

**PENGARUH SIKLUS DAN TEMPERATUR *ANNEALING* PADA  
PROSES *ACCUMULATIVE ROLL BONDING* TERHADAP  
UKURAN BUTIR DAN SIFAT MEKANIK *PURE*  
MAGNESIUM UNTUK APLIKASI BIOMEDIS**

**SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari  
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh :

Titan Huzaimawardanni  
3334150071

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA  
CILEGON-BANTEN  
2020**

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH SIKLUS DAN TEMPERATUR *ANNEALING* PADA  
PROSES *ACCUMULATIVE ROLL BONDING* TERHADAP  
UKURAN BUTIR DAN SIFAT MEKANIK *PURE*  
MAGNESIUM UNTUK APLIKASI BIOMEDIS**

**SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan  
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I

Pembimbing II



**Prof. Dr. Eng. A. Ali Alhamidi, M.T.**  
NIP. 197312131999031001



**Dr. Muhammad Rifai, M.Eng.**  
NIP. 198010222002121002

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH SIKLUS DAN TEMPERATUR *ANNEALING* PADA  
PROSES *ACCUMULATIVE ROLL BONDING* TERHADAP  
UKURAN BUTIR DAN SIFAT MEKANIK *PURE*  
MAGNESIUM UNTUK APLIKASI BIOMEDIS**

**SKRIPSI**

Disusun dan diajukan oleh:

**Titan Huzaimawardanni**

**3334150071**

Telah disidangkan di depan dosen penguji pada bulan Juni 2020

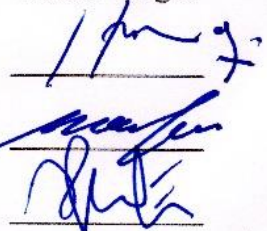
Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

Penguji I (Ketua Sidang) : Prof. Dr. Eng. A. Ali Alhamidi, M.T.

Penguji II : Dr. Muhammad Rifai, M.Eng.

Penguji III : Agus Pramono, S.T., M.T., Ph.D Tech.



Skrripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar  
Sarjana Teknik

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



**Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc.**

NIP. 197804102003121001

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Pengaruh Siklus dan Temperatur *Annealing* pada Proses *Accumulative Roll Bonding* terhadap Ukuran Butir dan Sifat Mekanik *Pure* Magnesium untuk Aplikasi Biomedis

Nama : Titan Huzaimawardanni

NIM : 3334150071

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, Juni 2020



**Titan Huzaimawardanni**  
NIM. 3334150071

## ABSTRAK

Magnesium (*pure*) merupakan material logam yang biasa digunakan sebagai bahan baku pembuatan implan tulang yang bersifat *biodegradable*, dalam bidang kedokteran. Magnesium memiliki syarat-syarat yang dibutuhkan sebagai bahan implan, namun sifat mekanisnya masih tergolong rendah dan laju degradasinya cepat. Sifat-sifat mekanis yang diharapkan untuk implan maksilofasial, yaitu memiliki nilai kuat tarik 110 – 130 MPa, kuat luluh 104 – 121 MPa, dan elongasi 0,7 – 3%. Sehingga untuk memperbaiki sifat mekanis dan mengendalikan laju degradasinya, proses yang dilakukan adalah *accumulative roll bonding* (ARB). Proses ARB merupakan salah satu metode *severe plastic deformation* (SPD), dengan cara memberikan regangan besar ke dalam material tanpa mengubah bentuk geometrisnya selama beberapa siklus penumpukan, pemanasan, pengerolan, dan pemotongan material. Magnesium dipanaskan (*annealing*) pada temperatur 250°C dan 350°C dengan waktu tahan 25 menit, kemudian dilakukan proses ARB dengan variasi 1, 2, 3, dan 4 siklus. Komposisi diuji menggunakan SEM-EDS, menunjukkan kadar Mg (*pure*) *as annealed* sebesar 99,77%. Ukuran butir diamati menggunakan mikroskop optik, dan diukur dengan *software ImageJ*, menghasilkan ukuran butir rata-rata terkecil sebesar  $7,631 \pm 1,414 \mu\text{m}$ . Pengujian XRD dilakukan untuk mendapatkan nilai kerapatan dislokasi, kemudian hasil pengujiannya diamati menggunakan *software High Score Plus*, nilai tertinggi yaitu sebesar  $2,6684 \times 10^{12}/\text{mm}^2$ . Uji kekerasan dilakukan dengan *Vickers microhardness tester*, kekerasan tertinggi sebesar  $21,5612 \pm 0,7893 \text{ HVN}$ . Kemudian dari hasil pengujian tarik diperoleh nilai kuat tarik tertinggi sebesar 146,144 MPa, nilai kuat luluh tertinggi 69,5896 MPa, dan elongasi terendah sebesar 0,7194%.

**Kata Kunci:** Magnesium (*pure*), *accumulative roll bonding*, siklus, *annealing*, implan maksilofasial

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Siklus dan Temperatur *Annealing* pada Proses *Accumulative Roll Bonding* terhadap Ukuran Butir dan Sifat Mekanik Magnesium (*pure*) untuk Aplikasi Biomedis” yang merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) pada Program Studi Teknik Metalurgi di Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

Pada penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan, bantuan, dan dukungan dari berbagai pihak, skripsi ini tidak akan dapat terselesaikan. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi FT Untirta.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. A. Ali Alhamidi, M.T. dan Bapak Dr. Muhammad Rifai, M.Eng. selaku Pembimbing Skripsi.
3. Seluruh *staff* Laboratorium Riset dan Metalografi HSM *plant* PT Krakatau Steel.
4. Seluruh *staff* Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN).

5. Kedua orangtua, Bapak Augustine Setiawan dan Ibu Eha Saleha Istiowati W. tercinta yang telah memberikan dukungan moril, materil, dan doa kepada penulis.
6. Seluruh teman-teman Teknik Metalurgi yang senantiasa memberikan dukungan dan doa.

Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi teman-teman mahasiswa maupun pihak lain yang memerlukannya. Atas perhatiannya, penulis ucapkan terima kasih.

Cilegon, Juni 2020

Titan Huzaimawardanni

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Identifikasi Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	6
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Sistematika Penulisan.....	7
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Biomaterial.....	8
2.2 Magnesium.....	11
2.3 <i>Severe Plastic Deformation (SPD)</i> .....	13



2.4	<i>Accumulative Roll Bonding (ARB)</i> .....	15
2.5	<i>Grain Refinement</i> (Penghalusan Butir) .....	18
2.6	<i>Strain Hardening</i> (Pengerasan Regangan).....	20
2.7	<i>Dislocation Density</i> (Kerapatan Dislokasi).....	21
2.8	Pengaruh Temperatur <i>Annealing</i> dan Siklus ARB.....	23

### **BAB III METODE PENELITIAN**

3.1	Diagram Alir .....	30
3.2	Alat dan Bahan.....	31
3.2.1	Alat yang digunakan .....	31
3.2.2	Bahan yang digunakan .....	32
3.3	Prosedur Penelitian.....	32
3.3.1	Preparasi Sampel.....	32
3.3.2	Proses <i>Accumulative Roll Bonding (ARB)</i> .....	33
3.3.3	Pengujian Metalografi (OM).....	34
3.3.4	Pengujian SEM-EDS.....	36
3.3.5	Pengujian <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	36
3.3.6	Pengujian Kekerasan .....	38
3.3.7	Pengujian Tarik .....	39

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1	Karakterisasi Awal Pelat Mg ( <i>Pure</i> ).....	41
4.2	Hasil Pengamatan Mikrostruktur .....	42
4.3	Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	48
4.4	Hasil Uji Kekerasan .....	51

4.5 Hasil Uji Tarik.....	53
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
4.1 Kesimpulan .....	60
4.2 Saran .....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>62</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
A. Contoh Perhitungan Nilai Kekerasan .....	68
B. Contoh Perhitungan Nilai Kerapatan Dislokasi .....	74
C. Hasil Pengujian SEM-EDS .....	81
D. Hasil Pengujian Tarik .....	82
E. Gambar Alat dan Bahan .....	84

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
<b>Tabel 2.1</b> Kelebihan Aplikasi Material Logam .....	9
<b>Tabel 2.2</b> Kekurangan Aplikasi Material Logam .....	10
<b>Tabel 2.3</b> Beberapa Logam Implan Bedah/Sifat Fisik Material .....	12
<b>Tabel 2.4</b> Perubahan Geometri Spesimen Selama Proses ARB .....	16
<b>Tabel 3.1</b> Sistem Kode Sampel Mg ( <i>Pure</i> ) .....	33
<b>Tabel 4.1</b> Hasil Pengujian Mekanik Mg <i>As Annealed</i> .....	42
<b>Tabel 4.2</b> Komposisi Mg ( <i>Pure</i> ) Hasil Pengujian SEM-EDS .....	42
<b>Tabel 4.3</b> Hasil Perhitungan Ukuran Butir Rata-rata Mg ( <i>Pure</i> ) <i>As ARBed</i> .....	43
<b>Tabel 4.4</b> Data Nilai Kerapatan Dislokasi Mg ( <i>Pure</i> ) <i>As ARBed</i> .....	49
<b>Tabel 4.5</b> Data Nilai Kekerasan Mg ( <i>Pure</i> ) <i>As ARBed</i> .....	51
<b>Tabel 4.6</b> Data Hasil Uji Tarik Mg ( <i>Pure</i> ) <i>As ARBed</i> .....	54
<b>Tabel A.1</b> Tabel Hasil Uji Kekerasan Mg ( <i>Pure</i> ) .....	68
<b>Tabel B.1</b> Tabel Hasil Perhitungan Kerapatan Dislokasi .....	74

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>Halaman</b>
<b>Gambar 2.1</b> Implan <i>Plates</i> pada Bagian Maksilofasial .....	9
<b>Gambar 2.2</b> Deskripsi Skematik Kisi Kristal HCP .....	11
<b>Gambar 2.3</b> Skema Proses <i>Severe Plastic Deformation</i> (SPD).....	14
<b>Gambar 2.4</b> Skematik Proses <i>Accumulative Roll Bonding</i> (ARB).....	15
<b>Gambar 2.5</b> Gerakan Dislokasi Saat Bertemu Batas Butir .....	19
<b>Gambar 2.6</b> Skematik Pengerasan Regangan .....	21
<b>Gambar 2.7</b> Pengamatan dengan Mikroskop Optik Mg ( <i>Pure</i> ) As ARBed .....	24
<b>Gambar 2.8</b> Kekuatan Tarik Lembaran Mg ( <i>Pure</i> ) As ARBed.....	25
<b>Gambar 2.9</b> Pengamatan SEM Komposit Mg/ZK60 As ARBed.....	26
<b>Gambar 2.10</b> Pengamatan Mikroskop Optik Mg/ZK60 As <i>Rolled</i> .....	27
<b>Gambar 2.11</b> Kurva <i>Stress-Strain</i> Mg/ZK60 As ARBed .....	29
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian .....	30
<b>Gambar 3.2</b> Spesimen ARB ( <i>Stacking</i> ) .....	34
<b>Gambar 3.3</b> Spesimen Pengujian Metalografi .....	34
<b>Gambar 3.4</b> Standar ASTM E8-15a .....	40
<b>Gambar 3.5</b> Spesimen Uji Tarik .....	40
<b>Gambar 4.1</b> Hasil Pengamatan Mikrostruktur Mg ( <i>Pure</i> ) As <i>Annealed</i> .....	41
<b>Gambar 4.2</b> Perubahan Struktur Mikro Mg ( <i>Pure</i> ) As ARBed.....	44
<b>Gambar 4.3</b> Grafik Pengaruh Jumlah Siklus ARB terhadap Ukuran Butir .....	45

<b>Gambar 4.4</b> Struktur Mikro Mg ( <i>Pure</i> ) As ARBed Siklus 1-4 .....	46
<b>Gambar 4.5</b> Struktur Mikro Mg ( <i>Pure</i> ) As ARBed dengan SEM .....	48
<b>Gambar 4.6</b> Grafik Pengaruh Jumlah Siklus terhadap Kerapatan Dislokasi.....	50
<b>Gambar 4.7</b> Grafik Pengaruh Jumlah Siklus ARB terhadap Kekerasan .....	52
<b>Gambar 4.8</b> Penampakan Sampel Setelah Pengujian Tarik .....	54
<b>Gambar 4.9</b> Grafik Pengaruh Jumlah Siklus ARB terhadap Kekuatan .....	55
<b>Gambar 4.10</b> Grafik Pengaruh Jumlah Siklus ARB terhadap Kuat Luluh.....	56
<b>Gambar 4.11</b> Kurva <i>Engineering Stress-Strain</i> pada Temperatur 250°C.....	57
<b>Gambar 4.12</b> Kurva <i>Engineering Stress-Strain</i> pada Temperatur 350°C.....	57
<b>Gambar 4.13</b> Kurva <i>True Stress-Strain</i> pada Temperatur 250°C.....	58
<b>Gambar 4.14</b> Kurva <i>True Stress-Strain</i> pada Temperatur 350°C.....	59
<b>Gambar C.1</b> Hasil Pengujian SEM-EDS .....	81
<b>Gambar D.1</b> Hasil Pengujian Tarik pada Temperatur 250°C .....	82
<b>Gambar D.2</b> Hasil Pengujian Tarik pada Temperatur 350°C .....	83
<b>Gambar E.1</b> <i>Muffle Furnace</i> .....	84
<b>Gambar E.2</b> <i>Mini Rolling</i> .....	84
<b>Gambar E.3</b> <i>Thermocouple</i> .....	84
<b>Gambar E.4</b> Mesin Bor Tangan .....	84
<b>Gambar E.5</b> Mesin <i>Cutting</i> .....	84
<b>Gambar E.6</b> Mesin <i>Grinding</i> .....	84
<b>Gambar E.7</b> Jangka Sorong .....	85
<b>Gambar E.8</b> <i>Slim Taper</i> .....	85
<b>Gambar E.9</b> Penggaris.....	85

<b>Gambar E.10</b> Tang Potong .....	85
<b>Gambar E.11</b> Tang Lancip .....	85
<b>Gambar E.12</b> Spidol .....	85
<b>Gambar E.13</b> Mikroskop .....	85
<b>Gambar E.14</b> Alat Uji Tarik .....	85
<b>Gambar E.15</b> <i>Tissue</i> .....	86
<b>Gambar E.16</b> Kawat Tembaga .....	86
<b>Gambar E.17</b> Aseton .....	86
<b>Gambar E.18</b> Pelat Magnesium.....	86
<b>Gambar E.19</b> Mesin <i>Polishing</i> .....	86

# Bab I

## Pendahuluan

### 1.1 Latar Belakang

Penggunaan biomaterial sebagai material implan sudah banyak diteliti perkembangannya dalam ilmu kedokteran, khususnya implan pada bagian maksilofasial. Implan maksilofasial adalah material yang dibangun untuk menggantikan atau mendukung tulang yang rusak pada penanganan kasus fraktur wajah (Badeges, 2012). *Plates, screws, nails, pins, wires*, dan *staples* adalah beberapa jenis implan yang digunakan untuk memperbaiki tulang yang patah hingga membiarkannya sembuh, dimana waktu penyembuhan berkisar antara 4 - 6 minggu (Syafliida, 2012).

