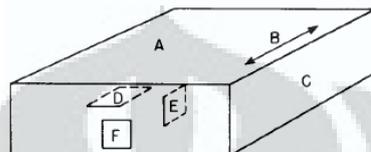
Pengujian komposisi dilakukan menggunakan mesin *Emission Spectrometer* di Politeknik Bandung. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi kimia dari kuningan 70/30 dengan kandungan Al <1% sehingga dapat ditentukan jenis material yang dipergunakan dan dapat dibandingkan dengan spesifikasi material lain. Sampel pengujian spectrometer dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Bentuk sampel pengujian komposisi kimia dengan *spectrometer*.

3.3.3 Preparasi Sampel Metalografi

Preparasi sampel metalografi menggunakan standar ASTM E3. Dimana setiap variabel (temperatur dan waktu) diambil 1 sampel dengan dipotong pada 3 arah yang berbeda. Ilustrasi ini dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Arah pemotongan sampel.

Setelah dilakukan pemotongan, sampel dimounting dengan tujuan untuk memudahkan penanganan sampel saat proses pengampelasan, pemolesan sampai diambil fotonya. Proses mounting yang digunakan adalah metode *castable mounting*. Proses ini menggunakan bahan utama yaitu resin ditambah *hardener*. Pertama kali tuangkan resin ke wadah yang telah disediakan sekitar 10 – 20 ml, kemudian tuangkan *hardener* sebanyak 10-15 tetes. Diaduk sampai resin dan *hardener* tercampur rata. Biasanya indikator tercampur rata adalah warna resin berubah warna dari merah muda menjadi kuning. Selanjutnya campuran tersebut dituangkan ke cetakan mounting yang telah diletakkan sampel didalamnya. Kemudian ditunggu hingga mengeras^[21].

Sebelumnya, cetakan mounting ditutup bagian bawahnya dengan menggunakan lakban/plester, hal ini bertujuan untuk tempat peletakan sampel supaya tidak bergerak saat dituangkan campuran resin dan *hardener*. Cetakan dan sampel hasil mounting dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 a. Contoh cetakan mounting, b. Hasil mounting.

Proses pengampelasan / *grinding* dilakukan pada mesin amplas *ecomet* (Gambar 3.9). Pengampelasan menggunakan kertas amplas dengan grit 200 – 1500 mesh. Tujuan utama dari pengampelasan adalah untuk menghaluskan permukaan sampel tahap pertama sebelum masuk ke proses selanjutnya. Parameter yang berpengaruh pada proses pengampelasan ini adalah^[21] :

- a. Pemberian air → hal ini penting untuk mengurangi panas yang terjadi akibat friksi. Panas dapat mempengaruhi hasil struktur mikro yang akan dilihat.
- b. Penekanan → penekanan berpengaruh pada permukaan sampel yang dihasilkan. Jika penekanan tidak rata maka sampel yang dihasilkan akan memiliki bidang sehingga menyulitkan saat melakukan pengambilan foto.
- c. Perubahan arah sampel → sampel diubah arahnya yaitu 45° atau 90° setiap kali ganti kertas amplas dengan grit yang lebih besar. Hal ini bertujuan untuk menutup arah pengampelasan sebelumnya dan dihasilkan arah yang seragam.

Indikasi keberhasilan pengampelasan adalah dihasilkan arah yang seragam, tanpa bidang pada kertas amplas dengan grit yang diinginkan.



Gambar 3.9 Mesin Amplas.

Selanjutnya masuk ke proses pemolesan. Pemolesan menggunakan mesin poles *ecomet* (Gambar 3.10). Bahan yang digunakan saat poles adalah kain beludru dan alumina (Al_2O_3). Pada saat pemolesan sampel hasil amplas harus diputar-putar untuk menghindari penumpukan alumina, sehingga dapat menimbulkan cacat ekor komet. Cacat ini akan tampak pada foto sehingga mengganggu analisa. Indikator keberhasilan proses poles adalah dihasilkan permukaan yang rata, tanpa goresan, biasanya mengkilap. Kemudian dilakukan pencucian dan dikeringkan dengan *hair dryer* sebelum dietsa^[21].



Gambar 3.10 Mesin poles.

Proses berikutnya adalah etsa. Etsa yang dipakai adalah FeCl_3 dicampur alkohol dan 2-3 tetes HCl . Etsa merupakan proses korosi terkendali dimana saat proses etsa, zat etsa akan menyerang batas butir dimana memiliki energi yang terbesar, sehingga foto yang dihasilkan dapat tampak jelas batas butirnya. Setelah poles selesai sampel dicelupkan ke dalam zat etsa selama 10-15 detik sambil digoyangkan^[21]. Selanjutnya sampel dicuci dengan air dan alkohol, kemudian dikeringkan dengan *hair dryer*.

Setelah dilakukan etsa, sampel akan difoto dengan mikroskop optik (Gambar 3.11). Pada saat difoto, bagian yang terkorosi saat etsa tadi akan terlihat gelap sehingga akan terlihat jelas batas butirnya. Ini dikarenakan pada bagian batas butir tersebut tidak dapat memantulkan sinar yang datang dari mikroskop kembali. Dari foto yang didapat dicetak dan dihitung jumlah butirnya.



Gambar 3.11 Mikroskop optik.

3.3.4 Penghitungan Besar Butir

Pada pengujian besar butir ini diambil satu sampel dari tiap-tiap variabel, kemudian dihitung besar butirnya pada masing-masing arah, dan hasilnya adalah rata-rata dari ketiga arah tiap variabelnya. Pengujian besar butir pada penelitian

kali ini menggunakan standar ASTM E112-96. Prinsipnya sederhana yaitu dengan membuat lingkaran yang berdiameter sekitar 79,8 mm dengan luas area lingkaran 5000 mm² pada transparan. Kemudian diletakkan diatas foto mikro yang telah didapat dan dihitung jumlah butir yang terdapat didalamnya. Metode ini biasanya disebut sebagai metode planimetri. Skematis pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.12.

Rumus Planimetri : $N_A = (f) (n_1 + n_2/2)$ (3.1)

$G = [3,322 \log (N_A) - 2,95]$ (3.2)

G = Nomer ASTM

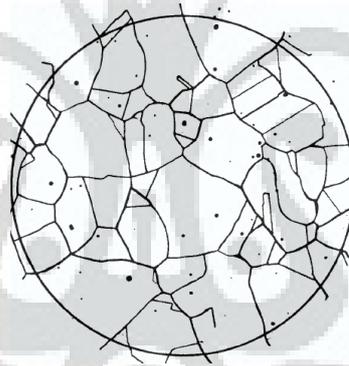
n_1 = butir dalam lingkaran

N_a = Jumlah butir / mm²

n_2 = butir yang terpotong lingkaran

f = bilangan jeffreis (M²/5000)

Selanjutnya untuk menentukan ukuran butir dilakukan dengan melihat standar E112 dengan mencocokkan nomer G .



Gambar 3.12 Contoh prinsip pengujian metode planimetri^[22].

3.3.5 Pengujian Kekerasan

Untuk pengujian kekerasan sampel yang digunakan adalah sisa dari sampel pengujian besar butir. Dari tiap variabel diambil 1 sampel dan dilakukan penjejakan / indentasi di tiap-tiap arahnya. Di tiap arah roll tersebut dilakukan indentasi sebanyak 3 kali, kemudian hasilnya merupakan rata-rata dari ketiga arah.

Pengujian kekerasan menggunakan standar ASTM E-92 dengan metode vickers (Gambar 3.13). Prinsip pengujiannya adalah melakukan indentasi pada sampel dengan indentor berbentuk *diamond* dengan kemiringan sekitar 136⁰, seperti terlihat pada Gambar 3.14. Kemudian dihitung dengan rumus dan

dikonversikan menjadi satuan BHN dengan melihat Tabel konversi kekerasan vickers ke brinell (ASTM E140).



Gambar 3.13 Alat uji vickers.

$$\text{Rumus kekerasan vickers : } VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} = \frac{1,854}{d^2} \dots\dots\dots(3.3)$$

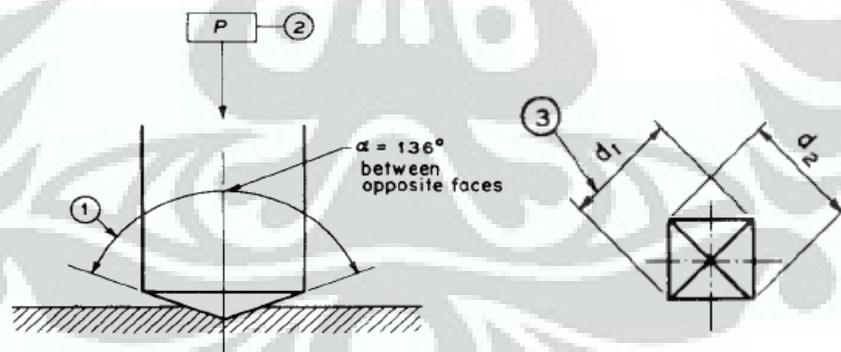
VHN = kekerasan vickers

α = sudut *diamond* (136^0)

P = beban (kgf)

d = panjang diagonal penjejakan (mm)

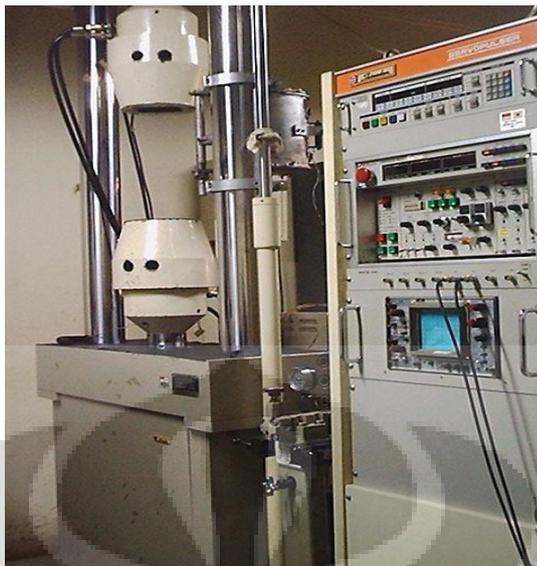
Setelah mendapatkan nilai kekerasan dari vickers maka dilakukan konversi ke brinell dengan melihat Tabel konversi pada ASTM E140.



Gambar 3.14 Skema pengujian kekerasan vickers^[23].

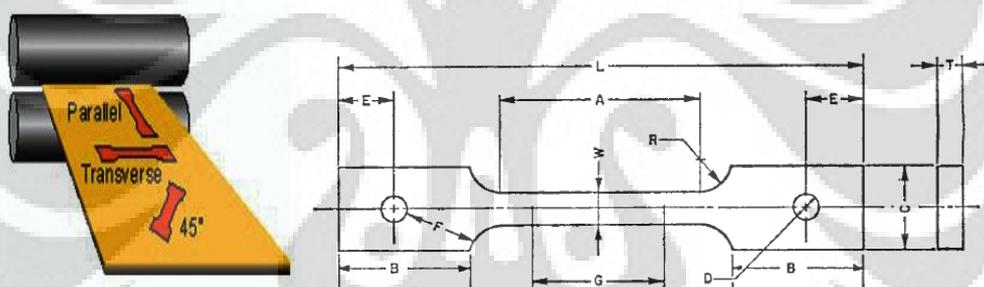
3.3.6 Pengujian Tarik Anisotropi

Pada pengujian tarik ini, setiap arah dibuat 1 sampel dan dilakukan penarikan. Hasilnya setiap arah dihitung nilai r dan n, dan dirata-rata untuk tiap variabelnya. Pengujian tarik menggunakan standar specimen ASTM E8, dimana diambil 3 arah anisotropi lembaran yaitu 0^0 , 45^0 , 90^0 . Gambar 3.15 merupakan mesin uji tarik yang digunakan.



Gambar 3.15 Mesin uji tarik hoytom.

Untuk spesimen uji tarik dan arah anisotropi yang diambil dari lembaran dapat dilihat pada Gambar 3.16 berikut :



Gambar 3.16 Arah anisotropi sampel dan bentuk spesimen uji tarik^[12,24]

Ukuran dari sampel yang lebih spesifik dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Dimensi spesimen uji tarik^[24]

Required Dimensions for Reduced Section of Specimen			
	Dimensions		
	in.	mm	
G	Gage length	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10
W	Width (Note 1)	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25
T	Thickness (Note 2)	thickness of material	
R	Radius of fillet, min	½	13
L	Overall length, min	8	200
A	Length of reduced section, min	2¼	60
B	Length of grip section, min	2	50
Suggested Dimensions for Ends of Specimen			
"Plain-End" Specimens			
C	Width of grip section (Note 3 and Note 4)	¾	20
"Pin-End" Specimens			
C	Width of grip section, approximate (Note 5)	2	50
D	Diameter of hole for pin (Note 6)	½	13
E	Distance of center of pin from end, approximate	1½	38
F	Distance of edge of hole from fillet, min	½	13

Untuk sampel yang telah dibentuk kemudian dilakukan pemanasan sama seperti sampel metalografi pada dapur pemanas. Ilustrasi sampel dapat dilihat pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17 Sampel uji tarik.

Tujuan pengambilan 3 arah ini adalah untuk menentukan nilai r dan n dengan menggunakan rumus :

- a. Untuk nilai r

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t = \ln (W_0 / W_t) / \ln (t_0 / t_t) \dots\dots\dots(3.4)$$

Karena diambil 3 arah anisotropi jadi harus dihitung dengan rumus sebagai

$$\text{berikut}^{[12]} : r = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \dots\dots\dots(3.5)$$

Keterangan : $\epsilon_w = \text{True Strain}$ arah lebar $W_0 / W_t = \text{lebar awal / akhir}$

$\epsilon_t = \text{True Strain}$ arah tebal $t_0 / t_t = \text{tebal awal / akhir}$

$r = \text{koefisien anisotropi normal}$

- b. Untuk nilai n

$$n = \log \sigma_t / \log \epsilon_t \dots\dots\dots(3.6)$$

Keterangan : $\sigma_t = \text{true stress}$

$\epsilon_t = \text{true strain}$

Karena diambil 3 arah yang berbeda maka nilai n harus dihitung dengan rumus sebagai berikut^[12] :

$$n = \frac{(n_0 + n_{90} + 2n_{45})}{4} \dots\dots\dots(3.7)$$

3.3.7 Pengujian Kekasaran

Pelat dipotong bentuk kubus ukuran $1\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{2}$ cm, sebanyak 1 (satu) potong saja untuk masing-masing kondisi pengujian yaitu kondisi setelah pengerolan dingin, dan anil kondisi optimal temperatur 600°C waktu 3 menit. Tidak ada

persiapan sampel, hanya diletakkan di tempat sampel apa adanya, tidak dilakukan *pre-treatment* karena akan mempengaruhi datanya. misalnya kalau di *dietsa* atau *polishing* bisa berubah kekasarannya.



Gambar 3.18 Peralatan pengujian kekasaran permukaan.

Persiapan peralatannya yaitu dengan menghidupkan, pompa vacuum dan meja anti getaran, kemudian komputer diaktifkan. Peralatan ini menggunakan mikroskop optik, jadi tidak boleh menyentuh sample waktu pengujian. Prosedur yang penting adalah mendapatkan fokus lensa dengan mengatur tinggi rendah posisi sampel. Setelah fokus baru bisa discan, peralatan yang digunakan lihat Gambar 3.18.

3.3.8 Pengujian Tekstur via difraksi X-ray

Pelat dipotong bentuk kubus ukuran $1\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{2}$ cm, sebanyak 1 (satu) potong saja untuk masing-masing kondisi pengujian yaitu kondisi setelah pengerolan dingin, dan anil kondisi optimal temperatur 600°C waktu 3 menit, pada bagian pinggirannya diampelas sampai rata, dengan kehalusan ampelas sampai dengan #600 saja. Sampel diletakkan dalam pemegang (*sample holder*) agar tepat ketinggiannya, yang sesuai dengan posisi pembacaan alat, kemudian mempersiapkan peralatan dengan mengaktifkan *start cooler*, kemudian dilanjutkan dengan mengaktifkan XRD dan komputer. Pertama mengaktifkan

software XRD biasanya dikalibrasi terlebih dahulu dengan mengaktifkan tombol OK. Selanjutnya periksa buka tutup pintu XRD apakah terhubung dengan *software* atau tidak, kemudian letakkan sampel dan tutup pintu kembali. Selanjutnya setting parameter, seperti 2θ akan dilakukan *scan* dari berapa sampai berapa (misal 10 sampai 80°), *scanning speed* berapa *degree* per minute, dllnya serta tuliskan nama *file* untuk disimpan, kemudian diaktifkan mulai (*start*), maka alat berjalan sampai selesai. Peralatan menggunakan XRD 6000 buatan Shimadzu lihat Gambar 3.19.



Gambar 3.19 XRD 6000 Shimadzu untuk pengujian difraksi sinar x.

3.3.9 Pengujian SEM

Tujuan dari pengamatan dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) ini adalah untuk mengetahui jenis perpatahan dari kuningan 70/30 dengan kandungan Al <1%. Hal ini akan terlihat jelas jika dilihat dengan SEM. Pegujian ini menggunakan mesin EDX di Departemen Metalurgi dan Material. Mesin EDX akan menembakan sinar X pada sampel yang telah dicoating (lihat Gambar 3.20), lalu sebagian sinar akan dipantulkan oleh sampel dan sebagian lagi akan diserap atau menembus sampel, kemudian dicari daerah yang terdapat dimpel yang merupakan ciri khas patahan *ductile*.



Gambar 3.20 Sampel SEM.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan alat *spectrometer* yang ditembakkan pada pelat kuningan 70 Cu – 30 Zn, dengan kandungan Al < dari 1 %. Berdasarkan hasil uji *spectrometer* terhadap sampel pelat kuningan 70 Cu – 30 Zn, dengan kandungan Al < dari 1 %, terdapat beberapa unsur-unsur utama seperti Cu, Zn, Ni dan Fe. Hasil lebih lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi

No.	Unsur	Kandungan Unsur (%)	Standar (%)
1.	Cu	69,430	68,5 – 71,5
2.	Zn	30,185	Remainder
3.	Al	0,161	---
4.	Fe	0,108	Max 0,05
5.	Ni	0,078	Max 0,02
6.	Sn	0,017	Max 0,03
7.	Pb	0,011	Max 0,05
8.	P	0,004	---
9.	Si	---	---
10.	Mn	---	---
11.	S	0,003	---
12.	Sb	0,006	Max 0,01
13.	Mg	0,0003	---

Pada kuningan 70/30, setiap unsur memiliki peranan masing-masing. Seperti unsur Zn, dia akan bertindak sebagai atom pengganti (*substitutional solution*) sehingga seiring dengan bertambahnya Zn maka kekuatan tarik dan kekerasan dari kuningan 70/30 akan meningkat^[1]. Selain itu kandungan Zn juga memicu terbentuknya fasa β , tetapi karena kandungan Zn dari material pelat kuningan adalah sekitar 30,185 %, maka fasa yang terbentuk adalah α , hal ini sesuai diagram fasa kuningan (lihat bab 2 Gambar 2.1).

Selain unsur Zn, ada unsur yang memiliki peranan yang cukup besar pada kemampuan mampu bentuk dari kuningan, yaitu unsur Aluminium. Aluminium memiliki peranan antara lain meningkatkan kekuatan tarik kuningan (1% Al

meningkatkan *tensile strength* 88 N/mm^2 ^[1]. Selain itu penambahan Al meningkatkan kecenderungan terbentuknya fasa β , kestabilan meningkat, dan mencegah terjadinya *grain growth* sehingga butir yang dihasilkan lebih halus. Sifat khusus dari kuningan yang mengandung Al adalah adanya lapisan *aluminium oxide* yang akan menyebabkan efek *soldering*^[1], sehingga menyulitkan pada saat casting, tetapi dengan adanya Al akan meningkatkan mampu alir cairan logam. Untuk proses pengecoran memang dengan kandungan Al $< 1\%$ ini lebih meningkatkan keenceran dari cairan logam kuningan, akan tetapi kurang memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanis dan struktur mikro.