Persyaratan material implan secara umum, harus memiliki sifat *biocompatible* (material tidak menyebabkan reaksi penolakan dari sistem kekebalan tubuh manusia karena dianggap benda asing), *bioactive* (dapat terjadi interaksi antara implan dan tubuh), sifat mekanis yang baik dalam jangka waktu tertentu hingga terjadi penyembuhan jaringan, dan memiliki kecepatan biodegradasi yang sesuai dengan kecepatan penyembuhan jaringan. Kriteria implan yang digunakan untuk bagian maksilofasial sendiri, yaitu kekuatannya (*ultimate tensile strength*) 110 – 130 MPa, kuat luluh (*yield strength*) 104 – 121 MPa, dan elongasi 0,7 – 3%. Material implan yang umum digunakan adalah *stainless steel*, titanium, paduan kobalt, dan material *resorbable* berbahan dasar polimer. Pada material logam

seperti *stainless steel*, titanium, dan paduan kobalt memiliki sifat mekanis dan ketahanan korosi yang baik. Namun setelah proses penyembuhan selesai, implan akan terus berada di dalam tubuh (bersifat permanen), sehingga diperlukan operasi sekunder untuk pengangkatan implan. Sedangkan material *bioresorbable* polimer mampu diserap jaringan tubuh dalam jangka waktu yang diperlukan ketika sudah tidak diperlukan lagi, namun sifat mekanisnya kurang memuaskan.

Salah satu material logam yang sedang dikembangkan penggunaannya sebagai material implan adalah Mg dan paduannya. Hal tersebut karena Mg memiliki beberapa kelebihan, yaitu memiliki sifat *biodegradable* (dapat terurai tanpa menimbulkan racun bagi tubuh) sehingga ketika implan sudah tidak diperlukan lagi material dapat luruh secara alami, *bioresorbable* (mampu diserap oleh jaringan tubuh), memiliki *fracture toughness* lebih tinggi dibandingkan *ceramic biomaterial*, dan memiliki densitas serta modulus elastisitas yang mendekati tulang sehingga mencegah efek *stress shielding* (Radha and Sreekanth, 2017).

Mg juga memiliki beberapa kekurangan sebagai material implan, yaitu kekuatannya yang rendah, dan laju korosi yang sangat cepat (2,89 mm/tahun) dalam kondisi *as cast* (pada larutan NaCl), sehingga menyebabkan Mg kehilangan kekuatan mekanisnya sebelum jaringan tubuh mengalami proses penyembuhan (Agarwal *et al.*, 2016). Hal tersebut membuat implan berbasis Mg sangat terbatas, karena lingkungan *electrolytic aqueous* dari cairan tubuh yang kaya akan klorida (kisaran pH antara 7,4 dan 7,6) (Eddy Jai Poinern, Brundavanam and Fawcett, 2013). Oleh sebab itu, diperlukan cara untuk meningkatkan sifat mekaniknya dan



mengontrol kecepatan biodegradasinya, sehingga dapat disesuaikan dengan kecepatan penyembuhan jaringan tubuh. Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk mengatasi kekurangan tersebut salah satunya dengan metode penghalusan butir (*grain refinement*) dan pengerasan regangan (*strain hardening*) (Agarwal *et al.*, 2016).

Teknik *severe plastic deformation* (SPD) adalah sebuah metode yang dapat mengubah mikrostruktur, dari berbutir kasar hingga berbutir sangat halus atau biasa disebut *ultrafine-grained* (UFG) melalui peregangan deformasi yang luar biasa. Pada beberapa penelitian, material UFG ini menunjukkan peningkatan kekuatan dan keuletan yang lebih besar dari sebelumnya. Terdapat beberapa metode SPD, antara lain *equal channel angular pressing* (ECAP), *high pressure torsion* (HPT), *multi-axial compression/forgings* (MAC/F), *accumulative roll bonding* (ARB), dan lain-lain.

Pada penelitian Prado *et al.* (2004), menunjukkan bahwa mikrostruktur UFG dalam paduan Mg yang cukup homogen dapat diperoleh secara efisien melalui proses ARB. Ukuran butir yang diperoleh dengan proses ARB sebanding dengan yang diperoleh pada proses ECAP. ARB merupakan proses reduksi 50% ketebalan dengan pengerolan, pada dua lembar pelat yang ditumpuk. Kemudian panjang dua lembar pelat yang telah dilakukan pengerolan dipotong menjadi dua bagian sama besar, ditumpuk, dipanaskan, dan dilakukan pengerolan kembali, proses tersebut diulang hingga beberapa kali. Proses ini menghasilkan produk yang banyak dan produksi yang cepat (Saito *et al.*, 1998). Kelebihan proses ARB dibandingkan metode SPD lainnya adalah prosesnya sederhana, murah, dapat melakukan

produksi massal lembaran logam secara terus menerus, dan memiliki potensi yang baik untuk komersialisasi (Valle and Ruano, 2005).

Penelitian tentang ARB ini dilakukan pertama kali oleh Saito *et al.* pada tahun 1998 menggunakan *pure* aluminium *as annealed*. Besar reduksi per siklus sebesar 50% dan temperatur *annealing* sebesar 200°C selama 5 menit. Hasilnya, setelah 6 siklus kuat tarik mencapai 300 MPa, lebih besar 3,7 kali dari bahan awal (80 MPa). Nilai kuat tarik tidak mengalami perubahan setelah 6 siklus, dan menunjukkan nilai yang konstan. Sedangkan elongasi menurun dari 50% menjadi 8% setelah 1 siklus ARB. Namun, nilai tersebut tetap konstan sekitar beberapa persen, bahkan ketika regangan meningkat. Ukuran butir rata-rata yang dihasilkan sebesar 670 nm.

Chang *et al.* pada tahun 2010 menggunakan lembaran Mg (*pure*) komersial (99,8 wt%), dengan besar reduksi 50% dan variasi temperatur serta siklus ARB masing-masing 300°C hingga 4 siklus, yang menghasilkan nilai kuat tarik sebesar 220 MPa dan 400°C hingga 6 siklus, menghasilkan nilai kuat tarik sebesar 210 MPa. Sedangkan ukuran butir terkecil yang dihasilkan dari kedua proses tersebut rata-rata berukuran  $< 5 \mu\text{m}$ .

Haribabu *et al.* (2018) menggunakan *strip pure* AZ31 Mg dan 1100 aluminium (ketebalan 1,5 mm kondisi *as received*) yang digabungkan dalam proses ARB. Kemudian sampel disusun menjadi tiga tumpukan Al/Mg/Al dan diikat membentuk ketebalan 4,5 mm. Proses ARB dilakukan hingga tiga siklus dengan reduksi per siklus sebesar 66%, dan temperatur *annealing* berkisar dari 250 sampai 500°C, waktu tahan 5 hingga 20 menit. Hasilnya, kekuatan tertinggi yang dihasilkan yaitu 180 MPa pada siklus ketiga. Sedangkan kekerasan meningkat dengan semakin

banyaknya siklus. Temperatur *annealing* dikatakan optimum pada 250°C dan 320°C selama 20 menit, karena menghasilkan ikatan antarmuka yang kuat, bebas dari celah dan retak (*crack*). Pemanasan pada 200°C selama 15 menit dan di atas 400°C tidak mencapai ikatan yang kuat. Temperatur di atas 400°C, terlalu tinggi dan memungkinkan terbentuknya lapisan oksida pada permukaan Al dan Mg, sehingga mempengaruhi kekuatan ikatan antarmuka.

Berdasarkan penelitian-penelitian proses ARB yang telah dilakukan, penggunaan temperatur, waktu tahan, reduksi, dan banyaknya siklus sangat mempengaruhi sifat mekanik material hasil proses ARB. Penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan Mg (*pure*) agar dapat diaplikasikan sebagai implan maksilofasial.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah yang akan ditinjau dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh banyaknya siklus dan temperatur *annealing* pada proses *accumulative roll bonding* (ARB) terhadap peningkatan sifat mekanik Mg (*pure*)?
2. Bagaimana pengaruh banyaknya siklus dan temperatur *annealing* pada proses *accumulative roll bonding* (ARB) terhadap kerapatan dislokasi dan ukuran butir Mg (*pure*)?
3. Bagaimana kekuatan dan kekerasan pada Mg (*pure*) dapat meningkat sehingga dapat digunakan sebagai bahan baku implan maksilofasial?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menghaluskan ukuran butir Mg (*pure*) hingga  $\leq 10 \mu\text{m}$ .
2. Meningkatkan kekuatan pada Mg (*pure*) menjadi  $\geq 110 \text{ MPa}$  dan elongasi 0,7 – 3%.
3. Menentukan temperatur dan banyak siklus ARB yang optimal terhadap kekuatan dan kekerasan Mg (*pure*).

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini meliputi :

1. Bahan yang digunakan adalah Mg (*pure*) dengan kemurnian 99,77%.
2. Metode yang digunakan yaitu *accumulative roll bonding* (ARB) dengan variasi siklus 1, 2, 3, dan 4.
3. Variabel temperatur proses ARB yang digunakan 250°C dan 350°C.
4. Mikrostruktur dan komposisi kimia dilihat menggunakan *Optical Microscope* (OM) dan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS).
5. Kerapatan dislokasi dilihat menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD).
6. Kekerasan permukaan sampel diuji dengan *Micro Vickers Hardness Tester*.
7. Kekuatan tarik sampel diuji dengan pengujian tarik menggunakan standar ASTM E8-15a.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan laporan penelitian ini dibagi menjadi tiga bab. Bab I menjelaskan aplikasi Mg (*pure*) sebagai implan khususnya bidang maksilofasial, permasalahan pada implan Mg (*pure*), penjelasan singkat mengenai *accumulative roll bonding*, serta teori-teori pendukung tentang *accumulative roll bonding* pada Mg (*pure*) sehingga penelitian ini perlu dilakukan. Bab II berisi teori-teori dasar proses *accumulative roll bonding*, dan sampel Mg (*pure*) sebagai acuan dalam analisis dan pembahasan. Bab III menjelaskan diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, prosedur dan metode penelitian yang dilakukan mulai dari preparasi spesimen ARB, proses pengujian metalografi (OM), pengujian SEM-EDS, pengujian XRD, uji kekerasan, dan uji tarik. Bab IV menjelaskan data ukuran butir sebelum dan setelah proses *accumulative roll bonding*, kerapatan dislokasi, kekerasan dan kuat tarik, serta pembahasannya berdasarkan teori pada bab sebelumnya. Bab V berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk penelitian lebih lanjut.

## **Bab II**

### **Tinjauan Pustaka**

#### **2.1 Biomaterial**

Menurut *American National Institute of Health*, definisi biomaterial adalah "substansi atau kombinasi zat apa pun, selain obat-obatan, sintetis atau alami, yang dapat digunakan untuk jangka waktu tertentu, yang menambah atau mengganti sebagian atau seluruhnya jaringan, organ atau fungsi tubuh, untuk menjaga atau meningkatkan kualitas hidup individu". *The Williams Dictionary of Biomaterials* Williams (1999) mendefinisikan biokompatibilitas sebagai "kemampuan suatu material untuk melakukan respon yang sesuai dalam situasi tertentu" (Bergmann and Stumpf, 2013). Suatu bahan dapat digunakan sebagai biomaterial apabila memiliki sifat-sifat seperti biokompatibel, tidak beracun, tidak merangsang timbulnya respon imun (*non-immunogenic*), tidak menyebabkan penggumpalan darah (*non-thrombogenic*), tidak menyebabkan timbulnya kanker (*non-carcinogenic*), dan sebagainya. Selain itu, biomaterial harus memiliki kekuatan mekanik yang cukup untuk menahan berbagai kekuatan biomekanik. Sifat mekanik yang penting untuk bahan implan adalah kekuatan luluh, modulus elastis, dan kekuatan tarik. Sifat lain yang diharapkan pada material implan adalah ringan, ketahanan aus yang baik, dan kemampuannya melekat ke tulang (*osseointegration*) (Radha and Sreekanth, 2017).



**Gambar 2.1** Implan *Plates* pada Bagian Maksilofasial (<https://www.omnia-health.com/product/maxillofacial-implans>)

**Tabel 2.1** Kelebihan Aplikasi Material Logam (Radha and Sreekanth, 2017)

<b>Material</b>	<b>Kelebihan</b>
316L <i>Stainless steel</i>	Mudah tersedia dan murah Sifat fabrikasi yang sangat baik
Paduan Co-Cr	Biokompatibilitas dan ketangguhan yang baik Unggul dalam hal ketahanan terhadap korosi, kelelahan, dan keausan Kekuatan yang tinggi
Paduan Titanium (Ti)	Biokompatibilitas jangka panjang Ketahanan terhadap korosi sangat tinggi Modulus elastisitas rendah Lebih kuat daripada <i>stainless steels</i> Ringan <i>Biocompatible</i>
Paduan Magnesium (Mg)	<i>Biocompatible</i> <i>Biodegradable</i> <i>Bioresorbable</i> Densitas dan modulus elastisitas mendekati tulang Tidak rentan mengalami <i>stress shielding</i> Ringan

Tubuh manusia sering rentan terhadap cedera yang menyakitkan dan melumpuhkan seperti dislokasi, dan patah tulang. Resiko patah tulang dipengaruhi oleh usia, jenis kelamin, kekuatan tulang, dan kondisi medis awal. Pembedahan pada aplikasi traumatologis akhir-akhir ini sangat tergantung pada pengembangan biomaterial yang digunakan untuk mengamankan patah tulang (Chen *et al.*, 2014). Aplikasi perangkat implan maksilofasial pada tulang manusia dapat dilihat pada Gambar 2.1. Perbedaan kelebihan dan kekurangan beberapa biomaterial logam dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2. Eksplorasi dalam material *biodegradable* diperlukan untuk meningkatkan kinerja perangkat, untuk meningkatkan fungsi, dan mencapai tujuan regenerasi jaringan. (Radha and Sreekanth, 2017).

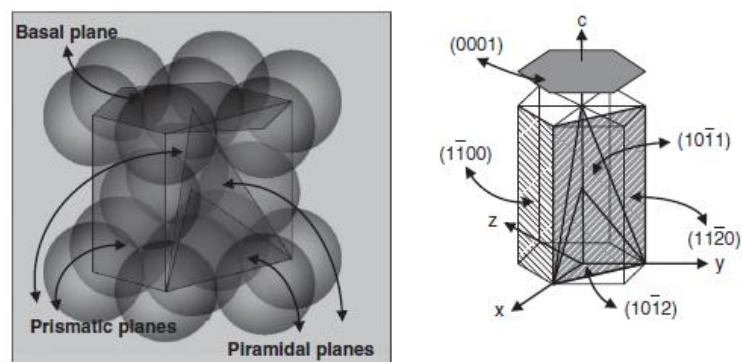
**Tabel 2.2** Kekurangan Aplikasi Material Logam (Radha and Sreekanth, 2017)

<b>Material</b>	<b>Kekurangan</b>
316L <i>Stainless steel</i>	Modulus elastisitas tinggi Ketahanan korosi rendah Ketahanan aus rendah Mengakibatkan reaksi alergi pada jaringan di sekitarnya Mengakibatkan <i>stress shielding</i>
Paduan Co-Cr	Mahal Sulit untuk diterapkan permesinan Mengakibatkan <i>stress shielding</i> Modulus elastisitas tinggi Mengakibatkan toksisitas biologis karena pelepasan ion Co, Cr, dan Ni
Paduan Titanium (Ti)	Ketahanan aus yang rendah Keuletan rendah ( <i>bending ductility</i> ) Mahal
Paduan Magnesium (Mg)	Evolusi hidrogen selama degradasi Ketahanan korosi rendah



## 2.2 Magnesium

Magnesium merupakan unsur kimia yang termasuk golongan alkali tanah, memiliki simbol Mg, nomor atom 12, dan massa atom 24,30. Mg murni (*pure*) berwarna putih keperakan, titik leburnya sebesar 650°C, titik didihnya 1090°C, kekerasannya sebesar 30-47 HB, dan susunan atomnya membentuk *hexagonal close packing* (HCP), yang dapat dilihat pada Gambar 2.2. Jumlah atom yang dimiliki sel unit HCP adalah 6, *atomic packing factor* (APF) sebesar 0,74, dan *stacking faults energy* (SFE) sebesar 125 mJ.m<sup>-2</sup>. HCP memiliki tiga sistem *slip*, yaitu basal, prismatic, dan piramidal. Deformasi plastis terjadi dengan menggeser (*slip*) bidang *close-packed* yang saling berdekatan. Semakin besar jumlah sistem *slip*, maka semakin besar kapasitas untuk deformasi. Mg memiliki sistem *slip* yang lebih sedikit daripada logam dengan sistem kristal *body centered cubic* (BCC) dan *face centered cubic* (FCC), sehingga deformasi plastisnya jauh lebih terbatas (ASM International, 2008).



**Gambar 2.2** Deskripsi Skematik Kisi Kristal *Hexagonal Close-Packed* (HCP) (Kaya, 2013)

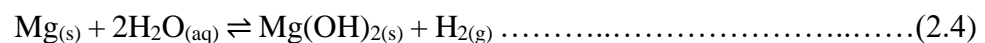
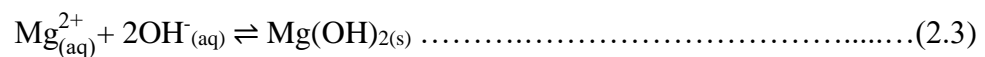
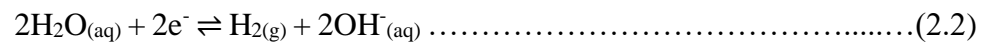
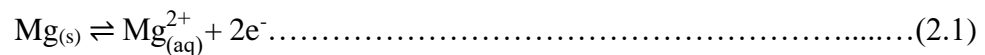
Pada 1930-an, Mg telah ditemukan *biodegradable* dalam tubuh manusia, sifat *biodegradable* ini dapat mengurangi biaya terkait dengan operasi yang

berulang, meminimalkan waktu pemulihan, mengurangi resiko infeksi pasca operasi, sehingga meningkatkan kualitas hidup yang lebih tinggi. Dalam penelitian sebelumnya, Mg dapat menstimulasi pembentukan tulang karena ion Mg meningkatkan perlekatan dan proliferasi sel (Charyeva *et al.*, 2015). Ion Mg adalah metabolit umum dalam tubuh dengan kisaran konsumsi harian 250-300 mg/hari dan secara alami disimpan dalam tulang. Oleh karena itu, diantara logam yang dapat terbiodegradasi, biokompatibilitas, dan kemiripan sifat mekanik Mg murni dengan tulang membuatnya cocok untuk aplikasi maksilofasial, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3 (Chen *et al.*, 2014).

**Tabel 2.3** Beberapa Logam Implan/Sifat Fisik Material (Agarwal *et al.*, 2016)

Jaringan/Implan Bedah		Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation to break (%)	Modulus Elastis (GPa)
Tulang kortikal		1,8-2,1	104-121	110-130	0,7-3	15-25
Paduan logam <i>biodegradable</i>						
Mg dan paduannya	Mg ( <i>pure</i> )	1,74-2,0	65-100	90-190	2-10	41-45
	AZ31	1,78	185	263	15-23	45
	AZ91	1,81	160	150	2,5-11	45
	WE43	1,84	170	220	2-17	44,2
	ZK60	1,83	235	315	8	44,8
Paduan Fe dan Mn	Fe20Mn	7,73	420	700	8	207
Paduan berbasis Zn	Zn-Al-Cu	5,79	171	210	1	90
Implan logam/komposit <i>non-degradable</i>						
<i>Stainless steel</i>	SS316L	7,9	190	490	40	200
Paduan titanium	Ti-6Al-4V	4,43	880	950	14	113,8
Paduan kobalt-kromium	CoCr20Ni15Mo7	7,8	240-450	450-960	50	195-230
<i>Bioceramics</i>	<i>Alumina ceramics</i>	4	-	400-580	0,12	260-410
	<i>Synthetic hydroxyapatite</i>	3,15	-	40-200	-	12-120
Poliester alami dan sintetik	<i>Collagen (rat tail)</i>	-	-	2,6-605	7, 40-26,74	5-11,5
	PCL	1,145	8,37- 14,66	68,45- 102,7	22,8-28,3	281-686
	PLA (67 Kda)	1,8	70	59	7,0	3750

Jika terpapar udara, permukaan Mg dipasivasi oleh lapisan tipis  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , yang semakin berkurang oleh reaksi kimia.  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  sedikit larut dalam air, namun korosi yang parah terjadi pada media yang mengandung garam, seperti di dalam tubuh manusia, dimana konsentrasi ion klorida tinggi sekitar 150 mM.  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  terakumulasi pada matriks Mg yang mendasarinya sebagai lapisan pelindung korosi dalam air, tetapi ketika konsentrasi klorida dalam lingkungan korosif naik di atas 30 mM,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  mulai berubah menjadi  $\text{MgCl}_2$  yang sangat larut. Oleh karena itu, korosi lubang yang parah dapat diamati pada paduan Mg *in vivo*. Persamaan 2.4 menunjukkan reaksi korosi Mg keseluruhan dalam lingkungan berair (*aqueous*) (Limited, 2013):

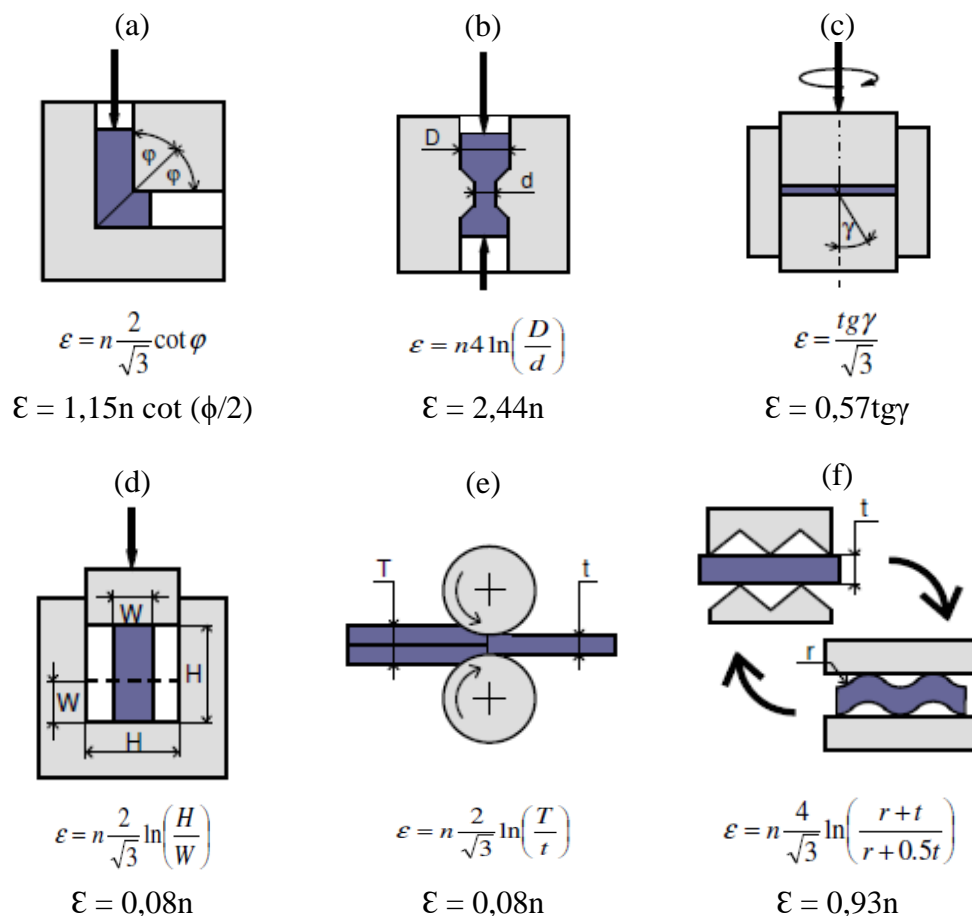


Sifat mekanik dan ketahanan korosi Mg dapat ditingkatkan dengan cara penambahan paduan (mengubah komposisi kimianya), perlakuan mekanis, perlakuan panas, dan pelapisan (*coating*).

### 2.3 *Severe plastic deformation (SPD)*

*Severe plastic deformation* (SPD) atau disebut juga deformasi plastis menyeluruh, adalah proses yang melibatkan pengerjaan material dengan tekanan tinggi yang menghasilkan deformasi regangan plastis yang mengakibatkan pecahnya butiran kasar (butiran besar menjadi kecil/halus). Ukuran butiran halus

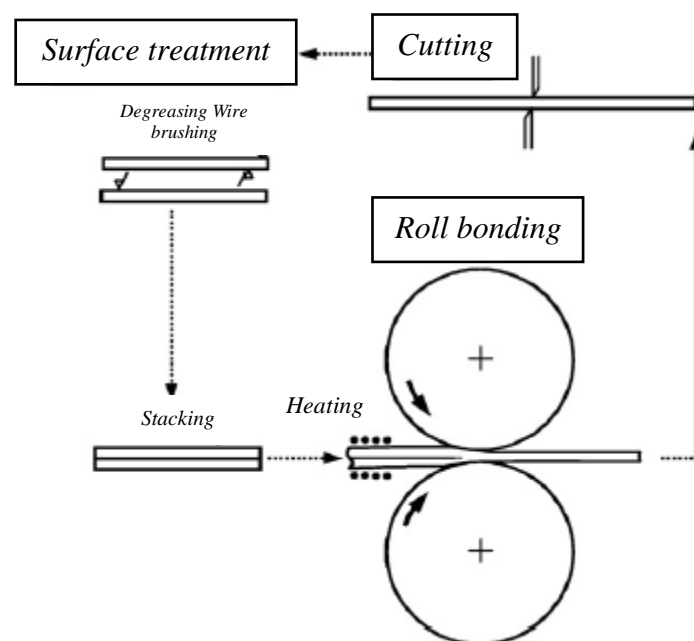
yang dihasilkan dapat berada dalam kisaran *ultrafine* (100-1000 nm), atau skala nano (<100 nm). Metode SPD telah menjadi proses manufaktur yang efisien untuk menghasilkan struktur butir material berukuran nano dan sangat halus (*ultrafine*) (Sanusi and Akinlabi, 2017). Deformasi yang cukup besar ini menghasilkan butiran halus yang bebas dislokasi dan misorientasi butir halus, sehingga mengubah sifat mekanik material. Terdapat beberapa jenis metode SPD berdasarkan teknik pembentukannya, beserta regangan yang dihasilkan, yang dapat dilihat pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Skema Proses *Severe Plastic Deformation*: (a) *Equal Channel Angular Pressing*, (b) *Cyclic Extrusion-Compression*, (c) *High-Pressure Torsion*, (d) *Cyclic Closed-Die Forging*, (e) *Accumulative Roll Bonding*, (f) *Repetitive Corrugation and Straightening* (Rosochowski, 2005)

## 2.4 *Accumulative Roll Bonding (ARB)*

*Accumulative roll-bonding (ARB)* pertama kali dikembangkan oleh Saito pada tahun 1998, adalah salah satu metode SPD yang menerapkan regangan besar ke dalam lembaran logam tanpa mengubah bentuk geometrisnya selama beberapa siklus penumpukan, pemotongan, pengerolan, dan deformasi *solid-state bonding* (Chang *et al.*, 2010). Material yang melewati alat *rolling* akan mengalami tegangan tekan (*compression stress*), dan tegangan geser permukaan (*shear stress*). Tegangan geser menimbulkan tegangan gesek (*frictional stress*), antara permukaan *roll* dengan material. Tegangan gesek menarik benda kerja agar dapat masuk ke dalam celah *roll*. Deformasi yang terjadi menghasilkan material bertambah panjang dan penurunan ketebalan (Prabowo, 2010). Prinsip proses ARB secara sistematis dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Skematis Proses *Accumulative Roll Bonding (ARB)* (Saito *et al.*, 1998)

Langkah pertama, sebuah *strip* ditempatkan dengan rapi di atas *strip* yang lain (*stacking*). Antarmuka kedua *strip* dipanaskan (*annealing*) terlebih dahulu agar dapat dilakukan pengerolan dan tidak terjadi retakan (*cracking*). Kedua lapisan disatukan dengan pengerolan, seperti pada proses *roll-bonding* konvensional. Kemudian, panjang *strip* yang sudah dilakukan pengerolan dibagi menjadi dua bagian sama rata. *Strip* yang sudah dipotong tadi ditumpuk, dipanaskan, dan dilakukan pengerolan kembali. Pada prinsipnya prosedur ini dapat diulang tanpa batas, sehingga regangan plastis yang sangat besar dapat dihasilkan pada material.

Regangan setelah siklus ke-*n* proses ARB dapat dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3}}{2} \ln(r), \quad r = 1 - \frac{t}{t_0} = 1 - \frac{1}{2^n} \dots \dots \dots (2.5)$$

Pada persamaan 2.5,  $t_0$  adalah ketebalan awal lembaran yang ditumpuk,  $t$  ketebalan setelah pengerolan, dan  $r$  pengurangan ketebalan per siklus. Tabel 2.4 merangkum perubahan geometris dari tebal spesimen yang ditumpuk dan telah di *roll* dengan reduksi 50% per siklus. Jumlah lembar awal yang termasuk dalam spesimen yang diproses oleh  $n$  siklus ARB menjadi  $2n$ . Setelah 10 siklus proses ARB, jumlah lapisan menjadi 1024 sehingga ketebalan rata-rata lembaran awal lebih kecil dari 1 mm (Azushima *et al.*, 2008).

**Tabel 2.4** Perubahan Geometri Spesimen Selama Proses ARB dengan Reduksi 50% per Siklus (Azushima *et al.*, 2008)

Jumlah Siklus, <b>n</b>	1	2	3	5	10
<b>Jumlah Lapisan, m</b>	2	4	8	32	1024
<b>Total Reduksi, r (%)</b>	50	75	87,5	96,9	99,9
<b>Equivalent Strain, <math>\varepsilon</math></b>	0,80	1,60	2,40	4,00	8,00

Adapun mekanisme pembentukan *ultrafined-grained* (UFG) yang terjadi pada saat proses ARB adalah (Jamaati *et al.*, 2012):

1. Mekanisme yang pertama adalah pengaruh dari *severe shear deformation* dibawah permukaan material. *Severe shear deformation* sebagai hasil dari gesekan antara permukaan sampel dengan alat *rolling* dibawah kondisi kering yang berperan penting dalam penghalusan butir dengan proses ARB. *Shear deformation* ini secara signifikan meningkatkan *equivalent strain* dan mendukung penghalusan butir. Setelah beberapa siklus, seluruh ketebalan sampel akan terdeformasi
2. Adanya lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan tersebar secara seragam, berperan sebagai penghambat dalam pertumbuhan butir dan menghambat gerakan dislokasi. Penataan ulang dislokasi mengarah pada pembentukan batas *subgrain*. Kerapatan dislokasi yang tinggi disebabkan oleh tekanan yang kuat sehingga batas *subgrain* semakin berkembang menjadi batas butir dengan sudut misorientasi yang besar.
3. Rekristalisasi yang berkelanjutan berperan dalam pembentukan UFG, pemulihan dari sub-batas butir, dan migrasi batas butir. Penerapan jumlah siklus ARB pada material memiliki struktur dengan misorientasi yang besar antar butir.