Selain itu kadar Fe yang tinggi (Tabel 4.1), memberikan efek peningkatan kekuatan dan kekerasan. Karena Fe bertindak sebagai penghalus butir^[6].

4.2 Struktur Mikro

Pada proses perubahan bentuk peranan dari struktur mikro sangat penting terutama besar butir. Perubahan besar butir dapat dilakukan dengan berbagai cara salah satunya adalah perlakuan panas *annealing*. Pada temperatur ruang, butir yang lebih halus cenderung meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasannya sehingga kurang cocok untuk dilakukan perubahan bentuk, sedangkan butir yang besar cenderung meningkatkan keuletan sehingga lebih cocok untuk perubahan bentuk^[25]. Pada penelitian kali ini etsa yang digunakan adalah FeCl_3 dengan kadar 18 % ditambah alkohol kadar 96 %, kemudian diberi tetesan HCl sebanyak 2-3 tetes. Sampel dicelupkan pada larutan etsa selama 10 – 15 detik. Hasil dari foto mikro dapat dilihat pada halaman selanjutnya. Tabel 4.2 berikut ini merupakan ringkasan hasil penghitungan besar butir.

Tabel 4.2 Hasil pengukuran besar butir

No.	Kondisi Sampel	Besar Butir	Standar
1.	Pengerolan dingin	$71 \pm 2,3 \mu\text{m}$	$\pm 0,03 - 0,07 \text{ mm}$ (30 – 70 μm)
2.	Anil temperatur 500° waktu 3 menit	$25 \pm 5,3 \mu\text{m}$	
3.	Anil temperatur 600° waktu 3 menit	$55 \pm 1,5 \mu\text{m}$	
4.	Anil temperatur 700° waktu 3 menit	$59 \pm 5,6 \mu\text{m}$	
5.	Anil temperatur 600° waktu 2 menit	$45 \pm 4,1 \mu\text{m}$	
6.	Anil temperatur 600° waktu 3 menit	$53 \pm 1,6 \mu\text{m}$	
7.	Anil temperatur 600° waktu 4 menit	$58 \pm 6,2 \mu\text{m}$	

4.2.1 Kondisi Setelah Pengerolan



Gambar 4.1 Menunjukkan butir pipih pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .



Gambar 4.2 Menunjukkan potongan melintang butir pipih pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .



Gambar 4.3 Menunjukkan potongan memanjang butir pipih dilihat dari atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .

Jika dilihat dari samping terlihat butir pipih yang tebal dan memanjang sesuai arah canainya, untuk posisi depan terlihat butir yang pipih sedikit bulat dan memanjang, sedangkan untuk posisi atas terlihat butir yang bulat tetapi memanjang (lihat Gambar 4.1, 4.2 dan 4.3). Struktur mikro pada kondisi setelah pengerolan memiliki besar butir sekitar 0,071 mm (71 μm) (lihat Tabel 4.2).

$$\% \text{ Reduksi} = \frac{\text{tebal awal} - \text{tebal akhir}}{\text{tebal awal}} \times 100\% = \frac{53 - 3,1}{53} = 94\%$$

Setelah proses canai dingin, kondisi butir dari sampel kuningan 70/30 berbentuk pipih memanjang hal ini disebabkan oleh beban tekan akibat proses pengerolan. Dengan tebal awal 53 mm pelat mengalami proses pengerolan menjadi 3,1 mm. Jadi total reduksi dari proses pengerolan ini adalah sekitar 94 %. Proses pengerolan tersebut mengakibatkan perubahan bentuk yang permanen yang sering disebut daerah plastis. Pada saat pengerolan beban yang diberikan melebihi dari kekuatan luluh / *yield stress* tetapi masih dibawah kekuatan tarik maksimal / UTS dari sampel sehingga tidak mengalami retak. Perubahan struktur mikro ini terjadi karena adanya *sliding* dislokasi. Jika deformasi dinaikkan secara terus-menerus mengakibatkan dislokasi akan saling menghambat, hal ini mengakibatkan material menjadi lebih keras dan kuat^[10]. Ukuran butir setelah dilakukan canai dingin ini adalah 0,071 mm (71 μm), dimana ini kurang sesuai dengan standar *drawability* yang membutuhkan butir yang lebih halus dan bulat yaitu sekitar 0,03 – 0,06 mm. Jika dengan kondisi butir seperti ini dilakukan proses pengubahan bentuk akan cenderung terjadi retak yang dikarenakan tegangan sisa dari proses canai masih tinggi.

4.2.2 Kondisi Anil Waktu Tahan 3 menit dengan Temperatur 500 °C



Gambar 4.4 Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl₃.



Gambar 4.5 Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl₃.



Gambar 4.6 Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl₃.

Jika dilihat dari samping menunjukkan sudah mulai terjadi perubahan butir akan tetapi ini baru awal dari rekristalisasi sehingga terlihat hanya sebagian yang terekristalisasi dan sebagian masih berbentuk pipih memanjang. Pada posisi depan, hampir sama dengan posisi samping dimana mulai terjadi rekristalisasi, tetapi masih belum sepenuhnya dimana ditandai masih ada butir pipih memanjang hasil canai, pada bagian atas, butir yang dihasilkan sudah terlihat bulat dan terekristalisasi tetapi juga masih kurang sempurna (lihat Gambar 4.4, 4.5 dan 4.6). Struktur mikro yang dihasilkan pada kondisi ini adalah sekitar 0,025 mm (25 μm) (lihat Tabel 4.2).

Pada anil dengan temperatur 500 $^{\circ}\text{C}$ selama 3 menit. Temperatur ini merupakan batas bawah temperatur rekristalisasi yang diambil pada penelitian ini, sesuai dengan diagram fasa kuningin 70/30, rentang temperatur rekristalisasi dari material ini adalah 450 – 680 $^{\circ}\text{C}$. Pada kondisi ini, sampel belum terekristalisasi secara sempurna, dimana hanya batas butir yang mengalami pengintian. Tempat pengintian dari proses rekristalisasi adalah batas butir yang memiliki energi regangan yang tinggi. Selain itu karena waktu anil yang kurang mengakibatkan rekristalisasi tidak terjadi secara sempurna, dimana proses rekristalisasi terjadi jika mendapat energi aktivasi panas yang cukup^[11]. Untuk itu temperatur anil yang rendah perlu membutuhkan waktu tahan yang lebih lama. Besar butir yang didapatkan pada kondisi ini lebih kecil daripada setelah dilakukan pengerolan, dimana ukuran butirnya adalah 0,025 mm (25 μm).

Proses pengintian sangat dipengaruhi oleh derajat deformasi yang dilakukan pada sampel. Dimana saat dilakukan proses deformasi, regangan dari sampel akan bertambah seiring bertambahnya % *cold work*. Regangan yang lebih tinggi akan didapatkan lebih banyak pengintian dari butir sehingga butir yang didapatkan setelah anil lebih halus. Batas butir merupakan tempat pengintian yang paling sering terjadi untuk proses anil. Untuk itu semakin tinggi regangan yang dialami oleh logam maka inti rekristalisasi yang terbentuk juga semakin banyak sehingga ukuran butir yang didapatkan setelah proses anil akan lebih kecil^[10].

4.2.3 Kondisi Anil Waktu Tahan 3 menit dengan Temperatur 600 °C



Gambar 4.7 Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .



Gambar 4.8 Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .



Gambar 4.9 Menunjukkan butir bulat-bulat ini tidak beraturan menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .

Pada posisi samping, terlihat butir bulat yang tidak beraturan ini menandakan bahwa telah terjadi rekristalisasi secara menyeluruh pada pelat kuningan 70/30 (lihat Gambar 4.7). Untuk posisi depan hampir sama dengan samping dimana terlihat butir yang bulat tidak beraturan (lihat Gambar 4.8). Sedangkan posisi atas juga terlihat kemiripan dengan kedua posisi yang lain dimana telah terjadi rekristalisasi secara menyeluruh pada pelat kuningan 70/30 (lihat Gambar 4.9). Selain itu, kondisi inilah yang diharapkan sesuai dengan apa yang ingin dicapai pada penelitian ini. Besar butir pada kondisi anil 600 °C selama 3 menit ini sekitar 0,055 mm (55 µm) (lihat Tabel 4.2).

Pada kondisi anil temperatur 600 °C selama 3 menit butir yang didapatkan hampir dari semua posisi adalah 0,055 mm (55 µm). Besar butir yang dihasilkan sesuai dengan standar dari proses perubahan bentuk. Hal ini disebabkan temperatur anil yang diambil berada ditengah-tengah temperatur anil kuningan 70/30 yaitu 450 – 680 °C ini berarti temperatur rekristalisasi benar-benar optimal. Pada temperatur anil 600 °C ini mampu mendorong inti-inti rekristalisasi dan melepas energi regangan yang masih tersimpan dalam butir, sehingga butir telah terekristalisasi bebas dari tegangan. Butir yang dihasilkan pada temperatur ini merata dan baik dalam butir maupun batas butir, ini dikarenakan kecepatan pengintian dan pertumbuhan butir seimbang. Ketika butir lama tergantikan butir yang baru dan bebas regangan ini berarti sampel tersebut telah terekristalisasi sempurna^[11].

4.2.4 Kondisi Anil Waktu Tahan 3 menit dengan Temperatur 700 °C



Gambar 4.10 Menunjukkan butir bulat yang menandakan telah terjadi pertumbuhan butir pada posisi samping, selain itu terdapat fenomena *twinning*. Perbesaran 200X. Etsa FeCl₃.



Gambar 4.11 Menunjukkan butir bulat yang menandakan telah terjadi pertumbuhan butir pada posisi depan, selain itu terdapat fenomena *twinning*. Perbesaran 200X. Etsa FeCl₃.



Gambar 4.12 Menunjukkan butir bulat yang menandakan telah terjadi pertumbuhan butir pada posisi atas, selain itu terdapat sedikit fenomena *twinning*. Perbesaran 200X. Etsa FeCl₃.

Pada posisi samping terlihat butir yang berbentuk bulat besar karena adanya pertumbuhan butir dimana ada fenomena butir satu memakan butir yang lain. Selain itu, ada fenomena lain yaitu adanya *twinning* karena mekanisme *slip* akibat pergerakan butir (lihat Gambar 4.10). Begitu juga pada posisi depan dan atas, terlihat pertumbuhan butir dan *twinning* (lihat Gambar 4.11 dan 4.12). Besar butir pada kondisi ini adalah sekitar 0,059 mm (59 μm) (lihat Tabel 4.2).

Untuk sampel dengan kondisi anil 700 $^{\circ}\text{C}$ selama 3 menit, hampir semua posisi didapatkan besar butir sekitar 0,059 mm (59 μm). Hal ini menunjukkan kecenderungan terjadinya pertumbuhan butir (*grain growth*). Temperatur 700 $^{\circ}\text{C}$ ini diambil sebagai batas atas temperatur rekristalisasi dari kuningan yaitu antara 450 – 680 $^{\circ}\text{C}$. Dengan temperatur yang cukup tinggi ini diharapkan terjadi fenomena pertumbuhan butir. Hasil yang diharapkan sesuai dengan keinginan dimana dengan temperatur tersebut foto yang didapatkan terjadi penambahan besar butir. Hal ini berarti rekristalisasi berjalan semakin cepat akibat energi panas dan deformasi yang diberikan pada sampel tinggi, sehingga mempercepat pertumbuhan butir. Butir yang lebih besar menurunkan mampu bentuk material. Selain itu ada fenomena lain karena pengaruh dari aluminium yaitu terjadinya *twinning*. Aluminium bertindak sebagai fasa yang terdispersi merata pada matriks tembaga dan bertindak sebagai penghambat pergerakan dislokasi. *Twinning* ini terjadi karena adanya pergerakan dislokasi saat rekristalisasi. Pergerakan akan terhambat oleh aluminium yang terdispersi tersebut dan menimbulkan energi salah susun atau *stacking fault*^[10]. Energi salah susun mengakibatkan terjadinya pergeseran dari dislokasi. Pergeseran inilah yang sering disebut *twinning*. Pertumbuhan butir dapat dicegah jika ada fasa kedua yang terdispersi. Pada sampel terdapat Al yang bertindak sebagai penghambat terjadinya pertumbuhan butir. Sesuai dengan pengaruh Al, sebagai penghalus butir dan mencegah pertumbuhan butir^[1].

4.2.5 Kondisi Anil Temperatur 600 °C dengan Waktu Tahan 2 Menit



Gambar 4.13 Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .



Gambar 4.14 Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .



Gambar 4.15 Menunjukkan butir bulat kecil-kecil ini berarti mulai terjadi rekristalisasi tetapi baru awal pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .

Kondisi ini hampir sama dengan kondisi anil 500⁰, 3 menit. Pada posisi samping terlihat sudah mulai terjadi rekristalisasi tetapi hanya dibagian pinggir (lihat Gambar 4.13). Untuk posisi depan butir juga sudah mulai terekristalisasi dimana terlihat adanya penghalusan butir, tetapi belum sempurna hal ini terjadi karena belum cukup waktu untuk terjadi pertumbuhan butir pada tahap rekristalisasi (lihat Gambar 4.14). Sedangkan pada bagian atas juga hampir sama dengan posisi sebelumnya, dimana belum terekristalisasi secara sempurna (lihat Gambar 4.15). Besar butir yang dihasilkan pada kondisi ini adalah sekitar 0,045 mm (45 μ m) (lihat Tabel 4.2).

Pada sampel dengan kondisi anil 600 ⁰C, waktu 2 menit memiliki hasil yang hampir sama dengan kondisi anil temperatur 500 ⁰C waktu 3 menit, dimana pada semua posisi memiliki kecenderungan yang sama yaitu butir belum terekristalisasi secara sempurna atau bisa dikatakan masih mengalami tahap *recovery*. Pada kondisi *recovery* terjadi penghilangan tegangan sisa canai dingin dan terbentuk sub batas butir yang merupakan calon dari butir itu sendiri^[9]. Oleh karena itu butir yang dihasilkan kecil dan kasar karena masih berupa *sub grain*. Pada kondisi ini dapat dikatakan waktu tahan anil kurang lama, dimana semakin lama waktu tahan maka proses rekristalisasi akan berlangsung lebih sempurna karena energi termal yang diberikan pada sampel semakin besar juga^[1,11]. Hasil yang didapat pada kondisi temperatur anil 600 waktu 2 menit adalah sekitar 0,045 mm (45 μ m). Ini kurang memenuhi standar dari untuk pengubahan bentuk yaitu 0,03 – 0,06 mm. Jadi kondisi ini belum optimal digunakan untuk variabel proses pengubahan bentuk.

4.2.6 Kondisi Anil Temperatur 600 °C dengan Waktu Tahan 3 Menit



Gambar 4.16 Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl₃.



Gambar 4.17 Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl₃.



Gambar 4.18 Menunjukkan butir bulat-bulat tidak beraturan ini menandakan bahwa butir telah terekristalisasi sempurna pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl₃.

Pada posisi samping menunjukkan keseluruhan butir telah terekristalisasi dengan ditunjukkan butir yang bulat tidak beraturan pada seluruh permukaan sampel (lihat Gambar 4.16). Untuk posisi depan dan atas juga memiliki kemiripan dengan posisi samping dimana terbentuk butir yang bulat tidak beraturan yang menunjukkan telah terjadi rekristalisasi secara sempurna pada kondisi ini (lihat Gambar 4.17 dan 4.18). Besar butir yang dihasilkan pada kondisi ini adalah sekitar 0,053 mm (53 μm) (lihat Tabel 4.2).

Pada kondisi ini kecepatan dan pertumbuhan butir memiliki kecepatan yang seimbang, dimana ditandai oleh butir yang terbentuk tidak beraturan dan merata diseluruh permukaan sampel. Dari hasil besar butir yang didapat untuk kondisi ini adalah sekitar 0,53 mm (53 μm), hanya berselisih sedikit dengan kondisi variabel waktu tahan 3 menit dengan temperatur 600 $^{\circ}\text{C}$ yaitu 0,055 mm (55 μm) Ini berarti kondisi ini benar-benar variabel yang optimal untuk dilakukan proses anil pada kuningan 70/30, Al < 1%.

4.2.7 Kondisi Anil Temperatur 600 $^{\circ}\text{C}$ dengan Waktu Tahan 4 Menit

Pada posisi samping menunjukkan telah terjadinya pertumbuhan butir dengan ditandai butir yang lebih besar dan terbentuk *twinning* (lihat Gambar 4.19). Untuk posisi depan terlihat butir yang lebih besar, pertumbuhan ini terjadi karena disebabkan oleh proses pemanasan dan waktu tahan yang cukup lama (lihat Gambar 4.20). Sedangkan untuk posisi atas menunjukkan butir terekristalisasi dan berkembang seperti terlihat pada Gambar 4.21. Besar butir yang dihasilkan pada kondisi ini adalah sekitar 0,058 mm (58 μm) (lihat Tabel 4.2).

Pada kondisi ini butir yang dihasilkan cenderung membesar karena fenomena pertumbuhan butir. Walaupun temperatur yang diambil pertengahan dari temperatur rekristalisasi kuningan akan tetapi waktu tahan yang lebih lama mengakibatkan waktu pemanasan yang lebih lama juga. Semakin lama waktu pemanasan, energi panas yang diberikan juga semakin besar sehingga kemungkinan untuk terjadinya pertumbuhan butir semakin cepat karena energi panas berlebih tersebut. Pada kondisi ini didapat besar butir sekitar 0,058 mm (58 μm), ukuran butir ini sudah mencapai batas atas dari standar besar butir, sehingga kurang cocok jika digunakan pada proses pengubahan bentuk.



Gambar 4.19 Menunjukkan butir bulat yang menandakan telah terjadi pertumbuhan butir pada posisi samping. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .



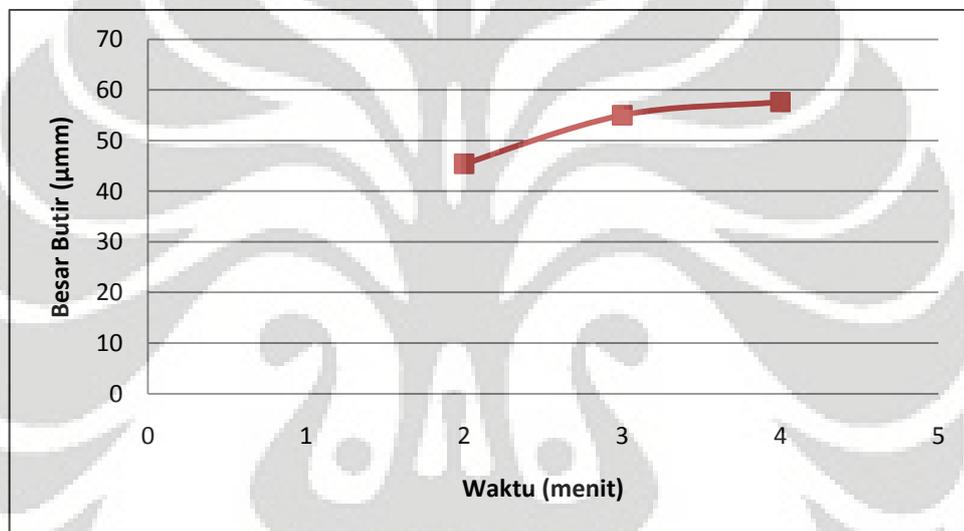
Gambar 4.20 Menunjukkan butir bulat yang menandakan telah terjadi pertumbuhan butir pada posisi depan. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .



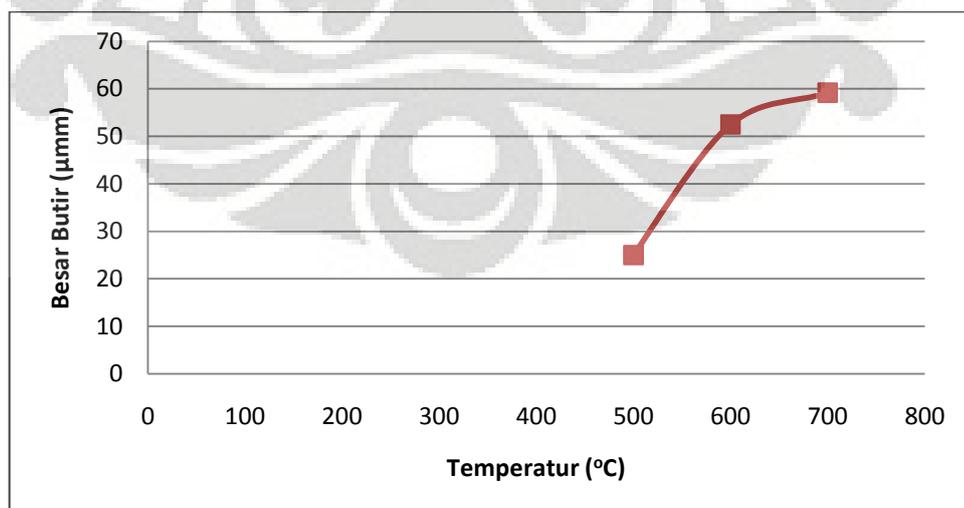
Gambar 4.21 Menunjukkan butir bulat yang menandakan telah terjadi pertumbuhan butir pada posisi atas. Perbesaran 200X. Etsa FeCl_3 .

4.2.8 Hubungan Grafik Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Anil Terhadap Besar Butir

Seiring dengan peningkatan variabel anil baik temperatur dan waktu tahan, akan menyebabkan pertumbuhan butir, sehingga butir yang didapat lebih besar. Hal ini dikarenakan energi panas yang diberikan untuk pergerakan dislokasi berlebihan. Faktor yang berpengaruh saat anil ini antara lain adalah % CW, dan energi panas. Semakin rendah % CW maka energi panas yang diberikan harus lebih besar untuk terjadinya rekristalisasi, begitu pula sebaliknya. Hubungan antara temperatur dan waktu tahan anil terhadap besar butir dapat dilihat pada Gambar 4.22 dan 4.23.



Gambar 4.22 Grafik pengaruh waktu tahan anil terhadap besar butir.



Gambar 4.23 Grafik pengaruh temperatur anil terhadap besar butir.

Pada Gambar 4.22, terlihat bahwa setelah dilakukan canai dingin terjadi penurunan besar butir secara drastis setelah anil 600 °C waktu 2 menit, yang dikarenakan semakin lama waktu tahan sehingga mengakibatkan ukuran butir yang dihasilkan semakin besar juga. Selanjutnya akan mengalami penambahan ukuran butir pada waktu tahan 3 dan 4 menit. Hal ini sesuai dengan literatur dimana semakin lama waktu tahan anil akan mengakibatkan terjadinya pertumbuhan butir. Salah satu faktor penyebab dari pertumbuhan ini adalah energi panas. Dalam hal ini adalah waktu tahan, semakin lama waktu tahan berarti energi panas yang diberikan juga semakin besar. Energi aktivasi panas bertindak sebagai energi penggerak / *driving force* dislokasi pada material. Karena pergerakan dislokasi tersebut butir akan tumbuh lebih besar. Akan tetapi aluminium yang terdispersi merata pada kuningan akan menghambat laju pertumbuhan butir karena disini Al bertindak sebagai fasa kedua. Sesuai yang telah dipelajari bahwa peranan Al pada kuningan adalah sebagai penghalus butir dengan cara menghambat laju pertumbuhan butir, dimana dia akan bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi^[10,12].

Sedangkan pada Gambar 4.23, memiliki hasil hampir sama dengan variabel waktu tahan, dimana sampel hasil canai dingin terjadi penurunan ukuran butir setelah dilakukan anil dengan temperatur 500 °C waktu 3 menit, dan selanjutnya akan bertambah ukuran butir seiring meningkatnya temperatur 600 °C dan 700 °C. Sesuai literatur yang didapat semakin tinggi temperatur anil maka akan terjadi pertumbuhan butir yang menyebabkan ukuran butir bertambah besar.

Di sini dapat dilihat variabel baik waktu tahan dan temperatur tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap besar butir, hal ini dikarenakan baik variabel waktu dan temperatur sama-sama memberikan fungsi yang sama yaitu memberikan energi panas terhadap kuningan 70/30 tersebut. Energi panas mengakibatkan proses rekristalisasi yang semakin cepat sehingga lebih memungkinkan terjadi pertumbuhan butir jika energi panas yang diberikan berlebih^[12].

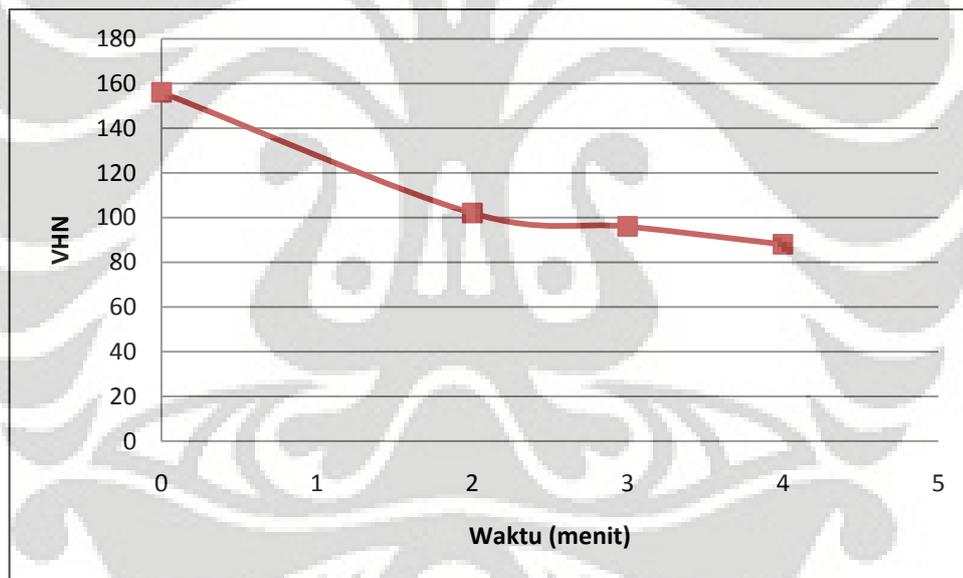
4.3 Kekerasan (*Hardness*)

Dari kedua variabel baik waktu dan temperatur didapatkan hasil sesuai Tabel 4.3.

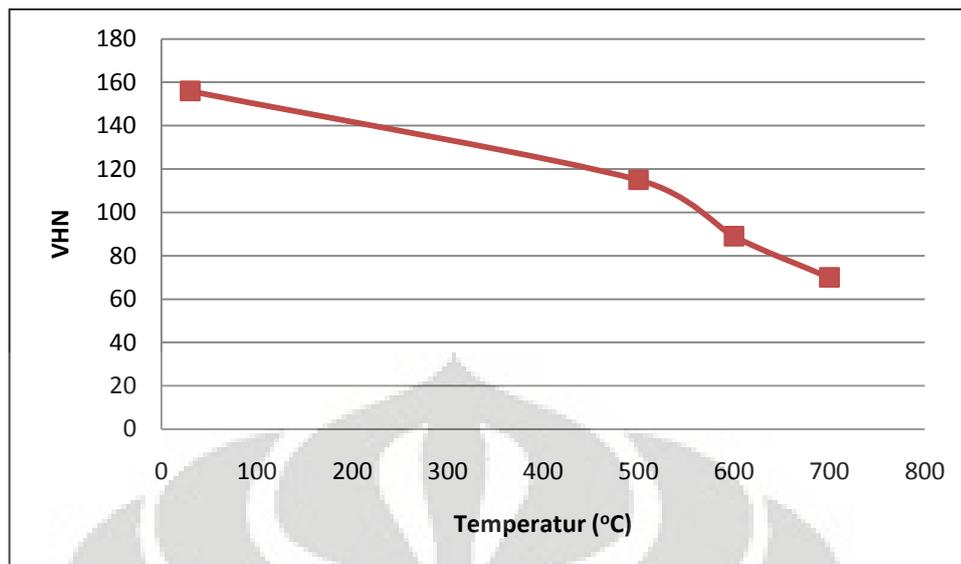
Tabel 4.3 Hasil uji kekerasan vickers

Kondisi Pemanasan	Nilai Kekerasan Vickers (VHN)	Nilai Kekerasan Brinell (BHN)	Standard
Setelah proses canai dingin	156 ± 14	136	82 – 102 VHN (75 – 90 BHN)
Temperatur 600 °C, waktu 2 menit	102 ± 9	90	
Temperatur 600 °C, waktu 3 menit	96 ± 2	85	
Temperatur 600 °C, waktu 4 menit	88 ± 7	79	
Waktu 3 Menit, temperatur 500 °C	115 ± 9	102	
Waktu 3 Menit, temperatur 600 °C	89 ± 3	79	
Waktu 3 Menit, temperatur 700 °C	70 ± 2	63	

Untuk hubungan antara kekerasan dan variabel proses anil dapat dilihat pada Gambar 4.24 dan 4.25.



Gambar 4.24 Grafik hubungan waktu tahan anil terhadap kekerasan kuningan 70/30, Al < 1 %.



Gambar 4.25 Grafik hubungan temperatur anil terhadap kekerasan kuningan 70/30, Al < 1 %.

Nilai kekerasan yang didapat sebenarnya adalah nilai vickers, karena pengujian yang dilakukan menggunakan metode vickers dan sampel yang terlalu tipis, sehingga dikhawatirkan jika menggunakan brinell akan merusak sampel. Selanjutnya dilakukan konversi nilai kekerasan menjadi brinell sesuai dengan ASTM E112.

Dari Tabel 4.3 dapat dilihat nilai kekerasan kuningan 70/30 setelah proses canai memiliki nilai kekerasan yang sangat tinggi. Nilai kekerasan setelah canai adalah sekitar 156 VHN (136 BHN), nilai ini menunjukkan bahwa material kuningan memiliki kekerasan yang tinggi setelah canai. Peningkatan kekerasan ini disebabkan oleh peningkatan % CW yang dilakukan pada sampel. Semakin tinggi % CW maka dislokasi akan saling menghambat sehingga sulit untuk digerakkan. Karena dislokasi sulit untuk bergerak maka material lebih susah dideformasi dengan kata lain material tersebut telah mengalami peningkatan sifat mekanis baik kekerasan maupun kekuatan tarik^[10]. Selain itu pengaruh dari aluminium juga menjadi salah satu penyebab kekerasan yang tinggi dari kuningan ini. Hal ini menyebabkan material tidak dapat dilakukan proses perubahan bentuk pada kondisi ini.

Setelah dilakukan anil maka kekerasan akan turun, hal ini dikarenakan ada pengurangan tegangan sisa canai dan perubahan ukuran butir. Pada kondisi anil temperatur 600 °C waktu 2 menit terjadi penurunan nilai kekerasan yaitu dari 156

VHN (136 BHN) menjadi 102 VHN (90 BHN). Hal ini terjadi karena terjadi *stress relieving* / pelepasan tegangan sisa canai. Akan tetapi seperti pada analisa struktur mikro sebelumnya, pada kondisi ini belum terjadi rekristalisasi secara sempurna, karena masih diduga terjadi *recovery*^[26], sehingga pengaruh ukuran butir belum signifikan terhadap nilai kekerasan. Jadi pada kondisi ini, pengurangan nilai kekerasan lebih disebabkan oleh penghilangan tegangan sisa.

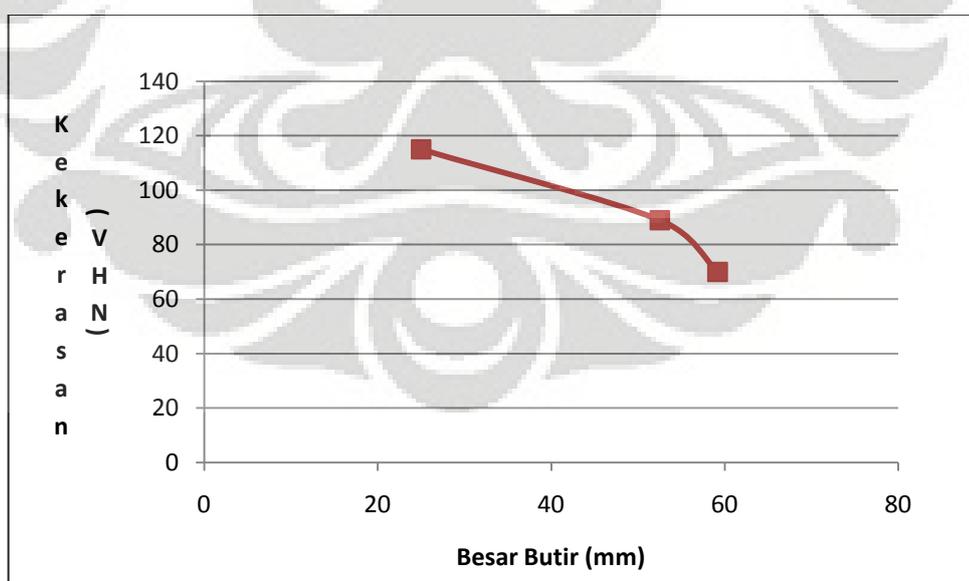
Selanjutnya dilakukan anil pada temperatur 600 °C dengan waktu tahan 3 dan 4 menit. Pada kondisi ini terjadi penurunan kekerasan yaitu 96 VHN (85 BHN) dan 88 VHN (79 BHN) secara berturut-turut. Hal ini disebabkan oleh perubahan ukuran butir yaitu terjadinya pertumbuhan butir. Sesuai teori, pada temperatur ruang butir yang lebih kecil akan lebih menghambat dislokasi, sedangkan butir yang lebih besar memiliki batas butir yang sedikit sehingga dislokasi lebih bebas bergerak, sehingga mudah dilakukan deformasi^[25]. Pada kondisi ini butir telah terekristalisasi bahkan sudah mengalami pertumbuhan butir sehingga butir telah bebas dari tegangan. Jadi penurunan kekerasan pada proses selanjutnya ini lebih disebabkan oleh perubahan ukuran butir. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.24.

Sedangkan untuk variabel temperatur memiliki nilai yang cenderung sama dengan variabel waktu. Tetapi terjadi perbedaan pada temperatur 500 °C waktu 3 menit. Kekerasan yang didapat lebih tinggi yaitu sekitar 115 VHN (102 BHN), hal ini dimungkinkan karena temperatur yang diambil merupakan batas bawah dari temperatur rekristalisasi kuningan yaitu 450 - 680 °C, sehingga kondisi ini lebih cenderung ke tahap *recovery* sepenuhnya, baru mau masuk ke tahap rekristalisasi, walaupun butir rekristalisasi sudah tampak. Selanjutnya temperatur dinaikkan menjadi 600 °C dan 700 °C, terjadi penurunan kekerasan lebih drastis secara berturut-turut adalah 89 VHN (79 BHN) dan 70 VHN (63 BHN) dibandingkan jika kita mengubah variabel waktu tahan lihat Gambar 4.25, hal ini disebabkan oleh energi panas yang diberikan akan bertambah, sehingga akan mempercepat proses rekristalisasi dan jika berlebih akan meningkatkan pertumbuhan butir^[26]. Unsur aluminium yang ditambahkan lebih memiliki peran terhadap perlindungan unsur Zn supaya tidak menguap dan meningkatkan keenceran cairan logam kuningan saat peleburan. Komposisi Al yang kurang dari 1 % ini kurang

berpengaruh terhadap sifat mekanis khususnya kekerasan dari kuningan 70/30, sesuai literatur yang didapat nilai aluminium mulai berpengaruh pada sifat mekanis kuningan 70/30 jika penambahannya melebihi 1 %, karena 1 % Al itu setara dengan dengan 6 % kadar seng^[4]. Selain itu Al juga memicu terbentuknya fasa β yang cenderung keras dan rapuh.

Dari semua variabel proses anil baik temperatur dan waktu tahan diatas, didapatkan temperatur dan waktu tahan yang optimal untuk nilai kekerasan kuningan 70/30 dengan Al < 1% yaitu 600 °C waktu 3 menit. Ini dikarenakan temperatur yang diambil merupakan temperatur pertengahan dari temperatur rekristalisasi kuningan 70/30 dan waktu yang optimal sesuai prosedur anil cepat. Kekerasan yang didapatkan pada kondisi ini memiliki rentang yaitu sekitar 80 – 100 VHN (70 – 90 BHN), dimana kekerasan ini sesuai dengan standar yang disyaratkan oleh industri pelat kuningan yaitu sekitar 82 – 102 VHN (75 – 90 BHN).

Faktor yang berpengaruh pada kekerasan yaitu besar butir. Butir yang lebih besar akan menurunkan kekerasan, sedangkan butir yang lebih kecil akan meningkatkan kekerasan karena adanya penghambatan dislokasi. Akan tetapi hal ini hanya berlaku pada kondisi temperatur ruang, tidak untuk temperatur tinggi. Hubungan besar butir dan kekerasan dapat dilihat pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26 Grafik hubungan besar butir dan kekerasan

4.4 Tarik (*Tensile*)

Pada pengujian tarik ini sampel yang digunakan adalah sampel dengan kondisi anil temperatur 600 °C dengan waktu tahan 3 menit. Temperatur 600 °C diambil karena merupakan batas pertengahan dari temperatur rekristalisasi kuningan 70/30 yaitu antara 450 – 680 °C, sedangkan waktu tahan 3 menit diambil berdasarkan proses anil cepat / *continuous annealing* yang diperkirakan memakan waktu selama 3 menit. Hasil yang didapat dari kondisi anil ini sesuai yang diharapkan, untuk itu variabel inilah yang digunakan acuan sampel uji tarik, untuk melihat nilai r dan n dari sampel kuningan 70/30 Al<1%, apakah nilainya sesuai untuk dilakukan proses perubahan bentuk. Nilai yang diambil dari uji tarik ini adalah % elongasi, kekuatan tarik maksimum (UTS), koefisien pengerasan regang (*strain hardening exponent*), koefisien anisotropi normal dan koefisien anisotropi planar.

Nilai yang didapat pada kondisi anil temperatur 600 waktu 3 menit adalah % elongasi 47,67%, kekuatan tarik maksimal 36,97 kg/mm², koefisien pengerasan regang 0,51, koefisien anisotropi normal sekitar 1,72 dan koefisien anisotropi planar sekitar 0,05. Data lebih lengkap dapat dilihat Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data hasil uji tarik

Parameter Pengujian	Posisi sampel uji tarik			
	0 ⁰	45 ⁰	90 ⁰	Rata-rata
% Elongasi	45,3	47,3	50,5	47,7
UTS (Kg/mm ²)	37,3	36,6	37	37
Koefisien pengerasan regang (n)	0,53	0,5	0,5	0,5
Koefisien anisotropi normal (r)	1,8	1,7	1,7	1,7
Koefisien anisotropi planar (Δr)	1,8	1,7	1,7	0,05

4.4.1 Pemuluran (*Elongation*)

Dari pengamatan elongasi sampel kuningan 70/30 dengan Al <1%, elongasi sampel pada arah 45⁰ dan 90⁰ memiliki nilai lebih tinggi daripada arah 0⁰ (lihat Tabel 4.4). Perbedaan nilai ini disebabkan oleh pengerolan dan pelunakan atau anil yang mengakibatkan pelat bersifat anisotropi. Anisotropi merupakan perbedaan sifat mekanis pada arah yang berbeda, disini adalah 0⁰, 45⁰ dan 90⁰

terhadap arah pengerolan atau deformasi^[12]. Tentunya jika sampel hasil canai belum dilakukan perlakuan panas, nilai elongasi sangat kecil. Setelah dilakukan anil nilai elongasi akan meningkat karena ada pengarahan kristal pada arah tertentu. Selain itu setelah proses anil, tegangan sisa canai dingin akan hilang sehingga meningkatkan nilai elongasi dari logam. Hal ini disebabkan tegangan sisa tersebut akan bertindak sebagai inisiasi tegangan saat dilakukan penarikan yang berakibat buruk yaitu mudah putus atau retak. Untuk butir juga berpengaruh, butir yang besar cenderung memiliki % elongasi yang besar juga pada material polikristalin, hal ini dikarenakan butir yang lebih besar memiliki batas butir yang sedikit sehingga dislokasi mudah bergerak. Nilai elongasi tidak begitu berpengaruh terhadap kualitas mampu bentuk dari logam kuningan, hanya sebatas bahwa kuningan tersebut bersifat ulet / *ductile*, sehingga cocok untuk proses mampu bentuk.