Perbedaan antara proses *rolling* konvensional dengan proses ARB adalah misorientasi rata-rata pada material yang diproses ARB, secara signifikan lebih besar daripada material *rolling* konvensional pada nilai *strain* yang hampir mirip (identik). Perbedaan lain antara *rolling* konvensional dengan proses ARB yaitu

*redundant shear strain*. Proses ARB biasanya dilakukan tanpa pelumasan (*lubrication*). Daerah *subsurface* material yang diproses ARB, memiliki semacam tekstur geser yang sangat berbeda dari daerah tengah. Karakteristik pada material ARB adalah distribusi rumit dari *redundant shear strain* setelah beberapa siklus ARB, karena 50% *rolled sheet* dipotong dan ditumpuk diantara siklus, setengah dari permukaan yang telah mengalami deformasi geser menjadi ke daerah tengah. Hasilnya, *sheared region* atau daerah yang mengalami regangan geser pada proses ARB tidak hanya terlokalisasi pada lapisan bawah permukaan tetapi secara rumit terdistribusi melalui ketebalan lembaran ketika siklus ARB berlangsung, karena deformasi geser tidak mengubah ketebalan material, wilayah yang terintegrasi regangan geser harus ditambahkan ke *equivalent strain* material. Hal tersebut berarti, regangan substansial yang diterapkan selama siklus ke  $n$  dari ARB tanpa pelumasan (*lubrication*), jauh lebih besar dari  $0,8n$  yang dihitung hanya dari pengurangan ketebalan. Regangan yang terakumulasi pastinya menjadi salah satu alasan pembentukan struktur UFG pada material ARB. (Tsuji *et al.*, 2003)

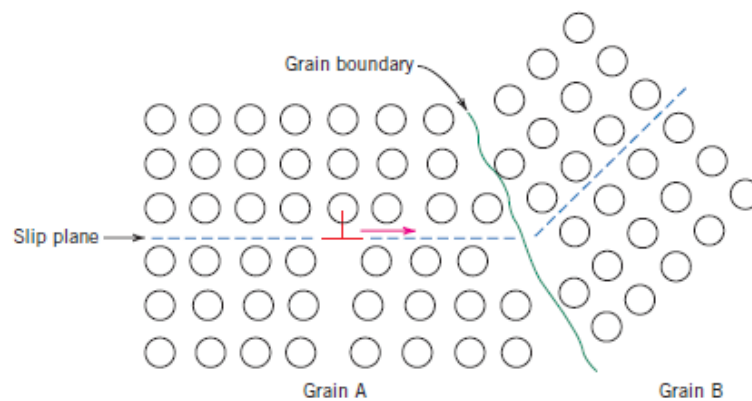
Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi keberhasilan proses ARB diantaranya preparasi awal sampel, temperatur pemanasan (*pre-heating*), lama waktu pemanasan, persen reduksi, beban *roll*, serta kecepatan *roll*.

## **2.5 Grain Refinement (Penghalusan Butir)**

Ukuran butir atau diameter butir rata-rata, dalam logam polikristalin mempengaruhi sifat mekanik. Butiran yang berdekatan biasanya memiliki orientasi kristalografi yang berbeda, dan tentu saja batas butir yang sama. Gambar 2.5



mengilustrasikan gerakan dislokasi saat bertemu batas butir, menggambarkan bagaimana batas butir bertindak sebagai penghalang hingga menjadi *slip*. Bidang *slip* bersifat diskontinu dan mengubah arah melintasi batas butir. Selama deformasi plastis, gerakan *slip* atau dislokasi harus terjadi melintasi batas butir, contohnya dari butiran A ke butiran B pada Gambar 2.5 (Callister and Wiley, 2007).



**Gambar 2.5** Gerakan Dislokasi Saat Bertemu Batas Butir (Callister and Wiley, 2007)

Batas butir berperan sebagai penghalang gerakan dislokasi karena dua alasan (Callister and Wiley, 2007):

1. Karena dua butir memiliki orientasi yang berbeda, dislokasi yang melewati butir B harus mengubah arah gerakannya, hal ini menjadi semakin sulit karena misorientasi kristalografi meningkat.
2. Gangguan atom dalam wilayah batas butir akan menghasilkan diskontinuitas bidang *slip* dari satu butir ke yang lainnya.

Untuk batas butir bersudut tinggi, dislokasi cenderung “menumpuk” pada batas butir. Dalam tumpukan ini, terdapat konsentrasi tegangan di depan bidang *slip*nya, yang menghasilkan dislokasi baru pada butir yang berdekatan. Semakin

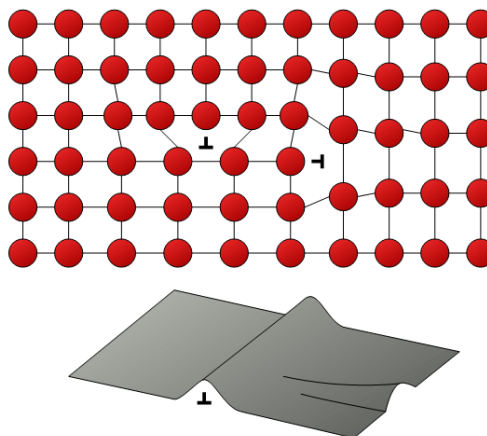
kecil atau halus ukuran butir maka semakin banyak batas butir yang terbentuk, banyaknya batas butir akan menghalangi pergerakan dislokasi, akibatnya pergerakan dislokasi menjadi kecil dan mengubah arah orientasi dislokasi. Hal ini menyebabkan kekuatan dan kekerasan logam meningkat (Callister and Wiley, 2007).

Pada penelitian Ben *et al.* (2010) menunjukkan bahwa ukuran butir dari matriks  $\alpha$ -Mg dan fasa kedua secara signifikan mempengaruhi ketahanan korosi paduan Mg. Ralston dan Birbilis (2010) menjelaskan bahwa batas butir memiliki energi yang lebih tinggi dan menyediakan lokasi yang menguntungkan untuk pembentukan butir, yang kemudian bermanfaat bagi pembentukan film oksida pelindung. Dengan butiran yang lebih halus menyebabkan peningkatan ketahanan korosi, yang dikaitkan dengan pembentukan film dan adhesi yang lebih baik karena peningkatan kepadatan batas butir. Fasa kedua dalam paduan Mg selalu memiliki potensi korosi yang lebih besar dan menghasilkan peningkatan korosi mikrogalvanik dan mempercepat korosi secara keseluruhan. Oleh karena itu, jika penghalusan butir dari fasa kedua dapat dicapai sampai batas tertentu, akan berguna untuk mencegah partikel fasa kedua berperan sebagai katoda lokal dan menyebabkan korosi lokal yang parah (Chen, Dai and Zhang, 2015).

## **2.6 *Strain Hardening* (Pengerasan Regangan)**

*Strain hardening* (pengerasan regangan) adalah fenomena dimana logam ulet menjadi lebih keras dan kuat karena terdeformasi plastis. Mekanisme ini juga disebut pengerasan kerja (*work hardening*), atau pengerjaan dingin (*cold working*)

karena dilakukan pada temperatur yang relatif rendah, hal ini disebabkan peningkatan temperatur dapat menurunkan laju pengerasan regangan.



**Gambar 2.6** Skematik Pengerasan Regangan (*Strain Hardening*)  
(<https://www.tec-science.com>)

Kerapatan dislokasi dalam logam meningkat dengan deformasi atau *cold work*, karena pengandaan dislokasi atau pembentukan dislokasi baru. Akibatnya, jarak rata-rata pemisahan antara dislokasi berkurang, dislokasi diposisikan lebih berdekatan. Hasil akhirnya adalah bahwa gerakan dislokasi terhambat oleh adanya gerakan dislokasi lain, skematik pengerasan regangan dapat dilihat pada Gambar 2.6. Dengan meningkatnya kerapatan dislokasi, hambatan terhadap gerakan dislokasi oleh dislokasi lain menjadi lebih jelas. Dengan demikian, tekanan yang diterapkan untuk mendeformasi logam meningkat, dengan meningkatnya *cold work* (Callister and Wiley, 2007).

## 2.7 *Dislocation Density* (Kerapatan Dislokasi)

Dislokasi adalah pergerakan atom-atom di dalam sistem kristal suatu logam akibat tegangan mekanik, yang menciptakan deformasi plastis. Tingkat kesulitan

pergerakan dislokasi di dalam sistem kristal suatu logam mempengaruhi kekerasan, kekuatan, dan keuletannya. Terdapat tiga jenis dislokasi, yaitu dislokasi tepi, dislokasi ulir, dan dislokasi campuran (tepi dan ulir) (Callister and Wiley, 2007). Faktor-faktor penting yang mempengaruhi perilaku dislokasi dalam logam murni adalah tingkat kemurnian, struktur kristal, temperatur homolog, dan *stacking faults energy* (SFE) (Edalati and Horita, 2011).

Jumlah dislokasi, atau kerapatan dislokasi dalam material dinyatakan sebagai panjang dislokasi per satuan volume. Ada beberapa teknik untuk mengamati dislokasi, antara lain *Small Angle X-Ray Scattering* (SAXS), *Transmission Electron Microscope* (TEM), dan *X-Ray Diffraction* (XRD). XRD dapat digunakan untuk mengidentifikasi *micro structural* logam dengan cara menembakkan sinar *X-Ray* pada logam. Dibandingkan dengan alat-alat lainnya, XRD memiliki kelebihan yaitu dengan preparasi yang lebih sederhana dan informasi dari lebar setengah puncak dapat diketahui besar rata-rata dari ukuran kristalit. *Software* yang digunakan untuk menganalisa grafik uji XRD, salah satunya adalah *High Score Plus* (HSP), setelah menentukan *peak* dengan tepat pada grafik XRD dapat diketahui nilai dari *microstructural parameters*, yaitu *crystallite size* (D) dan *microstrain* ( $\epsilon$ ). Kerapatan dislokasi dapat dihitung dengan metode *Rietveld* (Rezaei, Toroghinejad and Ashrafizadeh, 2011):

$$\rho = (\rho_D \times \rho_S)^{1/2} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\rho_D = \frac{3}{D^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\rho_S = \frac{K(\epsilon)^2}{b^2} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan:

$$K = 6\pi$$

$$\rho_s = \text{strain boardening}$$

$$b = \text{burgers vector (0,024 nm untuk Mg)}$$

$$\rho = \text{kerapatan dislokasi (m}^{-2}\text{)}$$

$$D = \text{crystallite size (nm)}$$

$$\varepsilon = \text{microstrain}$$

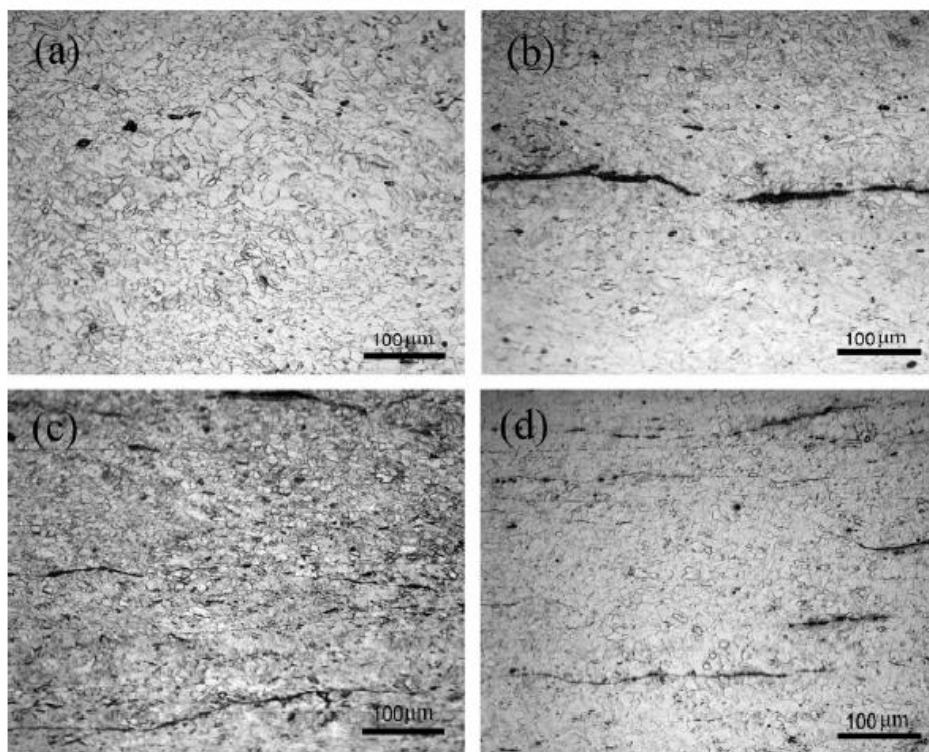
$$\rho_D = \text{ukuran domain}$$

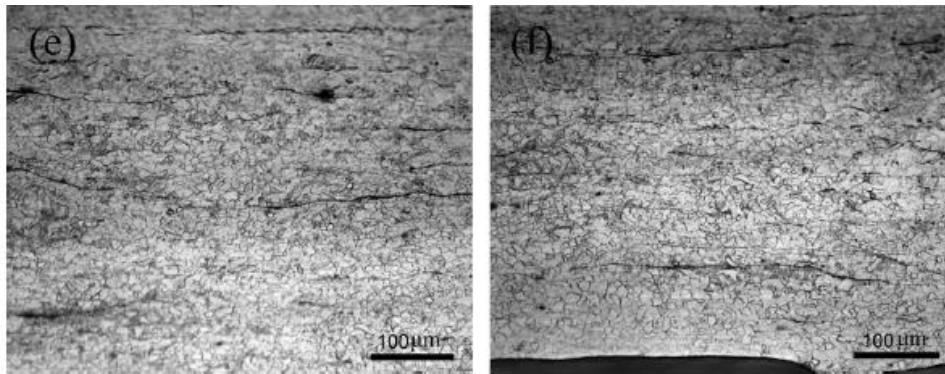
## 2.8 Pengaruh Temperatur *Annealing* dan Siklus ARB

Pada penelitian Chang *et al* (2010), menggunakan Mg (*pure*) komersial *as rolled* dengan tebal 1 mm (99,8 wt%), dengan temperatur *annealing* 400°C. Sampel Mg (*pure*) *as rolled* tersebut selanjutnya dilakukan proses ARB dengan variasi temperatur pemanasan awal (*annealing*) 300°C selama 10 menit, 400°C selama 5 menit, dan variasi siklus masing-masing sebesar 4 siklus dan 8 siklus. Besar reduksi setiap siklus adalah 50%, pengerolan dilakukan menggunakan *roll-mill* berdiameter 110 mm dengan kecepatan putar sebesar 7 m/menit.

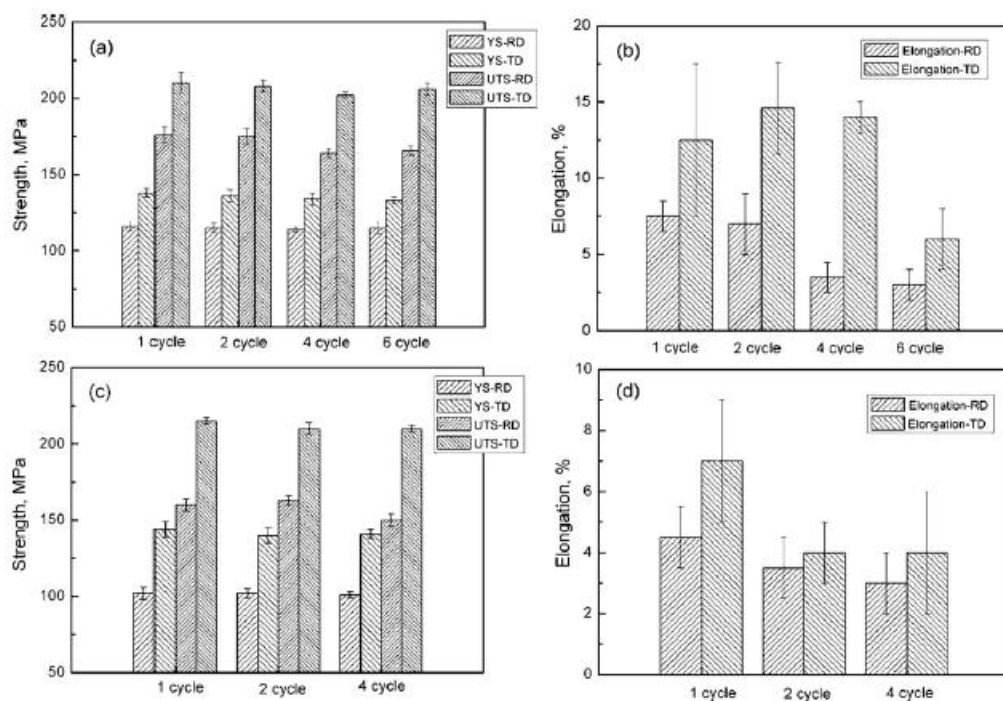
Gambar 2.7 menunjukkan evolusi mikrostruktur Mg (*pure*) setelah proses ARB pada temperatur 400°C. Struktur bimodal telah teramati pada Mg (*pure*) *as rolled*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 (a). Ukuran butir besar sekitar 30  $\mu\text{m}$ , sedangkan butir kecil berukuran kurang dari 5  $\mu\text{m}$ . Gambar 2.7 (b) menunjukkan bahwa, dihasilkan struktur mikro yang halus akibat regangan besar yang diterapkan pada sampel setelah 1 siklus ARB, meskipun sebagian kecil dari butiran besar masih ada. Terlebih, beberapa bagian antarmuka menyatu dengan baik dan menjadi hampir tidak terlihat, sementara beberapa bagian lainnya menunjukkan ikatan yang lemah. Setelah 2 siklus ARB, terjadi peningkatan fraksi butiran kecil,

dan ukuran butir rata-rata menjadi 15  $\mu\text{m}$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 (c). Selama pemrosesan ARB berikutnya, homogenitas struktur mikro meningkat jelas dengan ukuran butir sekitar 15  $\mu\text{m}$ , yang ditampilkan pada Gambar 2.7 (d)-(f). Menurut Gruber *et al.* (2008) butiran Mg tumbuh dengan cepat ketika temperatur ARB lebih tinggi dari 0,5  $T_m$ . Selain itu, Yi *et al.* (2009) telah menunjukkan bahwa *intermediate annealing* dari lembaran Mg (*pure*) selama *hot rolling* dapat menyebabkan butiran terekristalisasi penuh dan sebagian besar butiran tumbuh, sehingga untuk proses *rolling* selanjutnya tidak menghasilkan perubahan ukuran butir yang signifikan.





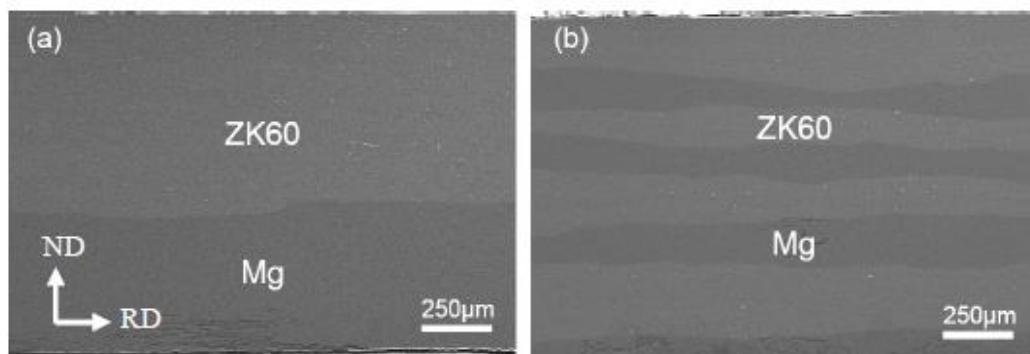
**Gambar 2.7** Pengamatan dengan Mikroskop Optik *Mg (pure)* Setelah Proses ARB pada 400° C: (a) Sampel *As rolled*, (b) Setelah 1 siklus, (c) Setelah 2 siklus, (d) Setelah 4 siklus, (e) Setelah 6 siklus, dan (f) Setelah 8 siklus (Chang *et al.*, 2010).



**Gambar 2.8** Kekuatan Tarik Lembaran *Mg (pure)* Hasil Proses ARB: (a) YS dan UTS pada 400°C, (b) Elongasi Lembaran *Mg (pure)* Hasil Proses ARB pada 400°C, (c) YS dan UTS pada 300°C, (d) Elongasi Lembaran *Mg (pure)* Hasil Proses ARB pada 300°C (Chang *et al.*, 2010)

Kekuatan tarik spesimen dapat dilihat pada Gambar 2.8. Dimana, kekuatan tarik sepanjang *rolling direction* (RD) dan *transverse direction* (TD) meningkat,

setelah proses ARB pada 400°C selama 1 siklus, karena penghalusan butir yang disebabkan oleh regangan deformasi yang besar. Namun, baik *yield strength* (YS) dan *ultimate tensile strength* (UTS) sepanjang RD dan TD lembaran Mg (*pure*), tidak berubah secara jelas selama proses ARB berikutnya, yang dapat dikaitkan dengan ukuran butirnya yang sama. Sedangkan lembaran Mg (*pure*) yang diproses pada 300°C, menunjukkan YS yang besar sepanjang RD dan TD dibandingkan dengan lembaran Mg (*pure*) pada 400°C (Chang *et al.*, 2010).

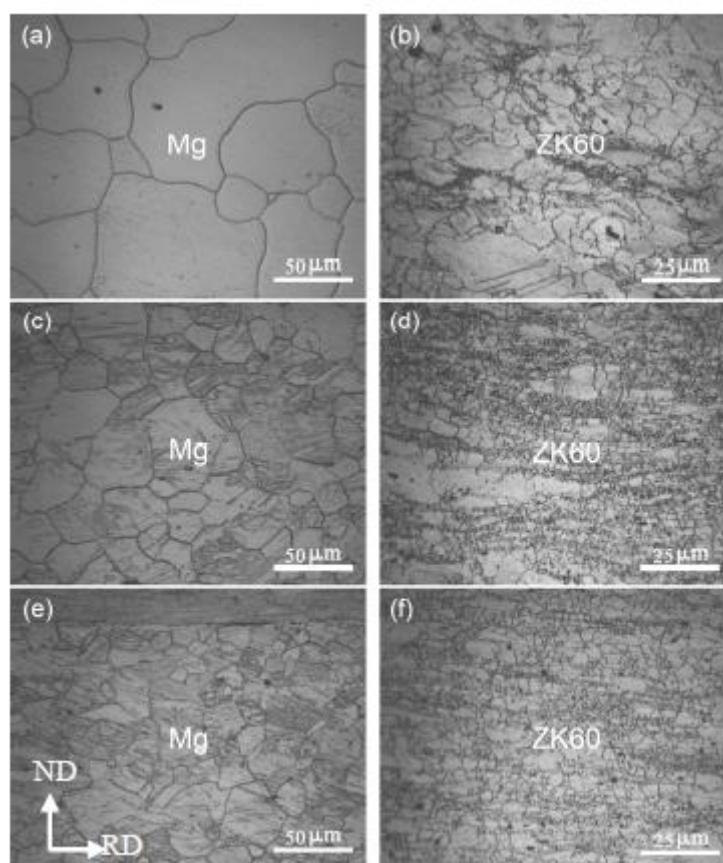


**Gambar 2.9** Pengamatan SEM pada Bagian Longitudinal (bidang RD-ND) Komposit Mg/ZK60 setelah proses ARB, (a) Siklus 1, (b) Siklus 3 (Hu *et al.*, 2010)

Hu *et al.* (2010) pada penelitiannya, menggunakan Mg (*pure*) komersial (99,8 wt% Mg) dan paduan Mg ZK60 (Mg 6 wt%, Zn 0,5 wt%, Zr) dengan ketebalan 1 mm. Kedua material tersebut di *annealing* pada temperatur 300°C, kemudian dilakukan proses ARB (Mg/ZK60) dengan reduksi 50%, menggunakan *rolling mill* berdiameter 180 mm pada kecepatan 5 m/min. Proses ini diulang hingga 3 siklus, sehingga menghasilkan lembaran komposit yang mengandung delapan lapisan Mg dan ZK60. Mikrostruktur komposit Mg/ZK60 diamati pada bagian longitudinal (bidang *rolling direction-normal direction*) menggunakan mikroskop optik dan SEM. Gambar 2.9 menunjukkan hasil pengamatan komposit Mg/ZK60



dengan SEM setelah proses ARB. Lapisan Mg dan ZK60 menyatu dengan baik bahkan setelah siklus pertama ARB. Ketebalan lapisan Mg dan ZK60 menurun secara bertahap dengan meningkatnya jumlah siklus ARB. *Necking* yang jelas dan munculnya gelombang (*wavy*) diamati pada lapisan Mg setelah 3 siklus ARB. Distribusi ketebalan lapisan Mg sepanjang arah *rolling* tidak homogen sedangkan ketebalan lapisan ZK60 lebih homogen.



**Gambar 2.10** Pengamatan Mikroskop Optik Penampang Longitudinal (bidang RD-ND), (a) Mg *as rolled*, (b) ZK60 *as rolled*, (c) Lapisan Mg dan (d) Lapisan ZK60 setelah siklus 1 ARB, (e) Lapisan Mg dan (f) Lapisan ZK60 setelah siklus 3 ARB (Hu *et al.*, 2010)

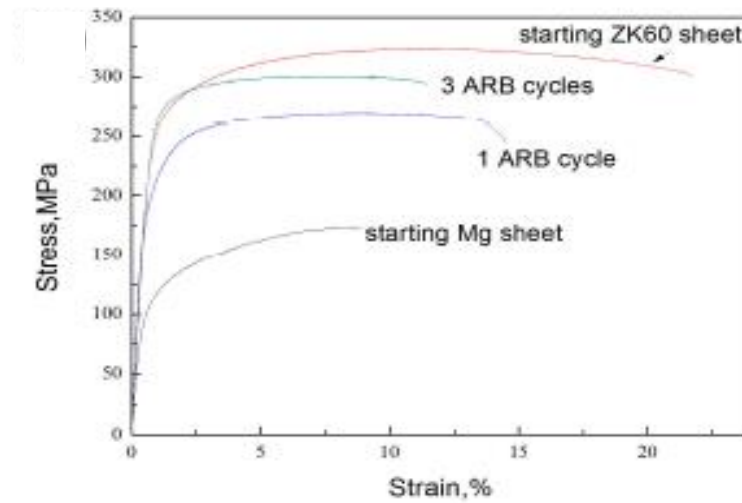
Pada Gambar 2.10 menunjukkan hasil dari pengamatan mikroskop optik lapisan Mg dan ZK60 sebelum dan sesudah proses ARB. Kedua lapisan Mg (*pure*)

dan ZK60 secara signifikan mengalami penghalusan butir setelah siklus ARB yang pertama. Lapisan Mg cukup homogen setelah siklus pertama ARB, sedangkan lapisan ZK60 memperlihatkan distribusi ukuran butir bimodal dengan butiran kasar dan butiran terekristalisasi halus. Dengan meningkatnya siklus ARB, struktur mikro menjadi lebih homogen pada lapisan Mg atau ZK60 karena terjadi rekristalisasi dinamis selama proses ARB.

Setelah 3 siklus ARB, ukuran butir halus rata-rata yang terbentuk pada lapisan ZK60 sebesar 2,3  $\mu\text{m}$ , dan lapisan Mg (*pure*) dengan ukuran butir besar sekitar 24  $\mu\text{m}$ . Ukuran butir yang lebih halus dari lapisan ZK60 dibandingkan dengan lapisan Mg mungkin disebabkan oleh presipitat kecil di lapisan ZK60, yang menghambat pergerakan batas butir, dan dislokasi, sehingga memfasilitasi stabilisasi ukuran butir yang lebih halus. Penguatan komposit Mg/ZK60 dapat dikaitkan dengan kontribusi kekuatan lapisan ZK60 yang kuat yang berperan sebagai penguat (*reinforcements*) dalam lembaran komposit. Selain itu, penghalusan butir dari kedua lapisan Mg (*pure*) dan ZK60 dengan peningkatan siklus ARB juga memainkan peran penting dalam penguatan, yaitu menghasilkan batas butir sebagai penghalang dislokasi.

Peningkatan kekuatan ikatan antara Mg dan ZK60 dengan meningkatkan siklus ARB juga dapat meningkatkan kuat tarik lembaran komposit Mg/ZK60. Antarmuka antara Mg dan ZK60 juga dapat menghambat dislokasi, sehingga total luas antarmuka Mg dengan ZK60, dan jarak laminasi yang lebih kecil menyebabkan kekuatan komposit Mg/ZK60 yang lebih tinggi dengan meningkatnya siklus ARB. Penurunan elongasi dengan peningkatan siklus ARB mungkin terutama disebabkan

laju pengerasan regangan yang rendah dari komposit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



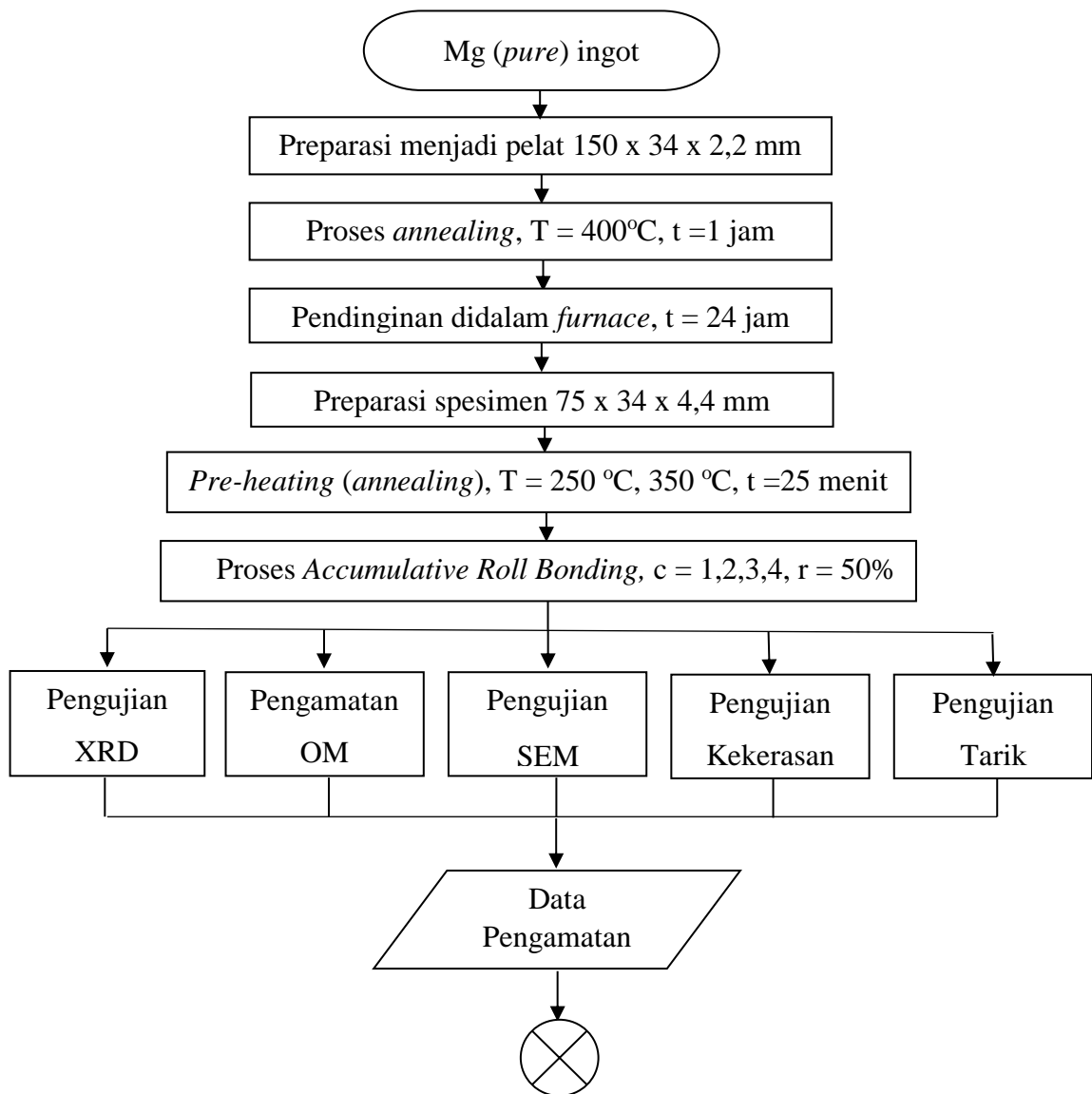
**Gambar 2.11** (a) Kurva *Stress-Strain* untuk Mg dan ZK60 *As rolled*, dan Komposit Mg/ZK60 diproses dengan ARB dengan siklus yang berbeda (Hu *et al.*, 2010)

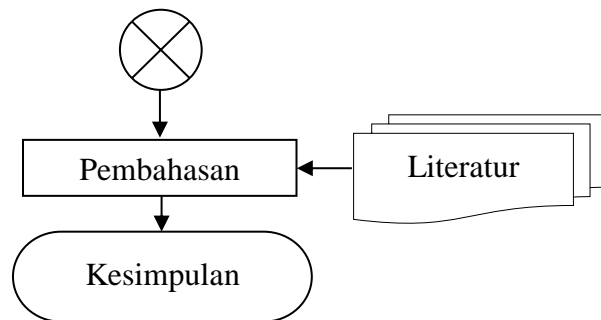
# Bab III

## Metode Penelitian

### 3.1 Diagram Alir

Berikut ini adalah diagram alir penelitian proses *Accumulative Roll Bonding* (ARB), yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.