4.4.2 Kekuatan Tarik Maksimum (UTS)

Nilai UTS dari masing-masing arah memiliki perbedaan yang sedikit, hal ini merupakan sifat anisotropi dari kuningan 70/30 setelah dilakukan pengerolan. Jika kekuatan tarik semakin tinggi ini berarti beban yang dibutuhkan untuk mendeformasi bahan secara plastis akan meningkat dan kekuatan maksimum akan menurun seiring peningkatan temperatur anil. Pada kondisi ini didapat nilai UTS pada arah 45° dan 90° secara berturut-turut adalah 36,6 dan 37 kg/mm^2 , nilai ini lebih rendah dari pada arah 0° yaitu 37,3 kg/mm^2 (lihat Tabel 4.4). Ini menunjukkan perbedaan sifat anisotropi dari logam kuningan tersebut. Sesuai literatur yang didapat nilai UTS dari kuningan komposisi 70/30 adalah 32,5 kg/mm^2 ^[27]. Perbedaan nilai ini mungkin disebabkan oleh perbedaan kondisi anil atau parameter lain yang mempengaruhi nilai kekuatan tarik.

4.4.3 Koefisien pengerasan regang (*strain hardening exponent*)

Koefisien pengerasan regang (n) adalah pertambahan kekerasan suatu logam akibat regangan sehingga tegangan yang diperlukan untuk deformasi plastis akan meningkat. Dari Tabel 4.4, nilai rata-rata n yang didapatkan adalah 0,51. Pada arah 45 dan 90 memiliki nilai n sekitar 0,5 dan 0,5 lebih rendah dari pada arah 0° yaitu 0,53. Perbedaan ini terjadi karena adanya sifat anisotropi dari

logam kuningan, selain itu perubahan tekstur juga mempengaruhi nilai n dari kuningan tersebut. Sesuai literatur nilai n yang diharapkan dari suatu proses perubahan bentuk harus berada pada rentang $0 - 1$ ^[12], karena pada nilai ini material bersifat plastis, ini berarti logam tersebut cocok untuk dilakukan proses pengubahan bentuk karena mempunyai sifat plastis yaitu tidak dapat kembali ke bentuk semula. Sedangkan jika nilai n melebihi 1 mengakibatkan material bersifat elastis / dapat kembali ke bentuk semula sehingga tidak cocok untuk pengubahan bentuk. Dari nilai n yang didapatkan telah sesuai dengan literatur yaitu 0,5, ini berarti dari segi peregangan, material ini cocok dilakukan proses pengubahan bentuk.

4.4.4 Koefisien Anisotropi Normal (r)

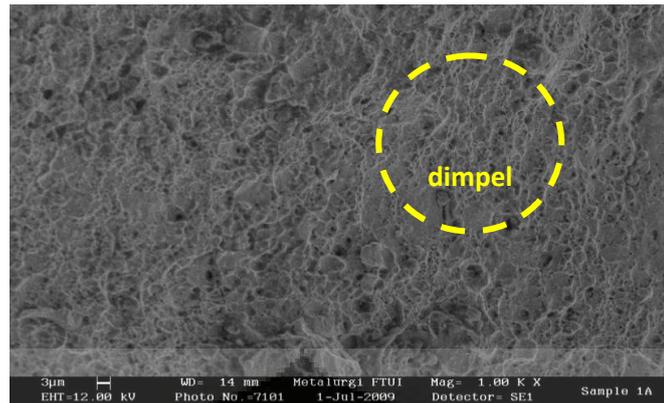
Koefisien anisotropi normal merupakan ketidakseragaman plastis pada logam, khususnya logam hasil canai dingin berdasarkan arah pengerolan yang berbeda. Anisotropi terjadi karena ketidakseragaman kristal dan ketidakseragaman struktur yang dihasilkan oleh pengorientasian elemen struktur seperti batas butir dan fasa. Koefisien anisotropi normal ini menunjukkan perbandingan regangan arah lebar dan tebal dari pelat. Dari Tabel 4.4 dapat dilihat nilai r untuk arah 45^0 dan 90^0 berturut-turut adalah 1,7 dan 1,7, nilai ini lebih rendah dari pada arah 0^0 yaitu 1,8, ini disebabkan oleh hal yang sama pada parameter lain yaitu kecenderungan perubahan tekstur dan sifat anisotropi. Sesuai literatur yang didapat nilai koefisien anisotropi normal yang ideal untuk dilakukan proses pengubahan bentuk adalah > 1 , ini menunjukkan ketahanan logam terhadap deformasi arah tebal lebih baik dari pada arah lebar, sehingga material lebih tahan terhadap penipisan. Jika nilai $r < 1$ maka logam kurang tahan terhadap penipisan^[12]. Ini berarti nilai yang didapatkan dari penelitian ini telah sesuai dengan yang diharapkan yaitu 1,7. Nilai ini mengindikasikan bahwa material kuningan 70/30 Al $< 1\%$, cocok dilakukan proses penipisan arah tebal atau *deep drawing*. Dengan nilai n dan r yang sesuai dengan standar pengubahan bentuk maka variabel anil temperatur 600^0C dengan waktu 3 menit merupakan variabel yang optimal untuk proses pengubahan bentuk kuningan ini.

4.4.5 Koefisien Anisotropi Planar (Δr)

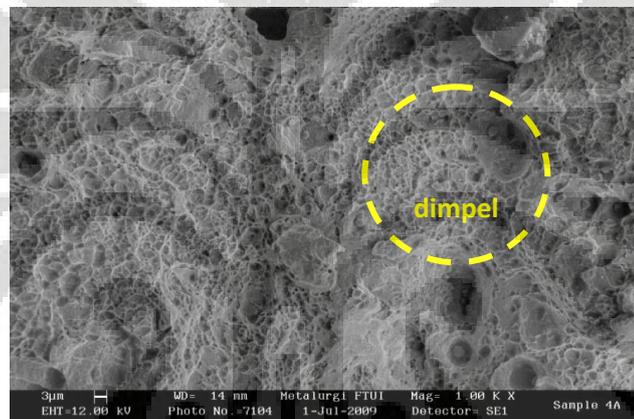
Koefisien anisotropi planar adalah perbedaan sifat yang menyangkut arah-arah pada bidang lembaran logam. Nilai anisotropi planar menunjukkan pengupingan (*earing*) yang terjadi pada proses *deep drawing*. Semakin besar nilai Δr maka semakin besar juga persentase pengupingan yang terjadi^[12]. Perbandingan regangan plastis antara lebar dan tebal merupakan kecenderungan terjadinya pengupingan baik pada arah 0° , 45° dan 90° . Nilai Δr yang didapat dari penghitungan adalah 0,05. Sesuai dengan literatur nilai $\Delta r < 0$ memiliki kecenderungan terjadinya pengupingan pada arah 45° , tetapi jika nilai $\Delta r > 0$ material memiliki kecenderungan terjadi pengupingan pada arah 0° atau 90° . Sebenarnya nilai yang diinginkan adalah mendekati 0 supaya tidak terjadi pengupingan. Karena nilai yang didapat adalah > 0 yaitu 0,05 (lihat Tabel 4.4) maka sampel kuningan 70/30 dengan Al $< 1\%$, ini berarti mendekati 0, tetapi masih memiliki kecenderungan terjadi pengupingan pada arah 0° atau 90° . Keadaan ini akan terlihat jelas jika dilakukan pengujian *deep drawing*. Material yang dianil pada temperatur yang paling rendah sehingga hanya *recovery* yang terjadi akan menunjukkan pengupingan yang disebabkan tekstur deformasi yang asli, kemudian pengupingan tidak akan terbentuk pada sudut yang sama dengan arah pengerolan yang dibentuk pada anil temperatur tinggi karena teksturnya berbeda, dan pada temperatur anil menengah meminimalkan pembentukan tekstur yang kuat dan akhirnya meminimalkan pengupingan^[28]. Akan tetapi hal ini tidak dapat dibuktikan karena keterbatasan sampel, sehingga tidak dapat melakukan pengujian *deep drawing*. Hal ini memungkinkan untuk dilakukan penelitian lain diluar penelitian ini untuk melihat kecenderungan tersebut.

4.5 Permukaan Patahan (*Fractrografi*) Hasil Uji Tarik

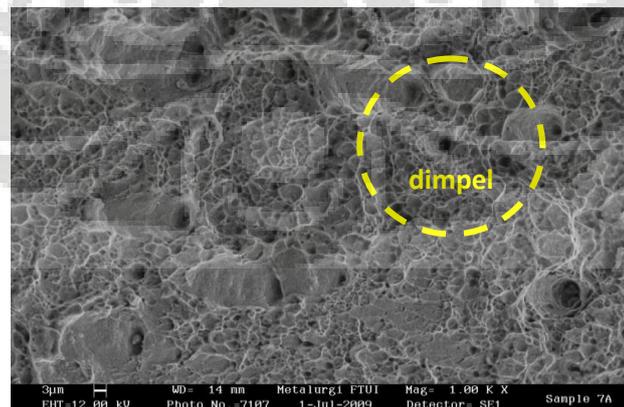
Sampel yang digunakan adalah sampel dengan kondisi anil optimal 600°C waktu 3 menit. Sampel bekas patahan dimounting dan dicoating untuk diuji SEM. Hasil yang didapatkan, pada arah baik 0° , 45° dan 90° memiliki permukaan patahan yang bersifat ulet atau *ductile*, dimana logam akan mengalami deformasi plastis dulu sebelum mengalami perpatahan. Ciri lain dari perpatahan *ductile* adalah terbentuknya dimpel yang merupakan ciri khas dari patahan *ductile*.



Gambar 4.27 Permukaan patahan arah 0^0 menunjukkan ciri-ciri bekas deformasi plastis terlebih dulu sebelum perpatahan yang berarti pelat ini *ductile*, dimana ada ciri-ciri dimpel. Perbesaran 1000X.



Gambar 4.28 Permukaan patahan arah 45^0 menunjukkan ciri-ciri bekas deformasi plastis terlebih dulu sebelum perpatahan yang berarti pelat ini *ductile*, dimana ada ciri-ciri dimpel. Perbesaran 1000X.



Gambar 4.29 Permukaan patahan arah 90^0 menunjukkan ciri-ciri bekas deformasi plastis terlebih dulu sebelum perpatahan yang berarti pelat ini *ductile*, dimana ada ciri-ciri dimpel. Perbesaran 1000X.

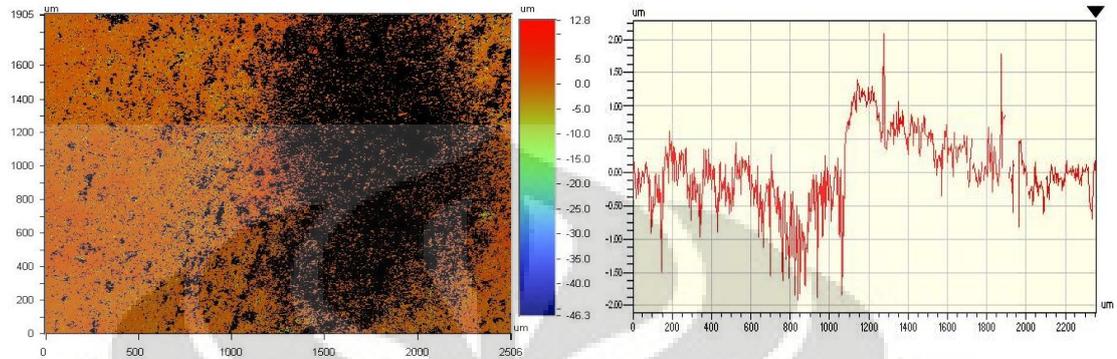
Pengamatan permukaan patahan hasil uji tarik ini hanya ingin menunjukkan bahwa material kuningan 70/30 ini bersifat ulet. Jika dilihat dari semua foto SEM, terlihat ada ciri-ciri dimpel, ini ditunjukkan oleh puncak-puncak seperti gunung. Fenomena ini terlihat jelas pada arah 45° dan 90° (lihat Gambar 4.28 dan 4.29). Sedangkan pada arah 0° fenomena dimpel sedikit terlihat ini berarti arah 45° dan 90° lebih bersifat *ductile* dari pada 0° (lihat Gambar 4.27). Hal ini disebabkan arah 0° merupakan arah pembelahan butir sehingga lebih mudah terjadi perpatahan dengan sedikit deformasi. Perpatahan *ductile* selain memiliki ciri dimpel ada ciri yang lain antara lain yaitu tidak memantulkan cahaya atau permukaan patahan gelap dan daerah plastis lebih luas jika dilihat dari grafik kurva tegangan regangan rekayasa^[25].

4.6 Kekasaran Permukaan (*Surface Roughness*)

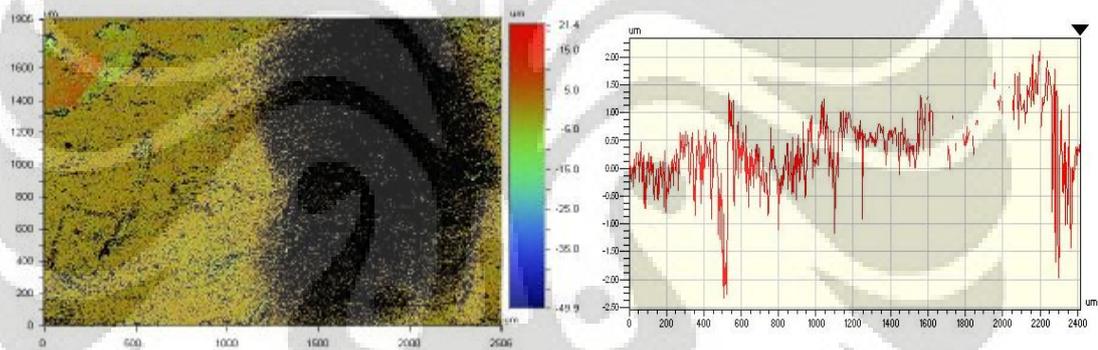
Kekasaran adalah pengukuran tekstur permukaan yang dikuantitatifkan oleh penyimpangan vertikal permukaan sesungguhnya dari bentuk idealnya, jika penyimpangan besar maka permukaan kasar, jika penyimpangannya kecil maka permukaan akan halus. Permukaan kasar menyebabkan terjadinya keausan lebih cepat dan memiliki koefisien gesekan lebih tinggi dari pada permukaan yang halus. Nilai kekasaran permukaan dari kuningan 70/30 setelah dilakukan proses canai adalah sekitar $0,42 \mu\text{m}$ (lihat Gambar 4.30). Jika dibandingkan dengan kondisi setelah anil 600°C selama 3 menit nilai kekasaran menurun menjadi $0,34 \mu\text{m}$ (lihat Gambar 4.31).

Pada saat kondisi setelah pengerolan sampel memiliki kekasaran permukaan yang tinggi diakibatkan oleh proses deformasi yang diberikan pada sampel tersebut. Proses deformasi akan meninggalkan tegangan sisa yang cukup banyak pada permukaan logam kuningan sehingga permukaan logam akan menjadi lebih kasar. Sesuai dengan literatur permukaan yang lebih kasar menyebabkan gesekan yang lebih tinggi sehingga tidak cocok untuk dilakukan perubahan bentuk karena menjadi tidak efektif walaupun pelumasan sudah diberikan. Setelah dilakukan anil temperatur 600°C waktu 3 menit kekasaran permukaan menurun karena penghilangan tegangan sisa permukaan logam dan perubahan butir menjadi lebih halus (bebas tegangan), sehingga dengan butir yang lebih halus, gesekan yang ditimbulkan lebih sedikit. Dengan penurunan kekasaran

permukaan ini proses pengubahan bentuk diharapkan menjadi lebih baik. Kualitas dari kekasaran permukaan logam sangat berhubungan dengan permukaan pengerol. Jika permukaan pengerol lebih halus maka hasil yang didapatkan permukaan logam yang lebih halus^[20,30].

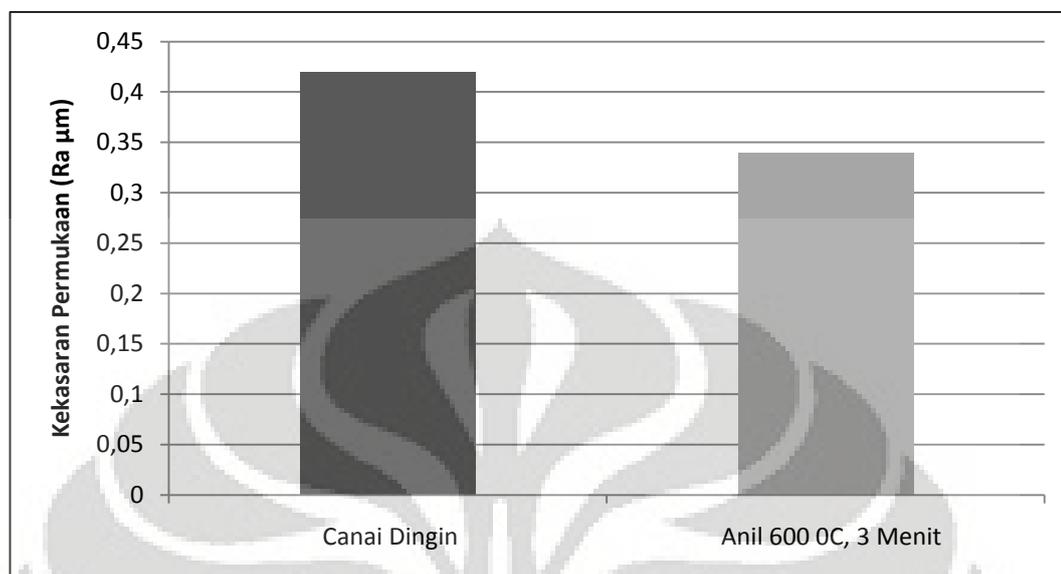


Gambar 4.30 Kekasaran permukaan setelah pengerolan dingin menyebabkan permukaan pelat menjadi tinggi (kiri warna merah) beserta profil distribusi kekasaran (kanan)



Gambar 4.31 Kekasaran permukaan setelah proses anil menyebabkan kekasaran permukaan pelat turun (kiri warna kuning) beserta profil distribusi kekasaran (kanan)

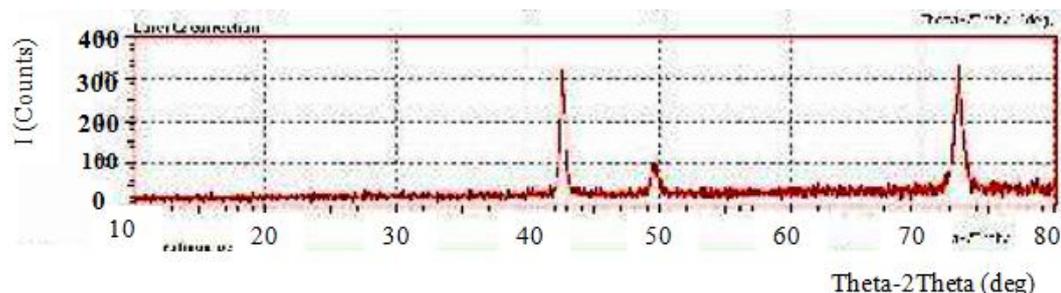
Perubahan kekasaran permukaan kuningan setelah proses pengerolan dan anil dapat dilihat pada Gambar 4.32 berikut.