**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Alat yang Digunakan

Berikut adalah alat-alat yang digunakan dalam penelitian :

- a) *Leybold Heraeus Muffle Furnace*
- b) Penggaris
- c) Jangka Sorong
- d) *Mini Rolling 1GW8 104*
- e) *Thermocouple Digital type k*
- f) Mesin Bor Tangan
- g) Spidol
- h) Tang Potong
- i) Tang Lancip (*long nose*)
- j) *Slim Taper*
- k) *Presi Cutting Machine*
- l) *Buehler MetaServ 250 Grinding Machine*
- m) Mesin *Polishing*
- n) *Hand Dryer*

- o) *Optical Microscope (OM)*
- p) *Shimadzu type SEL-250KNAG Tensile Testing Machine*
- q) *Mesin Uji Kekerasan Micro Vickers Hardness Tester*
- r) *PANalytical type Empyrean X-Ray Diffraction*
- s) *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)*

### **3.2.2 Bahan yang Digunakan**

Berikut adalah bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian :

- a) Sampel Mg (*pure*) ukuran 150 x 100 x 2 mm sebanyak sembilan buah.
- b) Aseton
- c) Kertas Ampelas grit 100, 320, 600, 800, 1000, dan 2000
- d) Etanol
- e) Larutan *Acetic Picral*
- f) Pasta Alumina
- g) *Tissue*
- h) Kawat tembaga diameter 0,8 mm

## **3.3 Prosedur Penelitian**

### **3.3.1 Preparasi Sampel**

Ingot Mg (*pure*) setelah dilakukan pemotongan menjadi pelat 150 x 34 x 2,2 mm, dipanaskan (*annealing*) pada temperatur 400°C (temperatur

rekristalisasi = 0,6Tm) selama 1 jam, kemudian didinginkan didalam *muffle furnace* selama 24 jam untuk mengembalikan struktur mikro yang rusak akibat deformasi yang ditimbulkan proses pemotongan. Sampel yang diperoleh berupa pelat Mg (*pure*) *as annealed*. Kemudian sampel Mg *as annealed* dipotong menjadi dua bagian untuk mendapatkan spesimen ARB, sehingga ukurannya menjadi 75 x 34 x 2,2 mm. Sedangkan untuk sistem kode sampel Mg (*pure*) dapat dilihat pada Tabel 3.1.

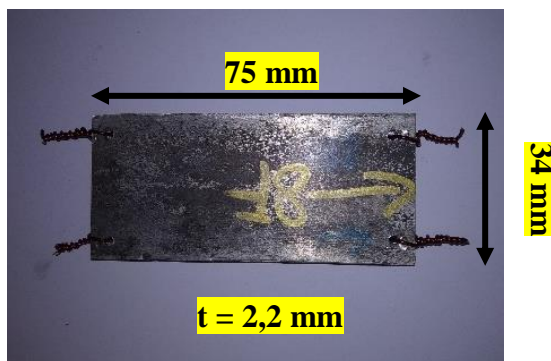
**Tabel 3.1** Sistem Kode Sampel Mg (*pure*)

Kode Sampel	Dimensi (mm)	Temperatur (°C)	Siklus	Reduksi (%)
Mg 0	75 x 34 x 2,2	400		<i>As annealed</i>
Mg 1A	75 x 34 x 2,2		1	
Mg 2A	78 x 28,7 x 2,2	250	2	
Mg 3A	153 x 32,1 x 2,1		3	
Mg 4A	152,1 x 34 x 2,05		4	50
Mg 1B	75,5 x 35 x 2,2		1	
Mg 2B	78,8 x 28,7 x 2,1	350	2	
Mg 3B	179 x 29,4 x 2,2		3	
Mg 4B	132,5 x 34,5 x 2,2		4	

### 3.3.2 Proses *Accumulative Roll Bonding* (ARB)

Permukaan pelat Mg (*pure*) dilakukan proses *grinding* dengan ampelas 100 grit pada mesin *grinding*, kemudian dibersihkan dengan aseton untuk menghilangkan kotoran. Selanjutnya, dua buah pelat direkatkan menggunakan kawat tembaga pada tepi kanan dan kiri yang sudah dilubangi dengan alat bor, dapat dilihat pada Gambar 3.2. Setelah itu, sampel

dipanaskan (*annealing*) di dalam *muffle furnace* selama 25 menit dengan variasi temperatur 250°C dan 350°C. Lalu, dilakukan pengerolan dengan kecepatan *roll* sebesar 26 putaran/menit dan beban *roll* sebesar  $\pm 10$  ton. Reduksi per siklus sebesar 50% ( $\epsilon = 0,08$ ) dan variasi siklus 1, 2, 3, dan 4.



**Gambar 3.2** Spesimen *Accumulative Roll Bonding (Stacking)*

### 3.3.3 Pengujian Metalografi (OM)

Sampel dilakukan proses *grinding* dengan kertas ampelas grit 100, 320, 600, 800, 1000, dan 2000, kemudian dilakukan *polishing* dengan pasta alumina, dan *etching* selama 3-5 detik dengan menggunakan larutan *acetic picral* (5 ml *acetic acid*, 6 g *picric acid*, 10 ml *water*, 100 ml *ethanol*) (Voort, 2008) untuk dilakukan pengamatan struktur mikro.



**Gambar 3.3** Spesimen Pengujian Metalografi



Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan perbesaran 100 pada permukaan atas sampel. Perhitungan ukuran butir menggunakan aplikasi *ImageJ*. Langkah-langkah untuk menghitung ukuran butir dengan *ImageJ*:

1. Klik *File*, pilih gambar struktur mikro yang akan diamati, kemudian klik *Open*.
2. Klik ikon *freehand lines* kemudian buat garis pada skala gambar.
3. Klik *Analyze* dan pilih *set scale* untuk melakukan kalibrasi. *Known distance* diisi dengan skala yang tertera pada gambar struktur mikro, dan *unit of length* diisi dengan satuan yang diinginkan ( $\mu\text{m}$ ).
4. Selanjutnya klik *Image* dan pilih *type 8-bit*.
5. Lalu klik *Image – Adjust – Threshold* sehingga gambar berubah menjadi hitam putih, hal ini dapat memperjelas gambar struktur mikro sehingga memudahkan analisis.
6. Perhitungan ukuran butir dilakukan dengan cara memilih ikon *freehand selection* pada *tool bar ImageJ*, kemudian klik *Analyze – Tools – ROI manager*.
7. Gambar ukuran butir pada struktur mikro menggunakan *freehand selection* kemudian klik *add* dan *measure* pada tabel *ROI manager*, sehingga muncul tabel hasil perhitungan ukuran butir.

8. Lakukan hingga 20 kali kemudian jumlahkan hasil *mean*, lalu dibagi dengan banyaknya jumlah pengukuran.

### 3.3.4 Pengujian SEM-EDS

*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS) adalah mikroskop dengan elektron sebagai sumber cahaya sehingga memiliki resolusi yang tinggi. Untuk energi elektron 20 kV resolusi yang dapat dicapai hingga 3 nm. Perbesaran maksimal untuk sampel non-konduktif maksimal 5000 kali. Pengujian SEM-EDS digunakan untuk mengetahui struktur mikro atau morfologi sampel hingga skala mikro atau nano. Kondisi sampel harus kering, stabil, dan tidak korosif. Ukuran sampel yaitu lebar 25 mm dan tebal 2,2 mm.

### 3.3.5 Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui nilai kerapatan dislokasi sampel. Ukuran yang digunakan sebagai spesimen adalah 25 x 30 x 2 mm. *Software* yang digunakan untuk menganalisa grafik uji XRD yaitu *High Score Plus* (HSP). Setelah menentukan *peak* pada grafik XRD, dapat diketahui nilai *microstructural parameters*, yaitu *crystallite size* (D) dan *microstrain* ( $\epsilon$ ).

Kerapatan dislokasi dapat dihitung dengan metode *Rietveld*, menggunakan Persamaan 2.3. Langkah-langkah untuk menghitung kerapatan dislokasi:

1. Klik *File – Open* pilih gambar hasil XRD dalam format *raw*, kemudian klik *Open*.
2. Pilih menu *Treatment – Search Peaks*, mengatur *minimum significance* menjadi 30.00, kemudian klik *search peaks* dan *accept*.
3. Pilih menu *Analysis – Search & Match – Execute Search & Match*. Kemudian atur *scoring scheme* menjadi *multi phase* pada *parameters*, lalu atur *restriction set* pada *restrictions* sesuai dengan unsur yang diinginkan, dan pilih *search*.
4. Selanjutnya pilih senyawa yang paling atas pada tabel *compound name*, pindahkan ke tabel yang berada di atasnya.
5. Klik senyawa yang sudah dipilih kemudian pilih *peak list* pada *lists pane*.
6. Masukkan lima teratas nilai FWHM Left [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ] dan nilai Pos. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ] pada tabel *Scherrer Calculator*, dengan cara klik menu *Tools – Scherrer Calculator*.
7. Isi kolom B obs. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ] dengan nilai FWHM Left [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ], kolom B std. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ] dengan nilai 0,008, dan kolom Peak pos. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ] dengan nilai Pos. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ].
8. Kemudian klik mode *Crystallite size* atau *Lattice strain*, pada tabel paling kanan nilai akan muncul. Kemudian masukkan nilai-nilai tersebut ke Persamaan 2.3

### 3.3.6 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan yang dilakukan menggunakan metode *Vickers Hardness*, pada setiap sampel sebanyak lima titik indentasi dengan pembebanan sebesar 50 N. Nilai kekerasan akhir merupakan rata-rata dari penjumlahan nilai pada lima titik yang diuji pada tiap sampel. Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh variabel penelitian terhadap kekerasan Mg. Sampel diletakkan pada mesin uji kekerasan dengan menurunkan tuas dan mendekatkan indenter bola baja ke permukaan sampel. Setelah selesai, tuas terangkat hingga ke posisi semula.

Secara konsep pengukuran, baik karena keterbatasan alat ukur maupun karena kondisi lingkungan, maka dipercaya bahwa setiap pengukuran akan menghasilkan hasil ukur yang tidak sebenarnya. Simpangan atau selisih antara hasil ukur dengan hasil yang sebenarnya disebut sebagai ralat. Karena tidak diketahui nilai yang “benar” tersebut, maka hasil ukur yang kita peroleh dinyatakan dalam bentuk interval hasil pengukuran, contohnya yaitu  $HVN = 14,8778 \pm 0.7111$ . Nilai benar pengukuran tentu saja berada di dalam rentang hasil pengukuran ini. Karena sebuah rentang nilai pengukuran sekaligus menyatakan ketidakpastian hasil ukur, maka pengertian ralat sama dengan pengertian ketidakpastian untuk menunjukkan deviasi pengukuran terhadap “nilai benar” (Pandiangan, 2014). Ketidakpastian hasil ukur dapat kita dapatkan dengan cara ralat deviasi standar (Sulaiman, 2015):

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum(HVN-HVR)^2}{n(n-1)}} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$NS = HVR \pm \gamma \dots\dots\dots(3.2)$$

$$RN = \frac{\gamma}{HVR} \times 100\% \dots\dots\dots(3.3)$$

Keterangan:

$\gamma$  = Standar deviasi

HVN = Nilai kekerasan pada titik ke-n

HVR = Nilai kekerasan rata-rata

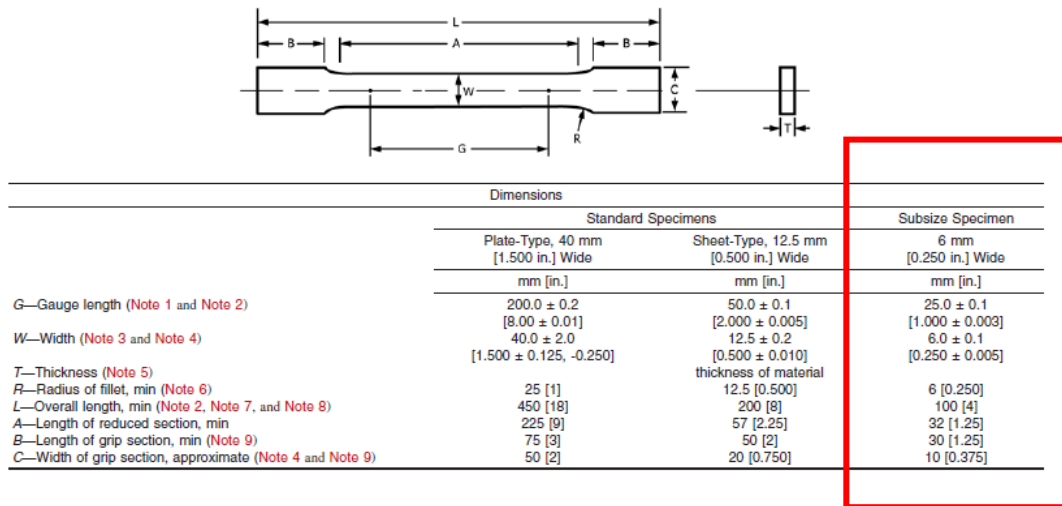
n = Jumlah titik pengujian

NS = Nilai sebenarnya

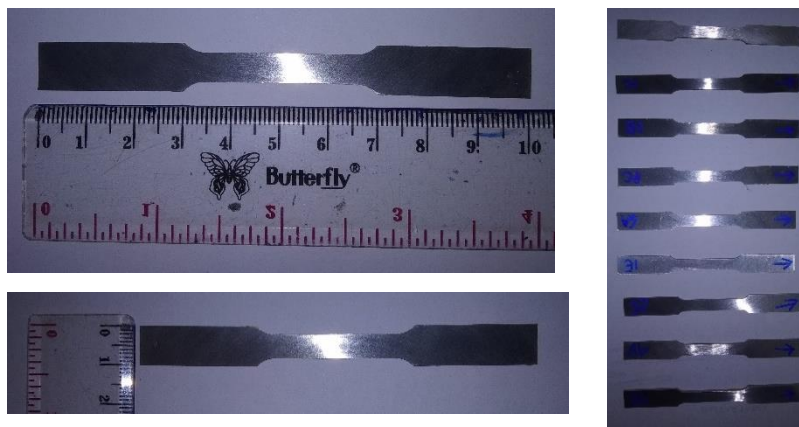
RN = Ralat Nisbih (%)

### 3.3.7 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui nilai kuat tarik, kuat luluh, dan elongasi sampel. Pengujian tarik yang dilakukan menggunakan standar ASTM E8-15a yang dapat dilihat pada Gambar 3.4, bentuk spesimen ditampilkan pada Gambar 3.5. Spesimen diletakkan diantara dua *grip* mesin uji tarik. Kemudian setelah spesimen terjepit, spesimen mendapatkan pembebanan dengan arah yang berlawanan hingga spesimen patah.



Gambar 3.4 Standar ASTM E8-15a



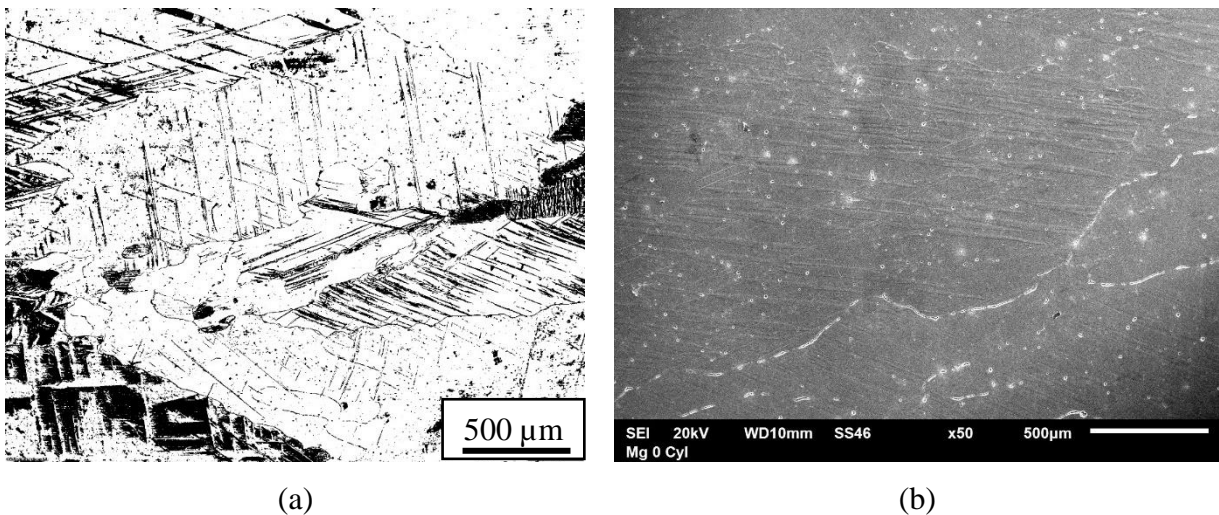
Gambar 3.5 Spesimen Uji Tarik

## Bab IV

### Hasil dan Pembahasan

#### 4.1 Karakterisasi Awal Pelat Mg (*Pure*)

Karakterisasi awal Mg (*pure*) *as annealed* meliputi pengujian metalografi, pengujian SEM, pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), pengujian kekerasan, dan pengujian tarik. Pada Gambar 4.1 (a) Hasil *optical microscope* (OM) Mg (*pure*) *as annealed* sedangkan (b) Hasil *scanning electron microscope* (SEM). Dari gambar nampak batas butir terlihat jelas dan menunjukkan struktur awal berbentuk *elongated grain* dengan ukuran butir  $145,776 \pm 18,634 \mu\text{m}$ .



**Gambar 4.1** Hasil Pengamatan Mikrostruktur Mg (*pure*) Sebelum Proses ARB: (a) OM, (b) SEM

**Tabel 4.1** Hasil Pengujian Mekanik Mg *As Annealed*

Sifat Mekanik	Hasil Pengujian
Kuat Tarik (MPa)	64,2464
Kuat Luluh (MPa)	16,0322
Max Strain (%)	11,5568
Elongasi (%)	10,2930
Kekerasan (HVN)	14,8778

Pada Tabel 4.1 menunjukkan hasil uji mekanik awal sampel Mg (*pure*) *as annealed*. Baik kuat tarik, kuat luluh, dan elongasi dari Mg (*pure*) *as annealed* belum memenuhi kriteria implan maksilofasial. Pada Tabel 4.2 menampilkan komposisi Mg (*pure*) *as annealed* hasil pengujian SEM-EDS.

**Tabel 4.2** Komposisi Mg (*pure*) Hasil Pengujian SEM-EDS

Unsur	Mg	Si	Cu
<b>Kadar (Mass%)</b>	99,77	0,18	0,05

#### 4.2 Hasil Pengamatan Mikrostruktur

Pengamatan struktur mikro pada sampel adalah untuk mengetahui ukuran butir sebelum dan sesudah dilakukan proses ARB. Tabel 4.3 menunjukkan data ukuran butir rata-rata Mg (*pure*) sebelum dan sesudah dilakukannya proses ARB, perhitungan ini menggunakan aplikasi *Image J*. Hasil perhitungan ukuran butir menunjukkan bahwa terjadi penurunan ukuran butir sebelum dan sesudah dilakukan proses ARB. Ukuran butir sebelum dilakukan proses ARB (Mg 0) yaitu sebesar  $145,776 \pm 18,634 \mu\text{m}$ , penurunan ukuran butir setelah siklus ke 1 proses ARB terlihat signifikan, pada Mg 1A ( $T = 250^\circ\text{C}$ ,  $c = 1$ ) sebesar  $20,757 \pm 12,811 \mu\text{m}$ ,



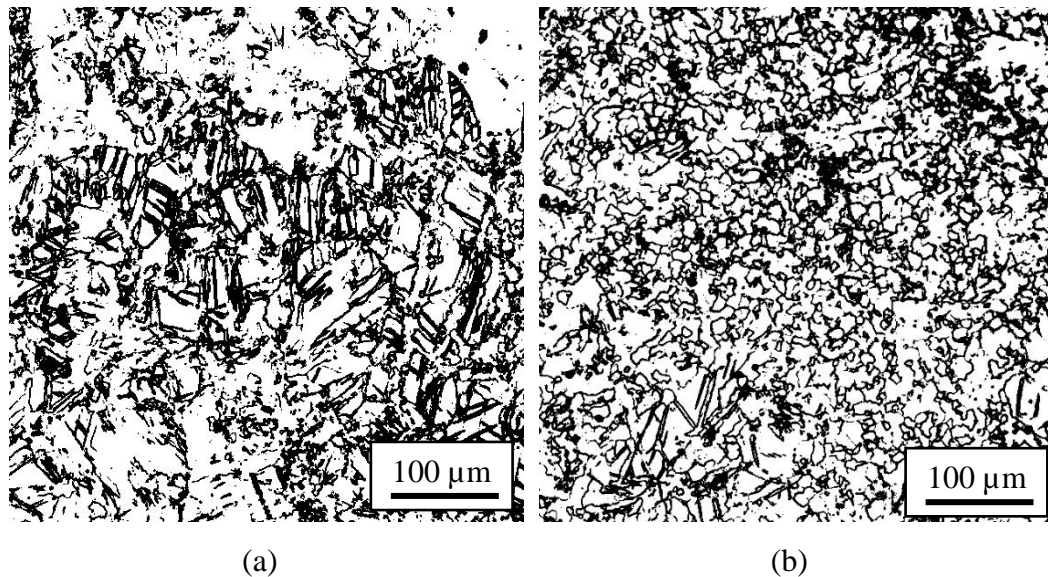
sedangkan ukuran butir setelah proses ARB pada Mg 1B ( $T = 350^{\circ}\text{C}$ ,  $c = 1$ ) sebesar  $27,088 \pm 14,991 \mu\text{m}$ . Hal ini terjadi karena adanya deformasi plastis yang diberikan, sehingga butiran yang tadinya berukuran besar menjadi pecah dan berukuran lebih kecil.

**Tabel 4.3** Hasil Perhitungan Ukuran Butir Rata-rata Mg (*pure*) Sebelum dan Sesudah Proses ARB

<b>Kode Sampel</b>	<b>Ukuran Butir Rata-rata (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Mg 0	$145,776 \pm 18,634$
Mg 1A	$20,757 \pm 12,811$
Mg 2A	$13,104 \pm 5,859$
Mg 3A	$7,631 \pm 1,414$
Mg 4A	$8,521 \pm 2,254$
Mg 1B	$27,088 \pm 14,991$
Mg 2B	$19,949 \pm 9,737$
Mg 3B	$9,417 \pm 2,152$
Mg 4B	$11,128 \pm 3,512$

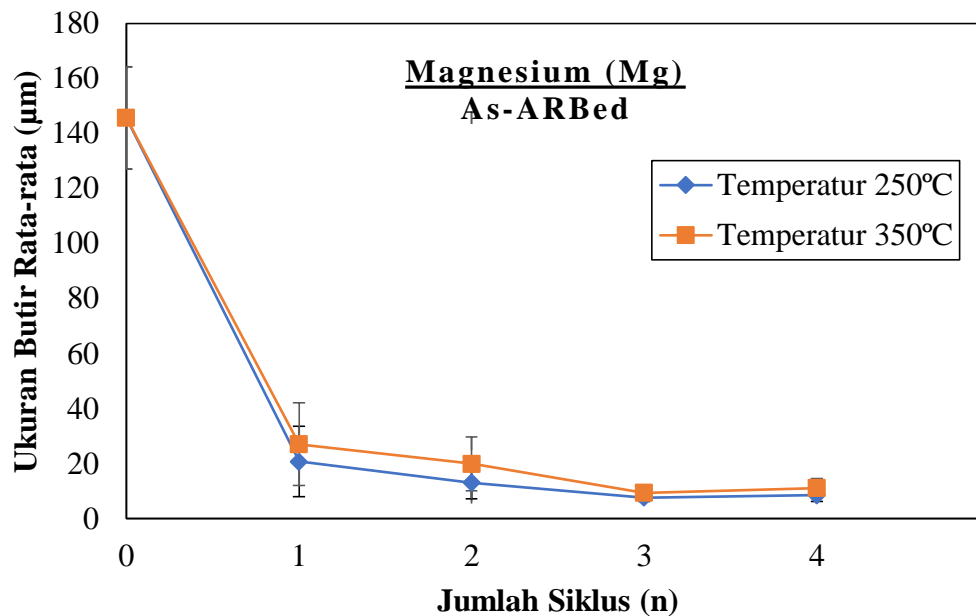
Pada Gambar 4.2 menunjukkan perbedaan ukuran butir setelah siklus ke 1, pengaruh dari temperatur *annealing*, dimana pada temperatur  $350^{\circ}\text{C}$  butiran yang dihasilkan didominasi berbentuk menyerupai bulat (*equiaxial*) sedangkan pada temperatur  $250^{\circ}\text{C}$  didominasi butiran berbentuk memanjang (*elongated*). Gambar 4.3 menunjukkan grafik pengaruh jumlah siklus ARB terhadap ukuran butir rata-rata Mg (*pure*). Dari grafik tersebut, terlihat bahwa ukuran butir lebih kecil dihasilkan pada temperatur  $250^{\circ}\text{C}$  dibandingkan dengan temperatur  $350^{\circ}\text{C}$ . Hal ini sesuai dengan penelitian Gruber *et al.* (2008), yang menyatakan bahwa butiran Mg tumbuh dengan cepat ketika temperatur ARB lebih tinggi dari  $0,5 T_m$ , sehingga ukuran butir yang diperoleh pada temperatur  $350^{\circ}\text{C}$  lebih besar dibandingkan pada

temperatur 250°C, hal ini karena butiran yang terdistorsi secara cepat mengalami pengurangan regangan.



**Gambar 4.2** Perubahan Struktur Mikro Mg (*pure*) Setelah 1 Siklus ARB: (a) Temperatur 250°C, dan (b) Temperatur 350°C

Ukuran butir rata-rata terkecil pada temperatur 250°C yaitu di siklus ke 3, diperoleh sebesar  $7,631 \pm 1,414 \mu\text{m}$ , dan ukuran butir rata-rata terbesar pada siklus ke 1, sebesar  $20,757 \pm 12,811 \mu\text{m}$ . Sementara pada temperatur 350°C, ukuran butir rata-rata terkecil sebesar  $9,417 \pm 2,152 \mu\text{m}$  di siklus ke 3, dan ukuran butir rata-rata terbesarnya di siklus ke 1, sebesar  $27,088 \pm 14,991 \mu\text{m}$ . Seperti yang terlihat pada grafik, tidak terjadi penurunan ukuran butir setelah melalui siklus ke 3, hal ini sesuai dengan pernyataan Yi *et al.* (2009) bahwa *annealing* menengah dari lembaran Mg (*pure*) selama *hot rolling* dapat menyebabkan butiran terekristalisasi penuh dan sebagian besar butiran tumbuh, sehingga untuk proses *rolling* selanjutnya tidak menghasilkan perubahan ukuran butir yang signifikan.

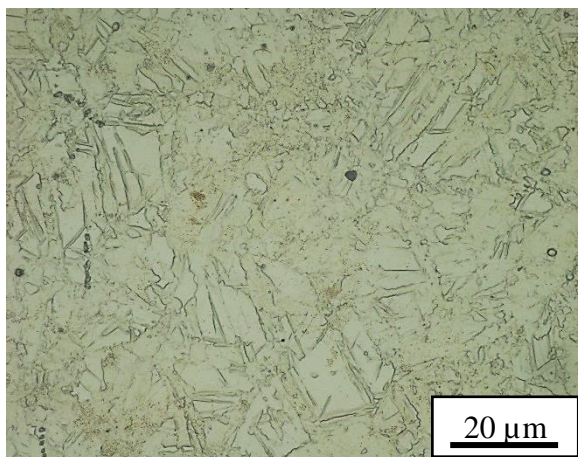


**Gambar 4.3** Grafik Pengaruh Jumlah Siklus ARB Terhadap Ukuran Butir Mg (*pure*)

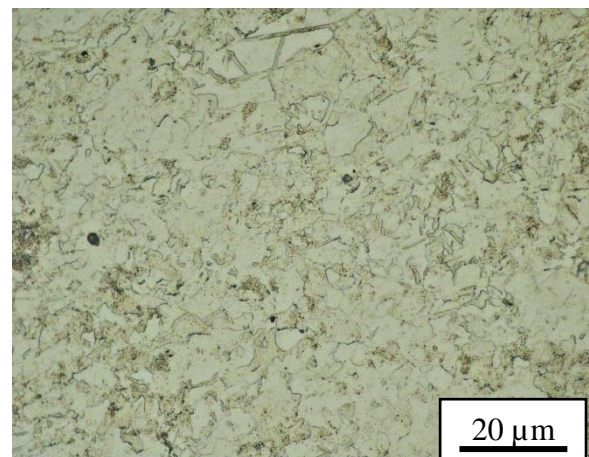
Walaupun proses ARB ini menghasilkan ukuran butir mencapai  $<10 \mu\text{m}$ , yaitu ukuran untuk kategori mikrostruktur UFG, namun butirannya masih belum seragam dan kasar di setiap siklus baik pada temperatur  $250^\circ\text{C}$  maupun temperatur  $350^\circ\text{C}$ . Hal tersebut dapat dilihat dari hasil pengamatan metalografi Mg (*pure*) dengan mikroskop optik di setiap siklus proses ARB pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 hasil pengamatan SEM. Hal tersebut dapat disebabkan oleh beberapa hal, diantaranya terjadi deformasi yang tidak homogen, hal ini karena adanya perbedaan gesekan (*frictional*) antara sampel dengan alat *rolling*, dan kecepatan alat *rolling* yang tidak optimal, sehingga menyebabkan penghalusan ukuran butir tidak homogen. (Pramono, Alhamidi and Fadila, 2018).