Gambar 4.32 Grafik perubahan kekasaran permukaan setelah pengerolan dan anil

4.7 Difraksi Sinar X

Setelah sampel kuningan mengalami proses canai dingin, sampel dilakukan uji XRD, dimana untuk melihat difraksi dari sinar x yang terbentuk. Hal ini dilakukan untuk melihat kecenderungan bidang yang terbentuk yang selanjutnya bidang tersebut menjadi dasar penentuan tekstur dari kuningan ini. Penentuan tersebut didasarkan pola difraksi dengan dua puncak yang tertinggi. Berdasarkan Gambar 4.33, dapat dilihat ketinggian intensitas difraksi sinar x yang memiliki puncak tertinggi adalah pada sudut $72,66^{\circ}$, dimana memiliki kecenderungan besar terbentuk pola bidang (220). Sedangkan intensitas terbesar kedua adalah berada pada sudut $42,54^{\circ}$, dimana memiliki kecenderungan besar terbentuk pola bidang (111). Nilai tersebut sesuai dengan hasil pengujian pada Tabel 4.5. Bidang bidang ini akan menjadi dasar atau bidang proyeksi penentuan tekstur melalui *pole figure*.



Gambar 4.33 Intensitas difraksi X Ray setelah pengerolan dingin.

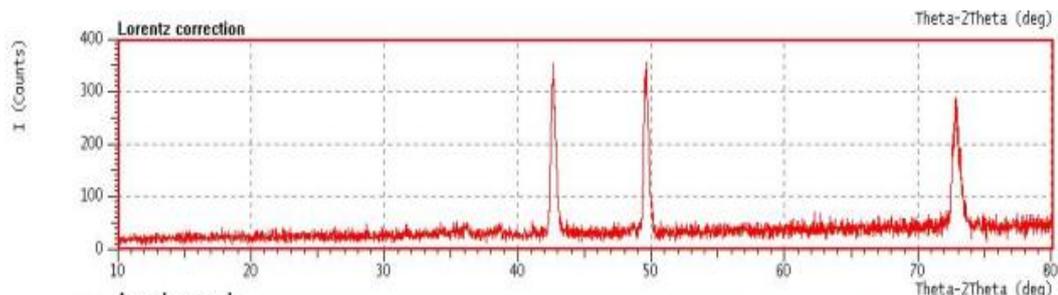
Tabel 4.5 berikut merupakan hasil dari difraksi sinar x dalam bentuk data :

Tabel 4.5 Hubungan antara bidang kristal yang terjadi dengan sudut 2θ dari puncak intensitas difraksi X ray setelah pengerolan dingin

no.	d	angle	H	K	L
1	3.6778	24.1801	1	0	0
2	2.6006	34.4596	1	1	0
3	2.1234	42.5415	1	1	1
4	1.8389	49.5300	2	0	0
5	1.6447	55.8534	2	1	0
6	1.5014	61.7334	2	1	1
7	1.3003	72.6565	2	2	0
8	1.2259	77.8564	3	0	0
9	1.1630	82.9564	3	1	0
10	1.1089	88.0007	3	1	1
11	1.0617	93.0295	2	2	2
12	1.0200	98.0818	3	2	0
13	0.9829	103.1985	3	2	1
14	0.9194	113.8159	4	0	0
15	0.8920	119.4417	4	1	0

Crystal system: Cubic
 X-ray target: Cu
 wavelength: 1.54060
 Lattice constants:
 a = 3.67775059 (Å)
 b = 3.67775059 (Å)
 c = 3.67775059 (Å)
 alpha = 90. (deg)
 beta = 90. (deg)
 gamma = 90. (deg)

Setelah dilakukan proses anil dengan temperatur 600 OC selama 3 menit, terjadi perubahan sudut difraksi dengan bidang proyeksi yang sama. Dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.34, dimana ada 2 intensitas tertinggi yang berada pada sudut $42,61^{\circ}$ dan $72,78^{\circ}$. Untuk sudut $42,61^{\circ}$ lebih cenderung membentuk bidang proyeksi (111), sedangkan sudut $72,78^{\circ}$ memiliki bidang proyeksi (220). Bidang bidang ini akan menjadi dasar atau bidang proyeksi penentuan tekstur melalui *pole figure*.



Gambar 4.34 Intensitas difraksi X Ray setelah anil temperatur 600°C dan waktu tahan 3 menit.

Tabel 4.15 berikut merupakan hasil dari difraksi sinar x dalam bentuk data :

Tabel 4.6 Hubungan antara bidang kristal yang terjadi dengan sudut 2θ dari puncak intensitas difraksi X ray setelah anil temperatur 600°C dan waktu tahan 3 menit.

crystal system: Cubic		no.	d	angle	H	K	L
X-ray target: Cu	wavelength: 1.54060	1	3.6724	24.2158	1	0	0
lattice constants		2	2.5968	34.5114	1	1	0
a =	3.67240429 (Å)	3	2.1203	42.6065	1	1	1
b =	3.67240429 (Å)	4	1.8362	49.6070	2	0	0
c =	3.67240429 (Å)	5	1.6423	59.9416	2	1	0
alpha =	90. (deg)	6	1.4993	61.8331	2	1	1
beta =	90. (deg)	7	1.2984	72.7792	2	2	0
gamma =	90. (deg)	8	1.2241	77.9912	3	0	0
sample: A7QT		9	1.1613	83.1039	3	1	0
		10	1.1073	88.1619	3	1	1
		11	1.0601	93.2055	2	2	2
		12	1.0185	98.2742	3	2	0
		13	0.9815	103.4092	3	2	1
		14	0.9181	114.0724	4	0	0
		15	0.8907	119.7280	4	1	0

Perbedaan sudut sebelum dan setelah dapat terjadi karena pada saat sampel diputar lokasi atom-atom yang terkumpul pada suatu bidang akan menyerap energi intensitas tersebut secara besar dan akan terlihat pada grafik pola difraksi dengan puncak yang tertinggi^[17,18]. Perubahan sudut ini mengindikasikan bahwa adanya perubahan tegangan sisa dan besar butir. Setelah dilakukan anil tegangan sisa akan berkurang dan besar butir juga akan menurun, hal ini akan memicu terjadinya perubahan sudut, meskipun tidak ada perubahan bidang proyeksi. Dengan adanya perubahan sudut ini berarti ada perbedaan persebaran orientasi tekstur dalam material.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa dapat disimpulkan sebagai berikut :

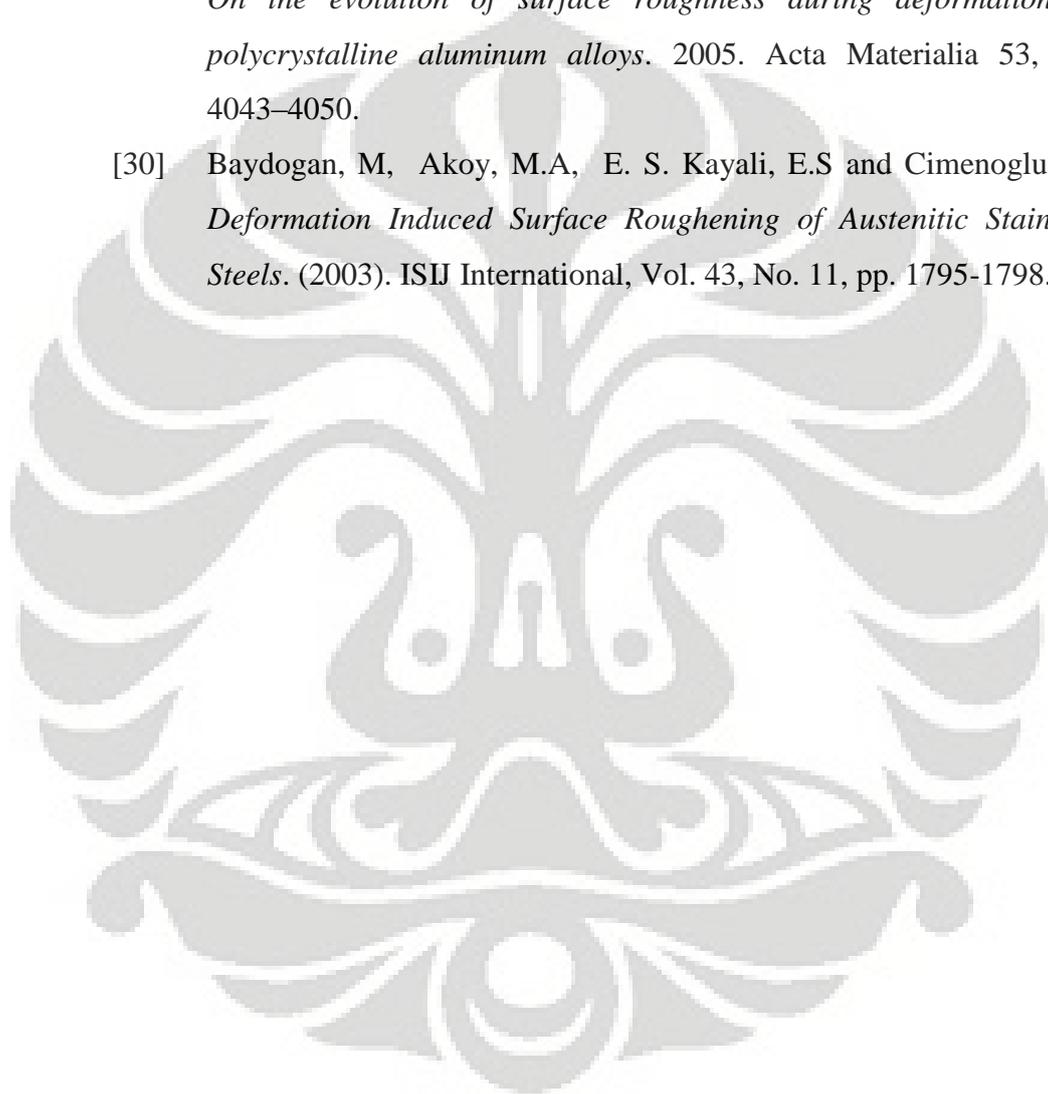
1. Ukuran butir setelah pengerolan akan menurun sekitar 17 – 37 % setelah dilakukan anil dengan variasi temperatur dan waktu tahan yang berbeda. Akan tetapi butir akan membesar lagi jika temperatur dan waktu tahan yang diberikan semakin tinggi, hal ini dikarenakan adanya fenomena pertumbuhan butir atau *grain growth*. Nilai kekerasan tertinggi didapatkan pada kondisi setelah pengerolan yaitu 136,37 BHN, kemudian akan menurun sekitar 25 – 50 % setelah mengalami beberapa proses anil dimana nilainya berkisar antara 60 – 100 BHN.
2. Berdasarkan nilai ukuran butir dan kekerasan didapatkan variasi temperatur dan waktu tahan anil yang optimal yaitu 600 °C, 3 menit. Dari variabel tersebut dapat dilihat nilai $r = 1,7$ berarti sampel tahan terhadap penipisan karena kekuatan pada arah tebal lebih tinggi, nilai $n = 0,5$ ini berarti material bersifat plastis / tidak dapat kembali ke bentuk semula dan nilai $\Delta r = 0,05$, dimana material kuningan 70/30 Al <1% tidak memiliki kecenderungan terjadinya pengupingan. Nilai kekasaran permukaan juga menurun sekitar 20 % dari 0,042 μm (*as rolled*) menjadi 0,31 μm setelah anil, ini dikarenakan butir yang dihasilkan semakin halus. Hal ini akan menurunkan gesekan yang timbul saat proses perubahan bentuk.
3. Pada difraksi sinar x, setelah dilakukan anil terjadi perubahan sudut (2θ) pada dua intensitas tertingginya dengan bidang proyeksi yang sama yaitu sudut 42,54⁰ menjadi 42,61⁰ dengan bidang (111) dan 72,66⁰ menjadi 72,78⁰ dengan bidang (220). Perubahan ini dikarenakan adanya penurunan tegangan sisa dan besar butir
4. Dari semua hasil pengujian disimpulkan bahwa setelah proses anil rekristalisasi, karakteristik material kuningan 70/30, Al < 1% untuk aplikasi selongsong peluru (*cartridge case*) memenuhi standar industri pelat kuningan

DAFTAR REFERENSI

- [1] Rollason, E.C. (1939). *Metallurgy for Engineers* (4th ed). Norwich. Great Britain. Edward Arnold Ltd.
- [2] KEY to METALS Articles : *Copper-Zinc Alloys: The Brasses*. 5 September 2009 <<http://www.keytometals.com/article69.htm>>
- [3] Weast, E. G, *Copper and Its Alloy*, Ellis Horward Ltd, Chichester, England, 1982.
- [4] ASM International Handbook Committee. *Volume 2 Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. 1991. ASM International.
- [5] Flinn, Richard A. *Copper, Brass and Bronze Casting, Properties and Application*, Nonferrous Founders Society, Ohio, 1963.
- [6] Dieter, George E. *Mechanical Metallurgy*. Mc Graw Hill Book Co : Singapore, 1986.
- [7] Lange, Kurt, *Handbook of Metal Forming*, Mc Graw Hill Co, 1985.
- [8] <http://www.pearsonstudium.de/books/3827370597/cd01/Articles/ASM/70-30.pdf>
- [9] Nestorovic, Svetlana. Markovic, Desimir. Dan Ivanic, Ljubica. 2003. *Influence of degree of deformation in rolling on anneal hardening effect of a cast copper alloy*. Bull. Mater. Sci. Vol. 26. pp 601-604
- [10] Bishop, R.J, & Smallman, R.E. (1999). *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering : Science, Process, Applications* (6th ed). Butterworth-Heinemann.
- [11] Verlinden, Bert. Driver, Julian. Samajdar, Indradev. Doherty, D. Roger. *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*. University of Cambridge, UK.
- [12] Mangonon, Pat L. *The Principle of Material Selection For Engineering Design*. New Jersey: Prentice Hall International, 1999.
- [13] Rellick, J.R, & Lawley, A (1975). *Texture Control and The Drawability of α -Brass*. Gordon and Breach Science Publishers Ltd. Vol.2. pp. 1-15

- [14] NDT-ED Organization. *Property Modification - Strengthening/Hardening Mechanisms*. 21 Oktober 2009.
<<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/strengthenin.htm>>
- [15] ASM International Handbook Committee. *Volume 5 Surface Engineering*. 1991. ASM International.
- [16] Mrozell/documents/Engr%20B45/brass%20hardness.pdf. 13 Maret 2008 <<http://www2.bakersfieldcollege.edu/>>
- [17] Bukudifraksi.pdf. 2 Desember 2009
<<http://apurwanto.110mb.com/notes/bukuDifraksi.pdf>>
- [18] XRD V.pdf. 2 Desember 2009
<<http://tk.uns.ac.id/file/Kuliah/Kimia%20Fisika/Tugas%20I/XRD%20V.pdf>>
- [19] XRD IV.pdf. 2 Desember 2009
<<http://tk.uns.ac.id/file/Kuliah/Kimia%20Fisika/Tugas%20I/XRD%20IV.pdf>>
- [20] Handout1.pdf. 2 Desember 2009
<<http://imechanica.org/files/handout1.pdf>>
- [21] ASTM E3. “*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*”.
- [22] ASTM E112. “*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*”. 2003
- [23] ASTM E92. “*Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*”. 2003
- [24] ASTM E646. “*Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Materials*”.
- [25] Callister, William D. 1996. *Materials Science and Engineering An Introduction 4th edition*. The McGraw-Hill International Book Company : New York USA
- [26] Humphreys, F.J, Hatherly, M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. (2nd ed). 2004. Elsevier Ltd.

- [27] *Properties of Copper Based Alloys.pdf*
<http://www.halseymfg.com/pdfs/Properties_of_Copper_Based_Alloys.pdf>
- [28] Harris, J.N. *Mechanical Working of Metals, Theory and Practice*. 1983. Pergamon Press.
- [29] Wouters, O, Vellinga, W.P, Van Tijing, R, J, de Hosson, J. Th. M. *On the evolution of surface roughness during deformation of polycrystalline aluminum alloys*. 2005. *Acta Materialia* 53, pp. 4043–4050.
- [30] Baydogan, M, Akoy, M.A, E. S. Kayali, E.S and Cimenoglu. H. *Deformation Induced Surface Roughening of Austenitic Stainless Steels*. (2003). *ISIJ International*, Vol. 43, No. 11, pp. 1795-1798.



LAMPIRAN

Lampiran 1 : Uji Komposisi Kimia

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI BANDUNG
JLN. KANAYAKAN 21 - DAGO - BANDUNG 40135, TROMOL POS 851 - BANDUNG 40008
Tlp. (022) 2500241 Fax. (022) 2502649, Homepage <http://www.polman-bandung.ac.id> E-mail : sekretariat@polman-bandung.ac.id

Lab No. : 453/Sp.Lab/Ex Polman/XII/2008 11 December 2008
Order No. : PF-30906

LAPORAN HASIL ANALISA (REPORT OF ANALYSIS)

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

Kode Sampel : BPPT 5
Analisa : Spectrometer
Program : CUBRAS
Hasil / Results :

Unsur	(%)
Sn	0,01691
Zn	30,18515
Pb	0,01063
Fe	0,10787
Ni	0,07765
Al	0,16112
P	0,00355
Si	
Mn	
S	0,0033
Sb	0,0063
Mg	0,00033
Cu	69,42995

K. Divisi Pengecoran,
ACHMAD SAMBAS, M.T
NIP. 132 144 637

Catatan -

Lampiran 2 : 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(HR15T)	30-T Scale, 30-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball(HR30T)	45-T Scale, 45-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball(HR45T)	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
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

Lampiran 2 : Konversi Nilai Kekerasan (Lanjutan)

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
60	10.0	62.5	62.5	—	—	55
58	—	61.0	61.0	18.0	—	53
56	—	58.8	60.0	15.0	—	52
54	—	56.5	58.5	12.0	—	50
52	—	53.5	57.0	—	—	48
50	—	50.5	55.5	—	—	47
49	—	49.0	54.5	—	—	46
48	—	47.0	53.5	—	—	45
47	—	45.0	—	—	—	44
46	—	43.0	—	—	—	43
46	—	40.0	—	—	—	42

Lampiran 3 : Sifat material untuk small arm ammunition

 BPPT BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI (B P P T)	KODE TU / PROYEK : 01.6401.A.d / PPK
	NO. DOKUMEN : HTC-007
	HALAMAN : 13 DARI 29

P3TIP - TIRBR

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	$1^{+0,02} \times 30^{+0,2} \times 2000^{+10}$	75-90	0,025-0,060	± 32	Cu=89,91; Sn=max. 0,03; Pb=max.0,05; Zn= remainder;	Bullet jacket Cal. 5,56 mm
2	CuZn10	$1,2^{+0,025} \times 80^{+0,1} \times 2120^{+10}$	80-90	0,015-0,045	26-31	Ni=max.0,20; Sb=max.0,01; Fe=max.0,05; As=max.0,02; Bi=max.0,04; Al=max.0,03	Bullet jacket Cal. 7,62 mm
3	CuZn10	$2,5^{+0,05} \times 37^{+0,2} \times 2000^{+10}$ -0,3	75-90	0,040-0,100	± 32		Bullet jacket Cal. 12,7 mm
4	CuZn28	$0,9^{+0,02} \times 69^{+0,2} \times 2110$	75-90	0,040-0,100	28-36	Cu=69,5-72 Zn=remainder	Bullet jacket Cal. 9 mm
5	CuZn28	$3,6^{+0,025} \times 99^{+0,2} \times 2120^{+0,5}$	75-90	0,035-0,080	28-36	Fe=max.0,05 Sn=max.0,03	Cartridge case Cal. 7,62 mm
6	CuZn28	$2,9^{+0,025} \times 66^{+0,2} \times 2110^{+0,5}$	70-90	0,040-0,100	28-36	Ni=max.0,20 As=max.0,02	Cartridge case Cal. 9 mm
7	CuZn28	$3,1^{+0,02} \times 41^{+0,2} \times 2000^{+10}$	75-90	0,030-0,070	28-36	Pb=max.0,05 Sb=max.0,01	Cartridge case Cal. 5,56 mm
8	CuZn28	$7,2^{-0,05} \times \varnothing 38^{+0,1}$ (disc)	55-65	0,080-0,140	-	Bi=max.0,04 Al=max.0,03	Cartridge case Cal. 12,7 mm

TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		\bar{r} 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 5 : Penghitungan Besar Butir

Sampel no.	tampak	M (perbesaran)	f (faktor pengali)	n1	n2	n2/2	NA	G (ASTM)	Akumulasi	Diameter Butir	Standar Deviasi	Etsa	
	atas	200	8	17	15	7,5	196	4,664874669	4,652498777	0,07125	0,021984875	18% FeCl3	18 gram
No anil	samping	200	8	19	14	7	208	4,750606399				Alkohol 96%	100 mL
	depan	200	8	15	15	7,5	180	4,542015262				HCl 2-3 tetes	
	atas	200	8	48	15	7,5	444	5,844606227	5,976233896	0,0454	0,040426643	10-15 detik	
600,2menit	samping	200	8	51	18	9	480	5,957083391					
	depan	200	8	59	17	8,5	540	6,12701207					
	atas	200	8	34	16	8	336	5,442499079	5,555771403	0,055	0,019362471		
600,3menit	samping	200	8	38	18	9	376	5,604774021					
	depan	200	8	37	21	10,5	380	5,620041108					
	atas	200	8	31	15	7,5	308	5,31696548	5,340780451	0,057665	0,060867272		
600,4menit	samping	200	8	36	17	8,5	356	5,525916893					
	depan	200	8	26	18	9	280	5,17945898					
	atas	500	50	56	21	10,5	3325	8,74939186	8,74939186	0,025	0		
500,3 menit	samping												
	depan												
	atas	200	8	36	22	11	376	5,604774021	5,60986305	0,0525	0,000155389		
600,3menit	samping	200	8	38	18	9	376	5,604774021					
	depan	200	8	36	23	11,5	380	5,620041108					
	atas	200	8	25	19	9,5	276	5,158699971	5,253299674	0,05917	0,053694623		
700,3menit	samping	200	8	32	20	10	336	5,442499079					
	depan	200	8	24	21	10,5	276	5,158699971					

Lampiran 6 : Penghitungan Kekerasan

Sampel No	Tampak	1		2		3		VHN1	VHN2	VHN3	V rata2	V akumulasi	Konversi Brinell
		A	B	A	B	A	B						
No Anil	Atas	55,75	60,75	54,25	57,75	56,5	59,75	163,92271	177,3596939	164,628512	168,6369719	156,3734869	136,37
	Depan	61	61,75	59,25	53,5	59,25	60,25	147,65494	175,0079891	155,7955918	159,4861728		
	Samping	72,5	67,5	60,25	65,25	57	58	113,5102	141,2549007	168,2268431	140,997316		
600, 2menit	Atas	75	77,5	76,5	78,5	77,75	77,75	95,664606	92,60353798	92,00897427	93,42570618	102,0151256	90,015
	Depan	77	76,75	73	75	71,5	73	94,115407	101,5704894	106,5504484	100,7454484		
	Samping	70,25	74,25	75	79	63	65,25	106,55045	93,81008602	135,2621319	111,8742221		
600, 3menit	Atas	76,5	75,25	78	75,5	79	78,5	96,612557	94,42222199	89,68707483	93,57395126	95,72749045	84,73
	Depan	76,75	76	74	75,5	74,25	76,5	95,351721	99,54251071	97,89856687	97,59759967		
	Samping	77,75	75,5	75	75	76	77,5	94,730539	98,88	94,42222199	96,01092041		
600, 4menit	Atas	77	79,5	80,5	78	80	78,5	90,836897	88,55894675	88,55894675	89,31826363	87,69039559	78,69
	Depan	77	77,75	75,5	77,5	77,25	78,25	92,902983	95,04036909	92,00897427	93,31744223		
	Samping	88,75	88	82,25	80,5	80,75	80	71,215107	83,99413876	86,09719699	80,4354809		
500, 3menit	Atas	68	68	68	69,5	72,5	70,25	120,28547	117,6753719	109,1789069	115,7132487	114,451257	101,45
	Depan	73,5	74,25	71,75	70	73,25	75	101,9145	110,7247837	101,2282134	104,6225005		
	Samping	71	68,25	67,5	71,75	62,75	63,5	114,73623	114,736228	139,5816096	123,0180219		
600, 3menit	Atas	79,5	80	79,25	81	86	78,5	87,451971	86,63530317	82,21653532	85,43460309	88,75072082	79,375
	Depan	79,5	75,5	79,5	79,5	78,75	74,75	92,603538	88,00284799	94,42222199	91,67620265		
	Samping	85	85,6	77,1	77,5	76,85	73,9	76,442155	93,08334826	97,89856687	89,14135673		
700, 3menit	Atas	89,75	93,5	92,5	89	86,5	87,4	66,252613	67,53637047	73,56848486	69,11915599	69,72001862	62,86
	Depan	83	93,3	88	91,6	87	92,75	71,579119	68,97287216	68,85780552	69,8032657		
	Samping	91	90	86,85	90,5	87	88,7	67,910015	70,73406061	72,0688269	70,23763416		

Lampiran 7 : Penghitungan Uji Tarik 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)	Standar Deviasi
		t ₀	w ₀								
1	0	3,1	13,2	40,92	50	22,65	25,5	1540	37,6344086	37,35201477	0,1281131
2		3,1	13,5	41,85	50	22,55	25	1560	37,27598566		
3		3,1	13,2	40,92	50	22,7	26,25	1520	37,14565005		
4	45	3,1	13	40,3	50	23,7	26,25	1510	37,46898263	36,61635922	1,294073824
5		3,1	12,9	39,99	50	22,8	26,75	1460	36,50912728		
6		3,1	12,5	38,75	50	24,4	27,5	1390	35,87096774		
7	90	3,1	12,3	38,13	50	26,1	29,25	1380	36,19197482	36,95398334	2,345238736
8		3,1	13	40,3	50	25,25	28,5	1470	36,4764268		
9		3,1	12,5	38,75	50	24,35	27,25	1480	38,19354839		
									UTS ₀	37,35201477	
									UTS ₄₅	36,61635922	
									UTS ₉₀	36,95398334	Standar Deviasi
									UTS	36,97411911	0,271202721

Lampiran 8 : Penghitungan Nilai n

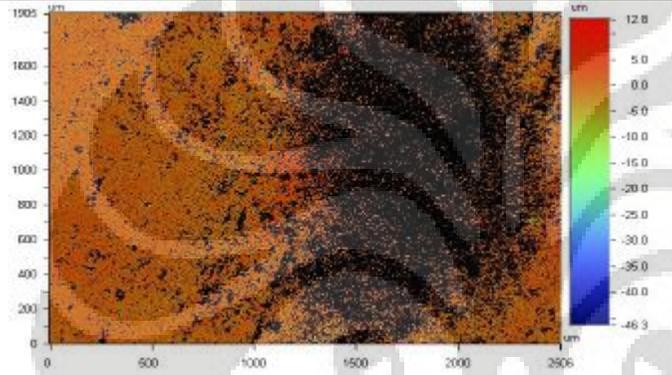
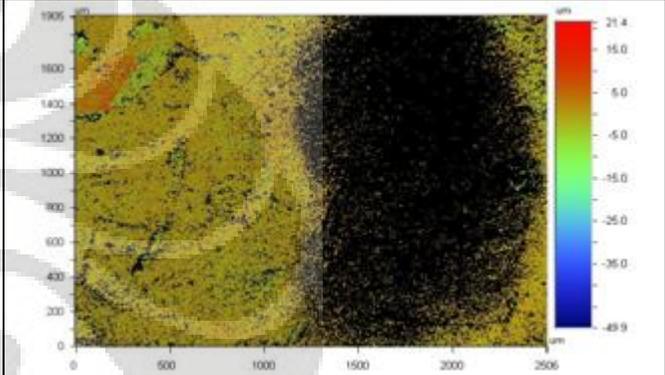
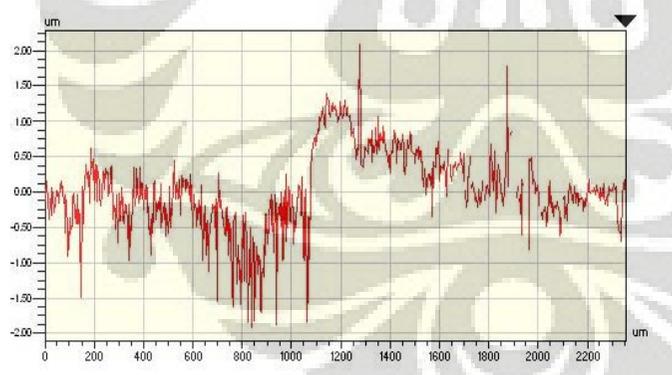
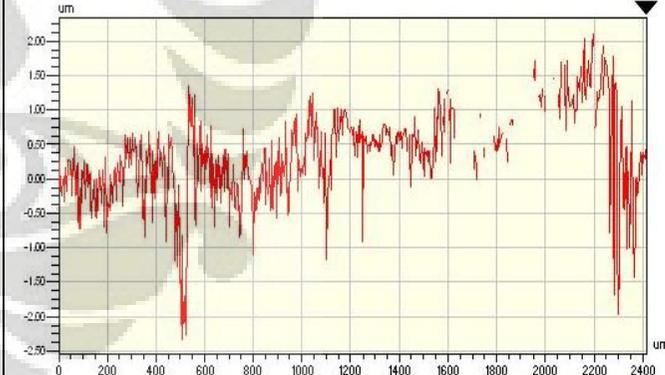
Kode Sampel	Arah	Dimensi Awal (mm)		A ₀ (mm ²)	dL (mm)	P (Kg)	ε	σ (Mpa)	ε _t	σ _t (Mpa)	n	n rata-rata	Standar Deviasi		
		t ₀	w ₀												
1	0	3,1	13,2	40,92	10	1280	0,2	306,7370479	0,182321557	368,0844575	0,505106394	0,523755671	0,00080102		
					15	1420	0,3	340,2864125	0,262364264	442,3723363	0,544898232				
					20	1510	0,4	361,8538612	0,336472237	506,5954057	0,521262388				
2		3,1	13,5	41,85	10	1300	0,2	304,6069295	0,182321557	365,5283154	0,50093578			0,532252338	0,002258745
					15	1440	0,3	337,4107527	0,262364264	438,6339785	0,567755708				
					20	1540	0,4	360,842055	0,336472237	505,1788769	0,528065525				
3		3,1	13,2	40,92	10	1240	0,2	297,1515152	0,182321557	356,5818182	0,513830729			0,531642943	0,000730727
					15	1380	0,3	330,7008798	0,262364264	429,9111437	0,551836531				
					20	1470	0,4	352,2683284	0,336472237	493,1756598	0,52926157				
4	45	3,1	13	40,3	10	1290	0,2	313,88933	0,182321557	376,667196	0,503005713	0,471614819	0,002269482		
					15	1430	0,3	347,9548387	0,262364264	452,3412903	0,436027173				
					20	1480	0,4	360,1210918	0,336472237	504,1695285	0,47581157				
5		3,1	12,9	39,99	10	1220	0,2	299,1577894	0,182321557	358,9893473	0,477691333			0,502660683	0,001435932
					15	1340	0,3	328,5831458	0,262364264	427,1580895	0,530968266				
					20	1420	0,4	348,20005	0,336472237	487,48007	0,499322449				
6		3,1	12,5	38,75	10	1150	0,2	291,0167742	0,182321557	349,220129	0,492627518			0,516437508	0,001305683
					15	1270	0,3	321,3837419	0,262364264	417,7988645	0,543430732				
					20	1350	0,4	341,6283871	0,336472237	478,2797419	0,513254272				
7	90	3,1	12,3	38,13	10	1110	0,2	285,4618411	0,182321557	342,5542093	0,546283068	0,546731597	4,63339E-07		
					15	1250	0,3	321,4660372	0,262364264	417,9058484	0,54724009				
					20	1330	0,4	342,0398636	0,336472237	478,8558091	0,546671632				
8		3,1	13	40,3	10	1210	0,2	294,4233251	0,182321557	353,3079901	0,500304959	0,51467596	0,000475656		
					15	1340	0,3	326,0555831	0,262364264	423,8722581	0,530968266				
					20	1420	0,4	345,5215881	0,336472237	483,7302233	0,512754654				
9		3,1	12,5	38,75	10	1260	0,2	318,8531613	0,182321557	382,6237935	0,449886952	0,485561888	0,002931201		
					15	1370	0,3	346,6895484	0,262364264	450,6964129	0,526006323				
					20	1450	0,4	366,9341935	0,336472237	513,707871	0,48079239				

		Rata-rata	SD
n ₀	0,523755671	0,529216984	4,49246E-05
	0,532252338		
	0,531642943		
n ₄₅	0,471614819	0,496904336	0,00105424
	0,502660683		
	0,516437508		
n ₉₀	0,546731597	0,515656482	0,001872309
	0,51467596		
	0,485561888		
nilai n		0,509670535	0,000526546

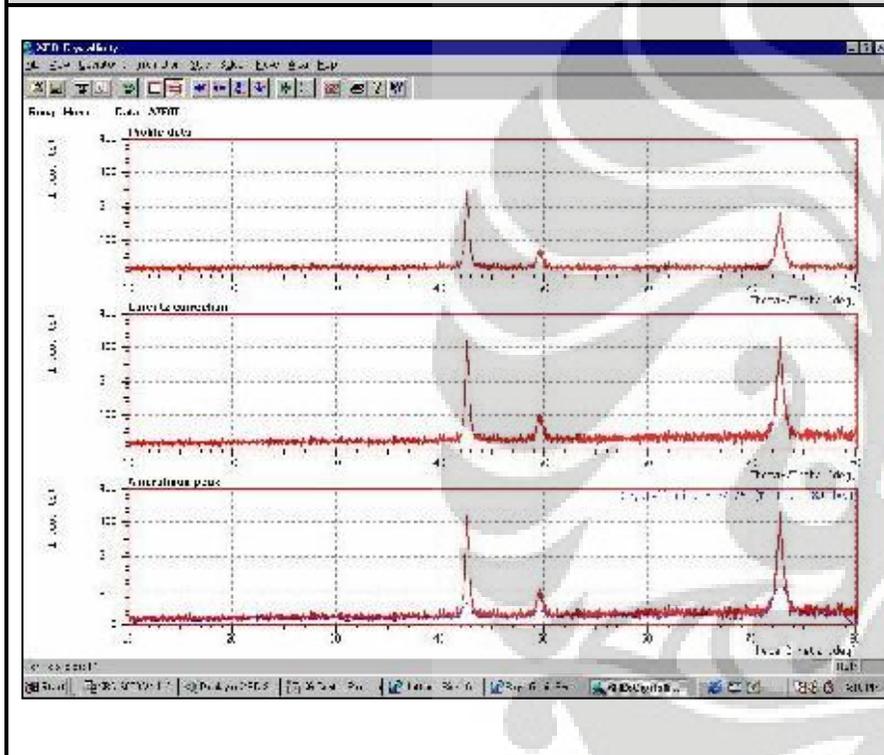
Lampiran 9 : Penghitungan Nilai r dan Δr

Kode Sampel	Arah	Dimensi Awal (mm)		A_0 (mm ²)	Dimensi Akhir (mm)		$\ln (w_i/w_0)$	$\ln (t_i/t_0)$	$\ln (w_i/w_0) : \ln (t_i/t_0)$	r rata-rata	Standar Deviasi
		t_0	w_0		t_f	w_f					
1	0	3,1	12,85	39,835	3	12,2	-0,05190786	-0,032789823	1,583047883	1,754864235	0,069243713
2		3,1	12,9	39,99	3	12,1	-0,064021859	-0,032789823	1,952491757		
3		3,1	12,7	39,37	3	12	-0,056695344	-0,032789823	1,729053066		
4	45	3,1	13,1	40,61	3	12,5	-0,046883586	-0,032789823	1,429821264	1,456771103	0,001717485
5		3,1	12,6	39,06	3	12	-0,048790164	-0,032789823	1,487966691		
6		3,1	12,9	39,99	3	12,3	-0,047628049	-0,032789823	1,452525354		
7	90	3,1	13,35	41,385	3	12,5	-0,065787741	-0,032789823	2,006346326	1,652806713	0,191757158
8		3,1	13,1	40,61	3	12,5	-0,046883586	-0,032789823	1,429821264		
9		3,1	13,35	41,385	3	12,7	-0,049914391	-0,032789823	1,522252549		
									r_0	1,754864235	SD
									r_{45}	1,456771103	0,045901738
									r_{90}	1,652806713	
									nilai r	1,580303288	
									Δr	0,247064371	

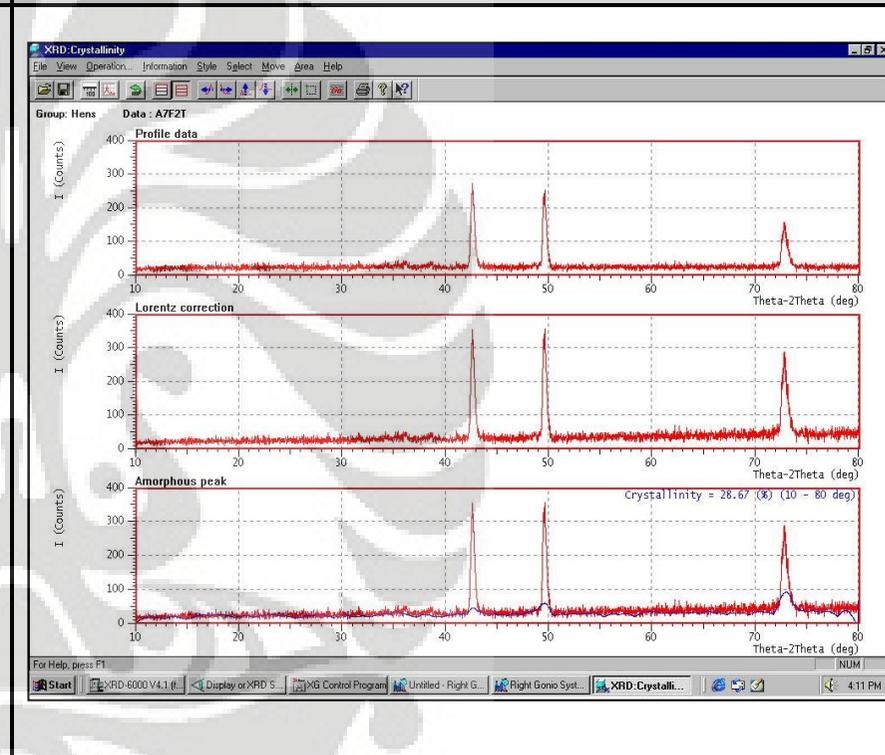
Lampiran 10 : Kekasaran Permukaan

Keterangan	Profile Kekerasan	
	Setelah pengerolan	Setelah Anil 600 °C, 3 Menit </th
Permukaan 2 D		
	Profile kurva kekasaran permukaan	
Profil kekasaran permukaan pelat	Setelah pengerolan	Setelah Anil 600 °C, 3 Menit
		
Kekasaran permukaan (Ra)	0,42 μm	0,34 μm

Pola intensitas sinar x sampel setelah canai



Pola intensitas sinar x sampel setelah anil 600⁰C, 3 menit



Data difraksi sinar x sampel setelah canai						Data difraksi sinar x sampel setelah anil 600 ⁰ C, 3 menit							
crystal system: <input type="text" value="Cubic"/>	no.	d	angle	H	K	L	crystal system: <input type="text" value="Cubic"/>	no.	d	angle	H	K	L
X-ray	1	3.6724	24.2158	1	0	0	X-ray	1	3.6778	24.1801	1	0	0
target : <input type="text" value="Cu"/>	2	2.5968	34.5114	1	1	0	target : <input type="text" value="Cu"/>	2	2.6006	34.4596	1	1	0
wavelength: <input type="text" value="1.54060"/>	3	2.1203	42.6065	1	1	1	wavelength: <input type="text" value="1.54060"/>	3	2.1234	42.5415	1	1	1
	4	1.8362	49.6070	2	0	0		4	1.8389	49.5300	2	0	0
	5	1.6423	55.9418	2	1	0		5	1.6447	55.8534	2	1	0
	6	1.4993	61.8331	2	1	1		6	1.5014	61.7334	2	1	1
	7	1.2984	72.7792	2	2	0		7	1.3003	72.6565	2	2	0
	8	1.2241	77.9912	3	0	0		8	1.2259	77.8564	3	0	0
	9	1.1613	83.1039	3	1	0		9	1.1630	82.9564	3	1	0
	10	1.1073	88.1619	3	1	1		10	1.1089	88.0007	3	1	1
	11	1.0601	93.2055	2	2	2		11	1.0617	93.0295	2	2	2
	12	1.0185	98.2742	3	2	0		12	1.0200	98.0818	3	2	0
	13	0.9815	103.4092	3	2	1		13	0.9829	103.1985	3	2	1
	14	0.9181	114.0724	4	0	0		14	0.9194	113.8159	4	0	0
	15	0.8907	119.7280	4	1	0		15	0.8920	119.4417	4	1	0
lattice constants							lattice constants						
a = <input type="text" value="3.67240429"/> (Å)							a = <input type="text" value="3.67775059"/> (Å)						
b = <input type="text" value="3.67240429"/> (Å)							b = <input type="text" value="3.67775059"/> (Å)						
c = <input type="text" value="3.67240429"/> (Å)							c = <input type="text" value="3.67775059"/> (Å)						
alpha = <input type="text" value="90."/> (deg)							alpha = <input type="text" value="90."/> (deg)						
beta = <input type="text" value="90."/> (deg)							beta = <input type="text" value="90."/> (deg)						
gamma = <input type="text" value="90."/> (deg)							gamma = <input type="text" value="90."/> (deg)						
sample : A7f2T													

Lampiran 12 : Data mentah uji tarik n

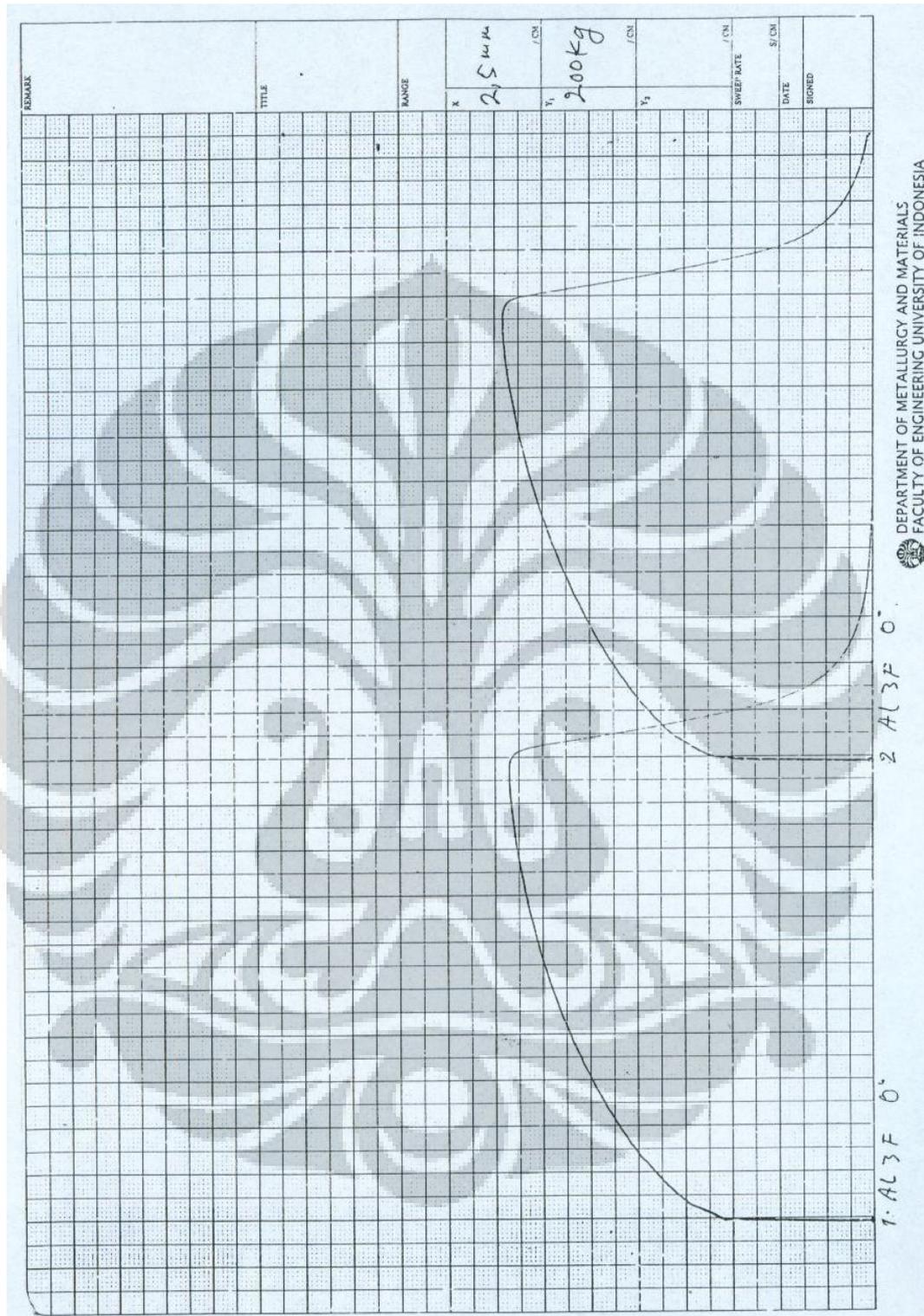
 CENTER FOR MATERIAL PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS UNIVERSITAS INDONESIA - DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL LABORATORIUM UJI MATERIAL Kampus Baru UI - Depok 16421 - Indonesia Phone : 021 - 788 49043, 788 3310 Fax : 021 - 787 2350 E-mail : empia@mpa.ui.ac.id		Lembar Data Pengujian Tarik (Tensile Testing Data Sheet)										
Mesin Uji		Tanggal Uji :										
Bahan		Paraf Teknisi :										
Identitas Bahan		Tanggal Bahan diterima :										
		No. Kontrak :		Teknisi Penguji :		Standar/Metode Uji :						
No	Kode Sampel	Bentuk Sampel	Dimensi Sampel (mm)	Luas penampang (mm ²)	Panjang Ukur (mm)	Pu (kg)	Py (kg)	ΔL (mm)	σu (kg/mm ²)	σy (kg/mm ²)	e (%)	Ket.
1	AL3F0'	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 W = 13,20	40,92	50			22,65				
2	AL3F0'	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 W = 13,50	41,85	50			22,55				
3	AL3F0'	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 W = 13,20	40,92	50			22,70				
4	AL3F45'	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 W = 13,00	40,30	50			23,70				
5	AL3F45''	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 W = 12,90	39,95	50			22,80				
6	AL3F45'	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 W = 12,50	38,75	50			24,40				
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										

* Coret yang tidak perlu

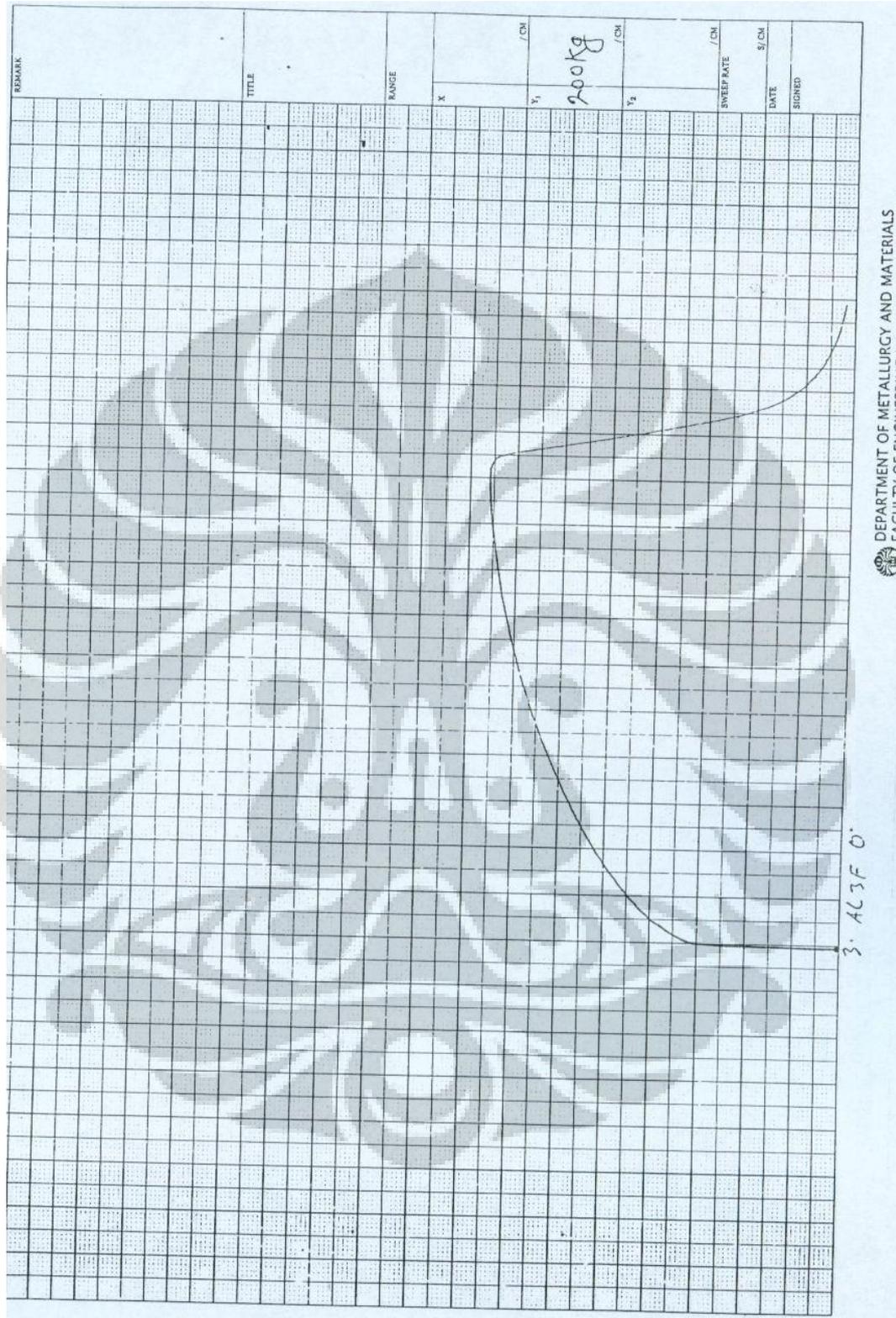
Lampiran 12 : Data mentah uji tarikan (lanjutan)

 CENTER FOR MATERIAL PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS UNIVERSITAS INDONESIA - DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL LABORATORIUM UJI MATERIAL (Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia) Phone : 021 - 783 49045, 786 3510 ; fax : 021 - 787 2330 E-mail : cempa@metall.uic.ac.id		Lembar Data Pengujian Tarik (Tensile Testing Data Sheet)										
Mesin Uji		No. Kontrak:		Tanggal Uji:		No. Kontrak:		Tanggal Uji:		Paraf Teknisi:		
Bahan		Tecnisi Penguji:		Tecnisi Penguji:		Tecnisi Penguji:		Tecnisi Penguji:		Tecnisi Penguji:		
Identitas Bahan		Standar/Metode Uji:		Standar/Metode Uji:		Standar/Metode Uji:		Standar/Metode Uji:		Standar/Metode Uji:		
No	Kode Sampel	Bentuk Sampel	Dimensi Sampel (mm)	Luas penampang (mm ²)	Penjang Urur (mm)	Pu (kg)	Py (kg)	ΔL (mm)	σu (kg/mm ²)	σy (kg/mm ²)	e (%)	Ket.
7	AL3F90	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t=3,10 W=12,30	38,13	50			26,10				
8	AL3F90	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t=3,10 W=13,00	40,30	80			25,25				
9	AL3F90	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t=3,10 W=12,50	38,75	80			24,35				
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										

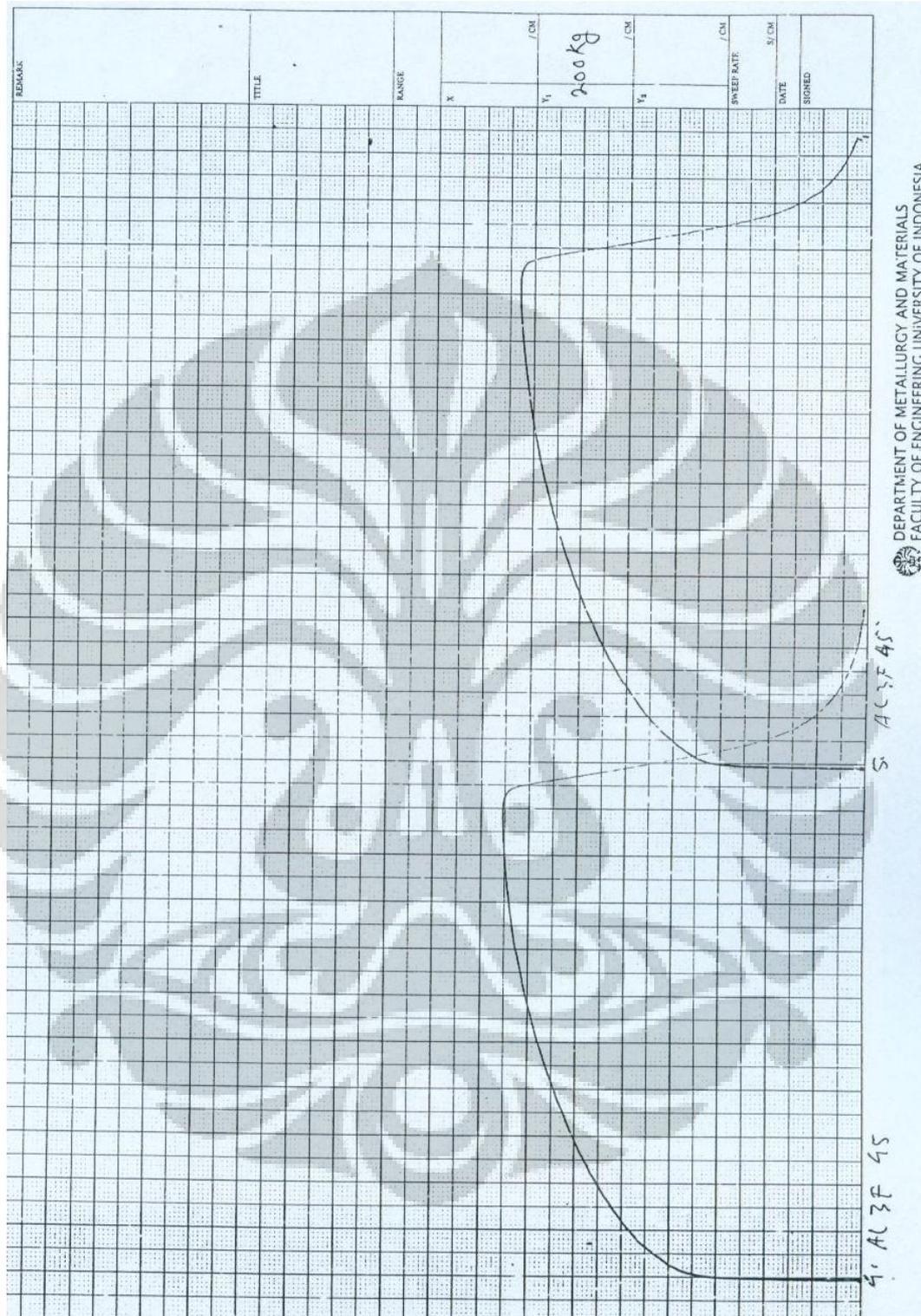
Lampiran 13 : Grafik uji tarik n arah 0°



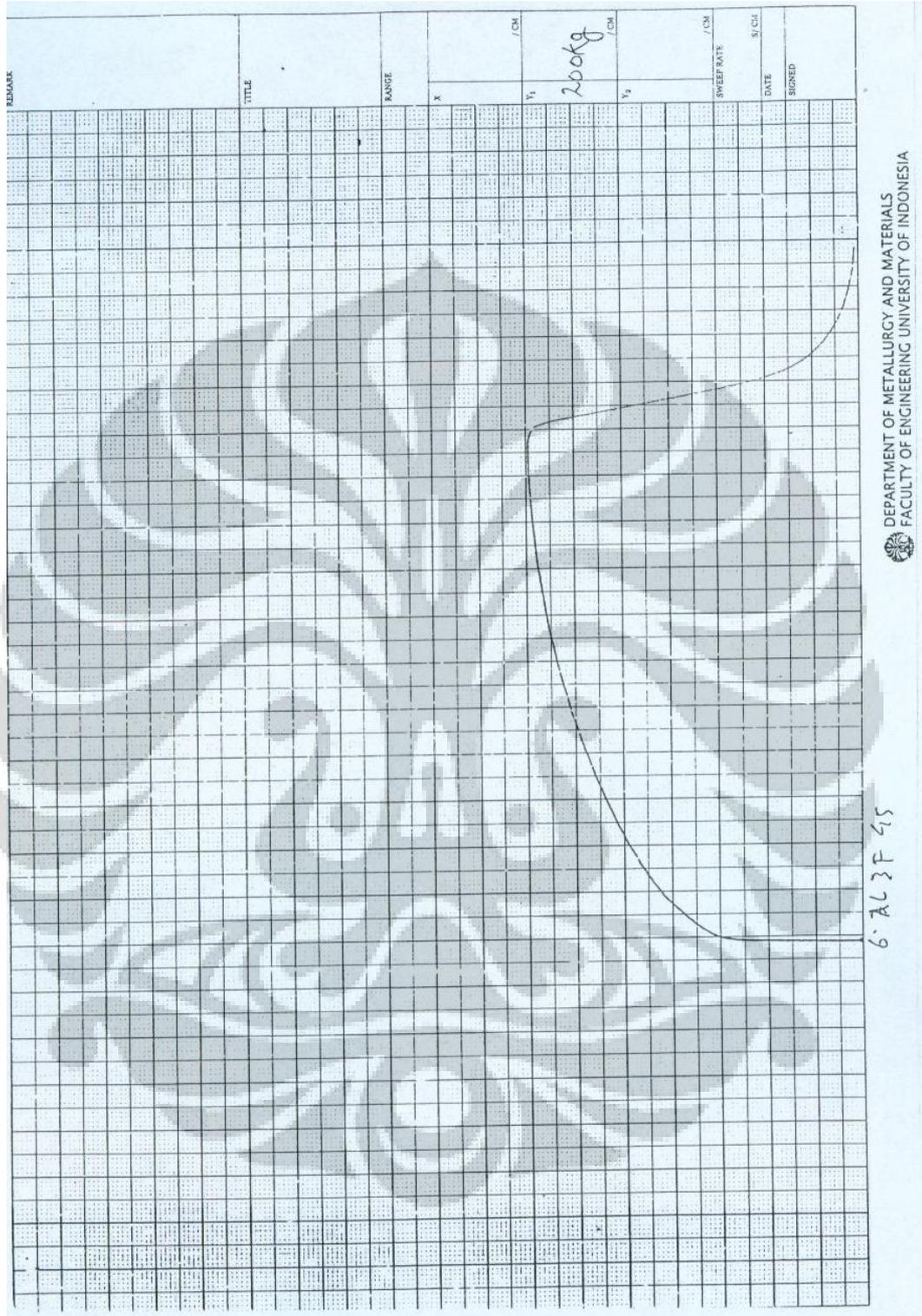
Lampiran 13 : Grafik uji tarik n arah 0° (lanjutan)



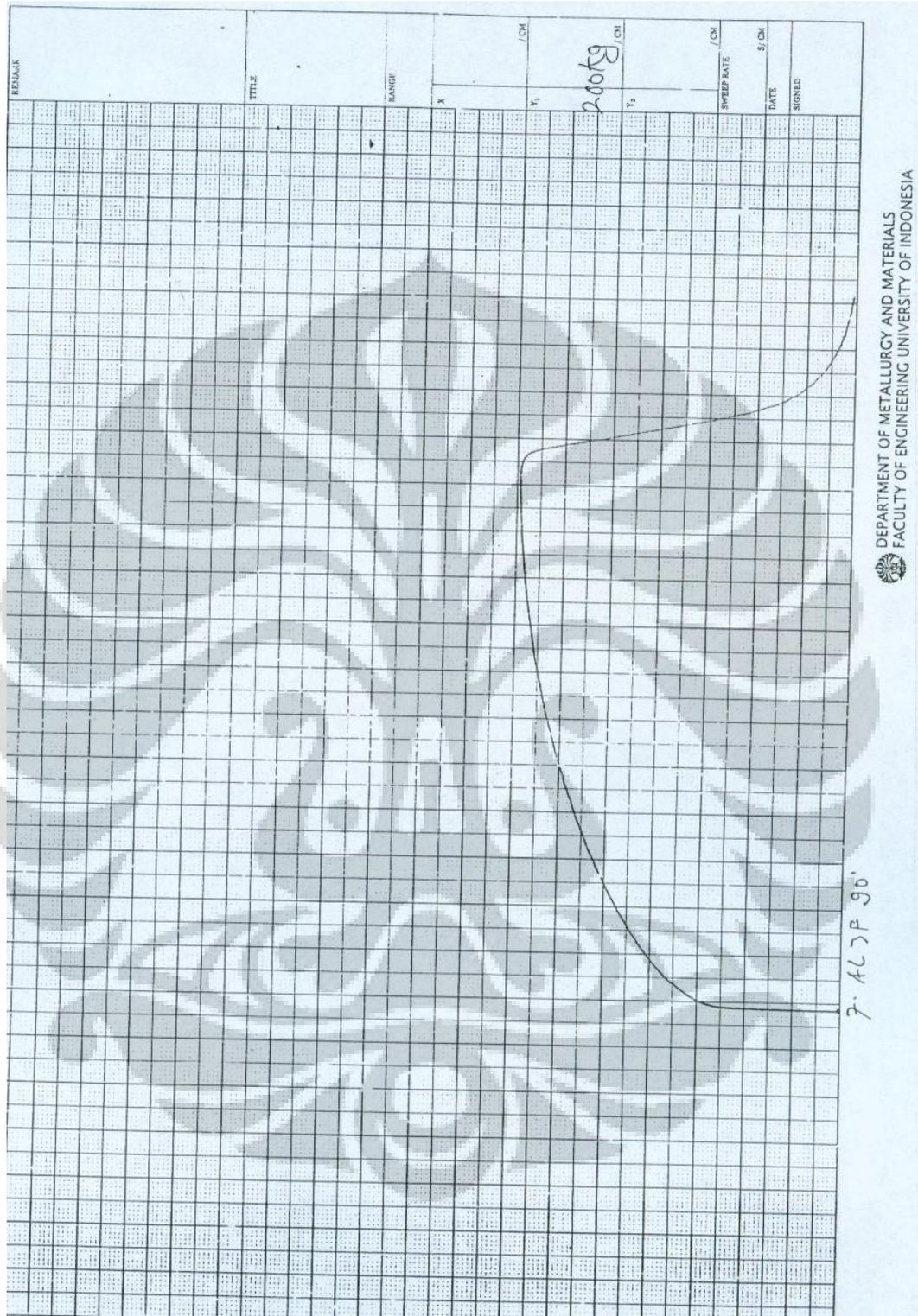
Lampiran 14 : Grafik uji tarik n arah 45⁰



Lampiran 14 : Grafik uji tarik n arah 45⁰ (lanjutan)

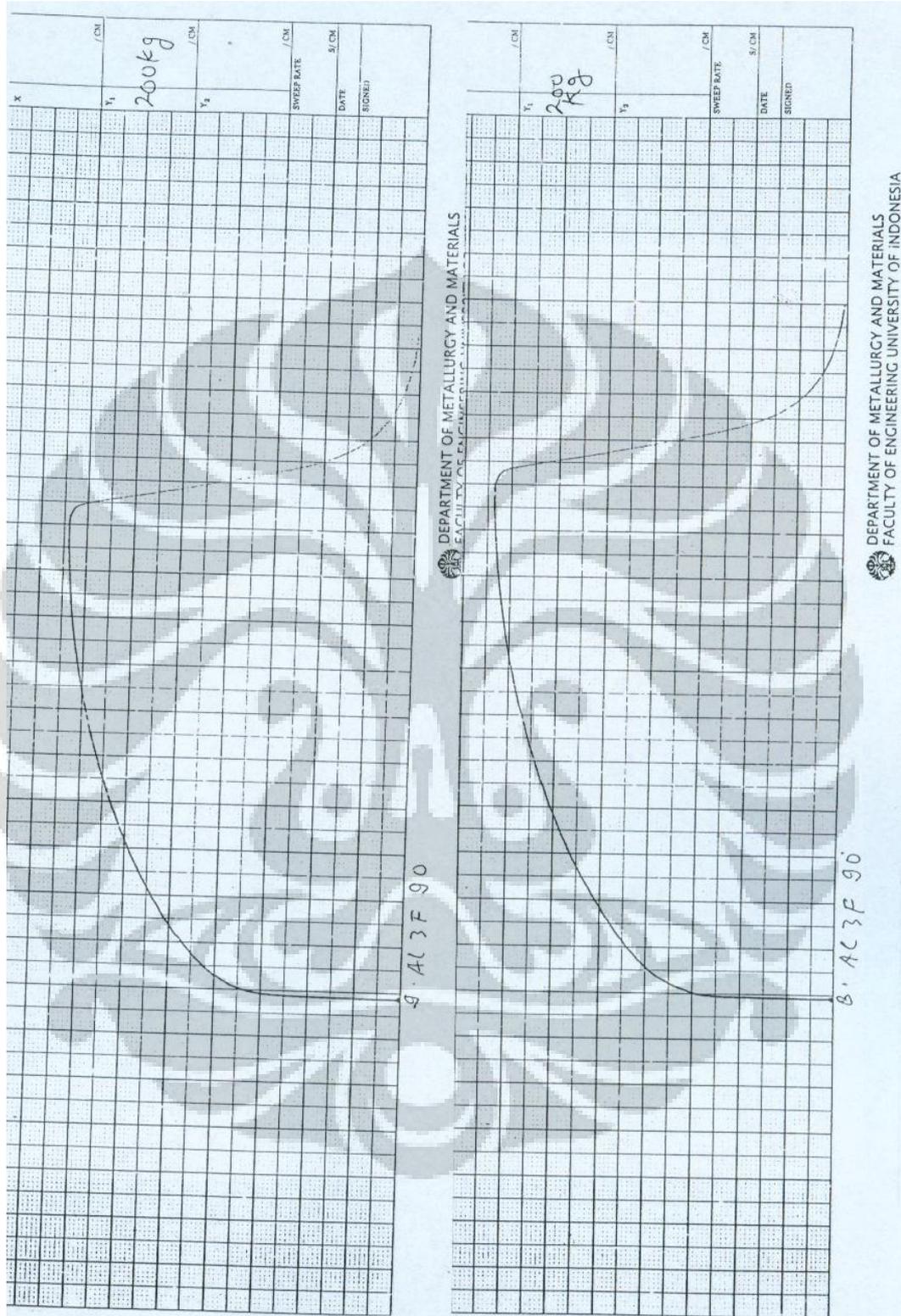


Lampiran 15 : Grafik uji tarik n arah 90°



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

Lampiran 15 : Grafik uji tarik n arah 90⁰ (lanjutan)



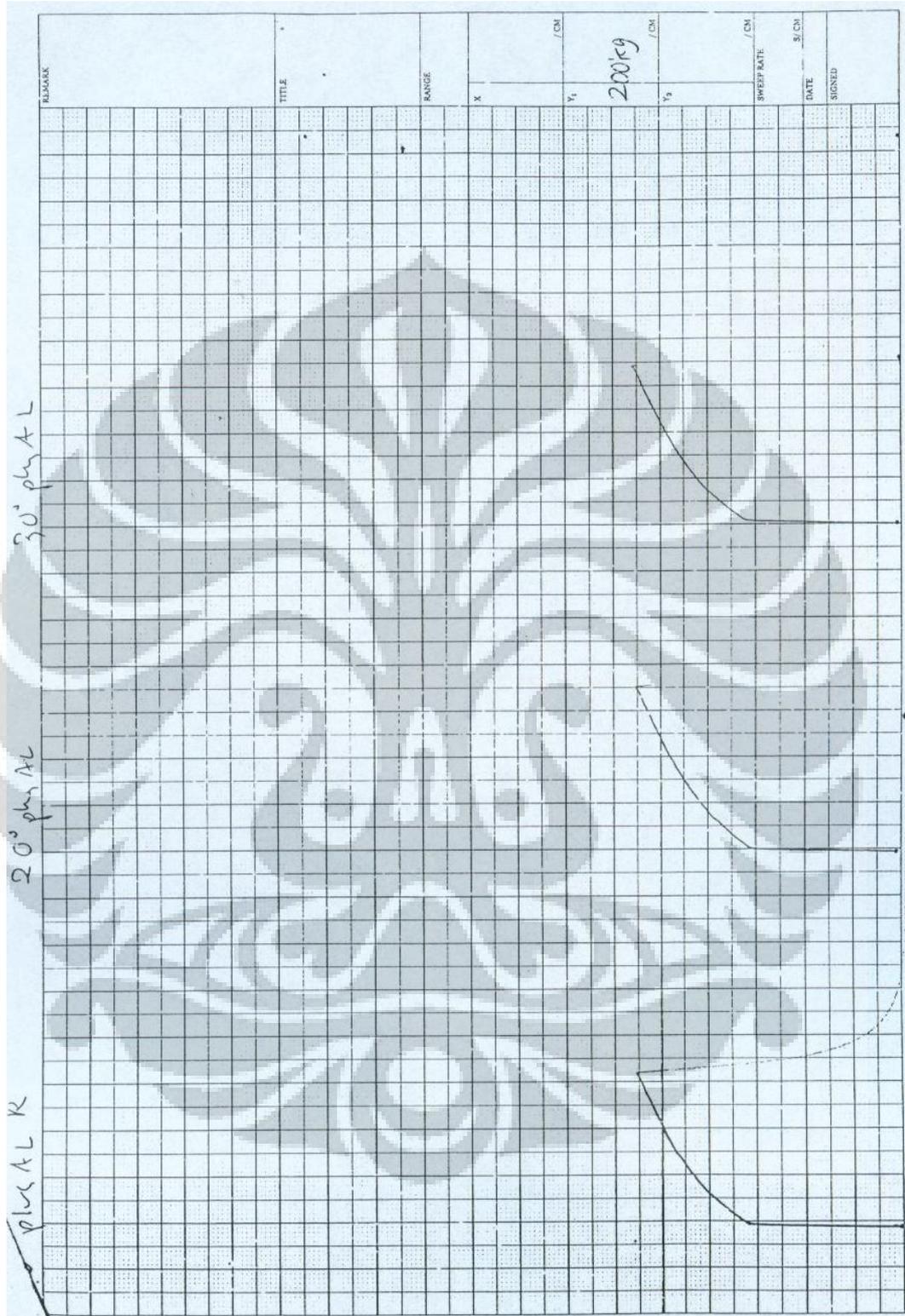
Lampiran 16 : Data mentah uji tarik r

		CENTER FOR MATERIAL PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS UNIVERSITAS INDONESIA - DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL LABORATORIUM UJI MATERIAL Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia Phone : 021 - 783 49043, 786 35110 Fax : 021 - 787 2330 E-mail : cmp@metall.uin.ac.id										Lembar Data Pengujian Tarik (Tensile Testing Data Sheet)					
Mesio Uji		No. Kontrak :		Teknisi Penguji :		Tanggal Uji :		Pu (kg)		σ _u (kg/mm ²)		σ _y (kg/mm ²)		e (%)		Ket.	
Bahan		No. Kontrak :		Teknisi Penguji :		Tanggal Uji :		Pu (kg)		σ _u (kg/mm ²)		σ _y (kg/mm ²)		e (%)		Ket.	
Identitas Bahan		No. Kontrak :		Teknisi Penguji :		Tanggal Uji :		Pu (kg)		σ _u (kg/mm ²)		σ _y (kg/mm ²)		e (%)		Ket.	
No	Kode Sampel	Bentuk Sampel	Dimensi Sampel (mm)	Luas penampang (mm ²)	Parjang Ukur (mm)	Pu (kg)	ΔL (mm)	σ _u (kg/mm ²)	σ _y (kg/mm ²)	e (%)	Ket.						
1	AL 3F 0.	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 w = 12,85	39,835	t ₁ = 3,0 w ₁ = 12,1	40,145	AO AKHIR										
2	AL 7F 0.	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 w = 12,95	40,145	t ₁ = 3,0 w ₁ = 12,2	40,145											
3	AL 7F 0.	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 w = 12,95	40,145	t ₁ = 3,0 w ₁ = 12,2	40,145											
4	AL 3F 45.	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 w = 12,30	38,13	t ₁ = 3,0 w ₁ = 11,6	38,13											
5	AL 3F 45.	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 w = 12,85	39,835	t ₁ = 3,0 w ₁ = 12,1	39,835											
6	AL 3F 45.	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t = 3,10 w = 12,70	39,37	t ₁ = 3,0 w ₁ = 12,1	39,37											
7		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat															

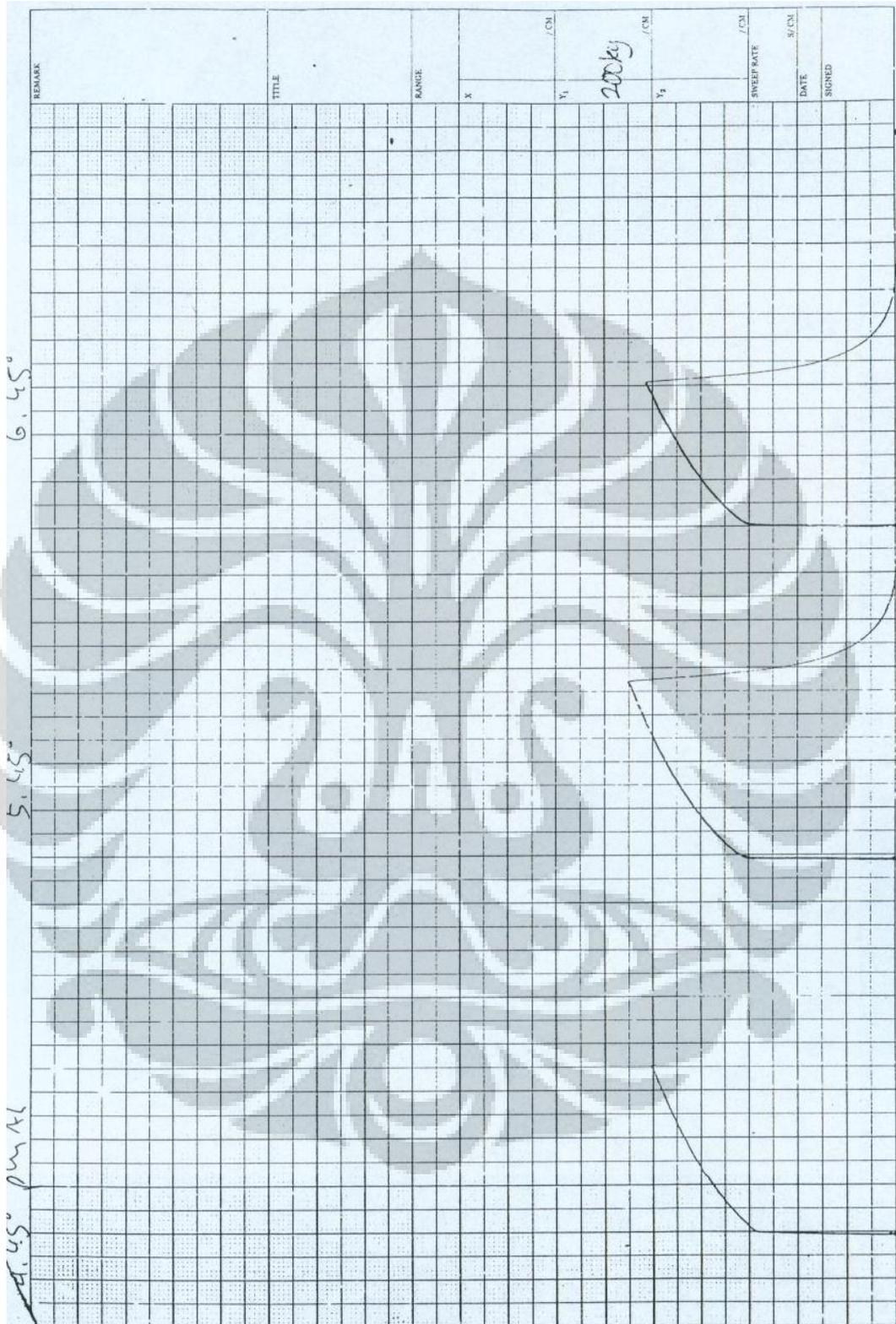
Lampiran 16 : Data mentah uji tarik r (lanjutan)

 CENTER FOR MATERIAL PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS UNIVERSITAS INDONESIA - DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL LABORATORIUM UJI MATERIAL Kampus Satri UI - Depok 16424 - Indonesia Phone : 021 - 783 49043, 786 5310 Fax : 021 - 787 2350 E-mail : cmpf@metallui.ac.id		Lembar Data Pengujian Tarik (Tensile Testing Data Sheet)										
/lesin Uji		No. Kontrakt:		Tanggal Uji :		Paraf Teknisi :		Tangggl Bahan diterima :				
Bahan		Teknisi Panguji :										
identitas Bahan		Standar/Metode Uji :										
No	Kode Sampel	Bentuk Sampel	Dimensi Sampel (mm)	Luas penampang (mm ²)	Penjang Ukur (mm)	Pu (kg)	Py (kg)	ΔL (mm)	σu (kg/mm ²)	σy (kg/mm ²)	e (%)	Ket.
7	ALB F 90	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t=3,10 w=12,30	38,13	50			26,10				
8	AL3 F 90	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t=3,10 w=13,00	40,30	50			25,25				
9	AL3 F 90	<input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat	t=3,10 w=12,50	38,75	50			24,35				
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										
		<input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat										

Lampiran 17 : Grafik uji tarik r arah 0°



Lampiran 18 : Grafik uji tarik r arah 45°



Lampiran 19 : Grafik uji tarik r arah 90°