Menurut penelitian Edalati *et al.*, (2011) ukuran butir UFG rata-rata Mg (*pure*) yang dicapai pada kondisi optimum adalah sebesar  $\leq 1 \mu\text{m}$ , dengan

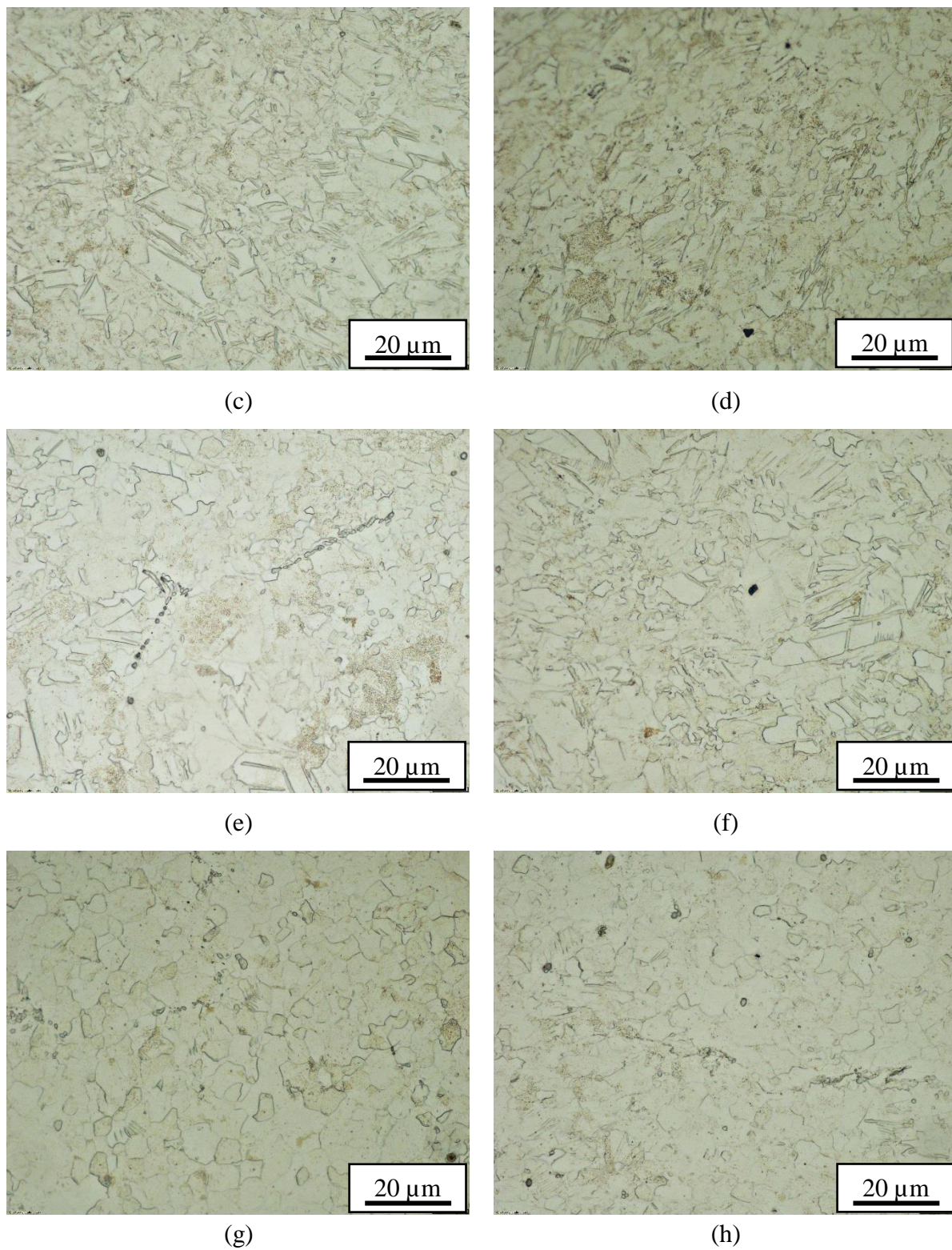
mikrostruktur berbentuk bimodal. Mikrostruktur bimodal pada kondisi stabil mengandung butiran submikrometer dan ukuran mikrometer. Penelitian tersebut menggunakan proses *high-pressure torsion* (HPT). Sedangkan, pada penelitian ini ukuran butir rata-rata terkecil diperoleh sebesar  $7,631 \pm 1,414 \mu\text{m}$ . Hal ini kemungkinan disebabkan nilai *equivalent strain* ( $\epsilon$ ) atau regangan yang dihasilkan pada HPT lebih besar daripada proses ARB. Untuk dapat mencapai butir yang optimum dapat ditambahkan elemen paduan seperti zirconium (Zr). Zr dikenal sebagai penghalus butir (*grain refiner*) yang sangat baik untuk Mg dan paduannya. Pada diagram fasa biner Mg-Zr menunjukkan bahwa penghalusan butir Mg dapat terjadi secara teori dengan reaksi peritektik pada  $654^\circ\text{C}$ , yaitu  $\alpha\text{-Zr}$  bereaksi dengan *liquid* dan membentuk fasa  $\alpha\text{-Mg}$ , dimana kelarutan maksimum Zr sebesar 0.5 wt% pada  $654^\circ\text{C}$  (Sasha and Viswanathan, 2014).



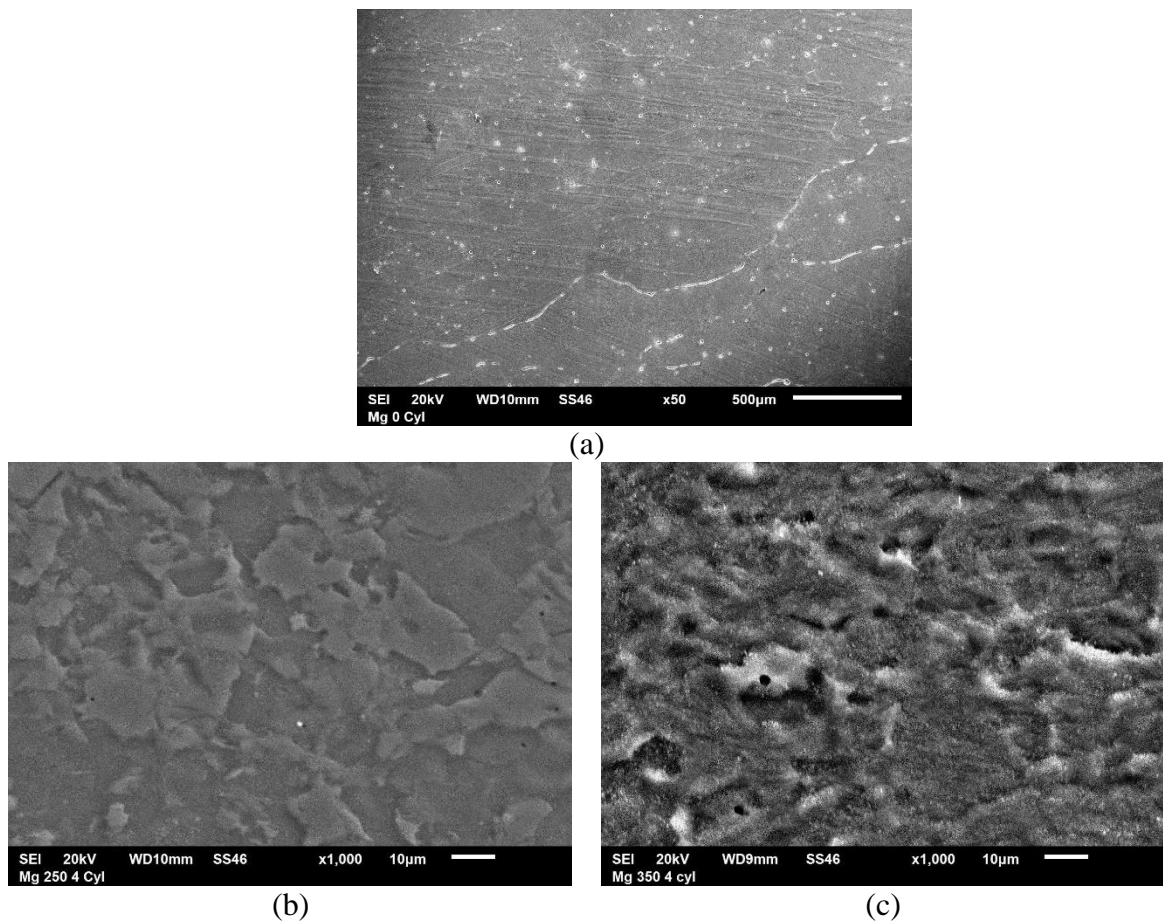
(a)



(b)



**Gambar 4.4** Struktur Mikro Mg (*pure*) Setelah Proses ARB Perbesaran 50X dengan OM: (a) 250°C siklus 1, (b) 250°C siklus 2, (c) 250°C siklus 3, (d) 250°C siklus 4, (e) 350°C siklus 1, (f) 350°C siklus 2, (g) 350°C siklus 3, dan (h) 350°C siklus 4



**Gambar 4.5** Struktur Mikro *Mg (pure)* Setelah Proses ARB dengan SEM: (a) Mg 0 (50X), (b) 250°C siklus 4 (1000X), (c) 350°C siklus 4 (1000X)

### 4.3 Hasil Pengujian *X-Ray Diffraction (XRD)*

Grafik XRD dianalisa menggunakan *software High Score Plus (HSP)*. Dari hasil analisa XRD, diperoleh nilai *crystallite size* dan *microstrain* yang dapat digunakan untuk menghitung kerapatan dislokasi dari *Mg (pure)*. Kerapatan dislokasi dihitung menggunakan Persamaan 2.3. Tabel 4.4 menunjukkan nilai kerapatan dislokasi *Mg (pure)* sebelum dan sesudah proses ARB. Pada Tabel 4.4 terjadi peningkatan nilai kerapatan dislokasi setelah siklus 1, baik pada temperatur 250°C maupun 350°C. Kerapatan dislokasi *Mg (pure)* sebelum dilakukan proses ARB (*Mg 0*) sebesar  $0,9532 \times 10^{12}/\text{mm}^2$ , peningkatan kerapatan dislokasi setelah

siklus ke 1 proses ARB pun terlihat signifikan, pada Mg 1A ( $T = 250^{\circ}\text{C}$ ,  $c = 1$ ) sebesar  $1,1467 \times 10^{12}/\text{mm}^2$ , sedangkan kerapatan dislokasi setelah proses ARB pada Mg 1B ( $T = 350^{\circ}\text{C}$ ,  $c = 1$ ) sebesar  $1,0585 \times 10^{12}/\text{mm}^2$ .

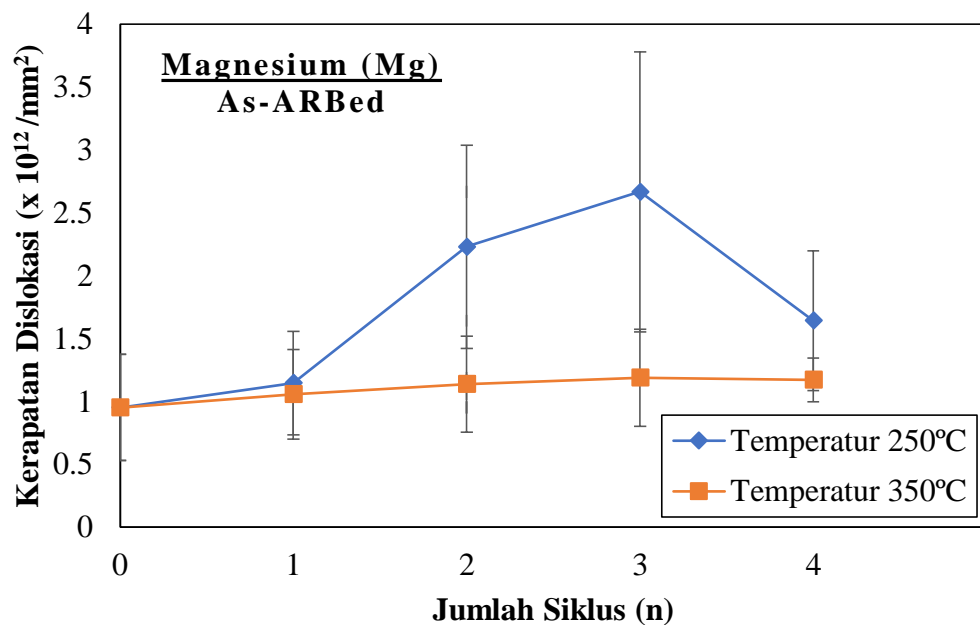
**Tabel 4.4** Nilai Kerapatan Dislokasi Mg (*pure*) Sebelum dan Sesudah Proses ARB

Kode Sampel	Kerapatan Dislokasi ( $\times 10^{12}/\text{mm}^2$ )
Mg 0	$0,9532 \pm 0,4224$
Mg 1A	$1,1467 \pm 0,4101$
Mg 2A	$2,2304 \pm 0,8084$
Mg 3A	$2,6684 \pm 1,1134$
Mg 4A	$1,6430 \pm 0,5564$
Mg 1B	$1,0585 \pm 0,4224$
Mg 2B	$1,1396 \pm 0,3566$
Mg 3B	$1,1892 \pm 0,382$
Mg 4B	$1,1720 \pm 0,1743$

Pada Gambar 4.6 terlihat jelas bahwa dengan kenaikan jumlah siklus ARB, kerapatan dislokasi mengalami peningkatan. Peningkatan kerapatan dislokasi dari siklus 1 hingga 3 ini adalah hasil dari mekanisme pengerasan regangan, yang membuat dislokasi bergerak dan mengalami penumpukan dislokasi pada Mg (*pure*). Akumulasi regangan yang meningkat seiring kenaikan siklus mengakibatkan pecahnya butiran menjadi semakin kecil atau halus. Semakin kecil atau halusnya ukuran butir maka semakin banyak batas butir yang terbentuk, banyaknya batas butir akan menghalangi pergerakan dislokasi, akibatnya pergerakan dislokasi menjadi kecil, sehingga kerapatan dislokasinya pun meningkat (Callister and Wiley, 2007).

Terdapat dua mekanisme pergerakan dislokasi, yaitu *cross-slip* dan *climb*. Faktor pengendali *cross-slip* adalah *stacking fault energy* (SFE) serta temperatur

homolog, sedangkan faktor pengendali *climb* adalah *lattice self-diffusion* dan temperatur homolog. Pada logam HCP seperti Mg, sulit untuk terjadi *cross-slip* karena anisotropi kristalografi dan terbatasnya jumlah sistem *slip*. Karena itu, mekanisme *climb* adalah mekanisme utama untuk proses pelunakan (*softening*) pada Mg yang telah mengalami pengerasan regangan, yang sebagian besar dikendalikan oleh temperatur homolog (0,32). Sehubungan dengan sedikitnya dislokasi yang terjadi dalam butiran Mg yg berukuran mikrometer, adalah kaitannya dengan proses rekristalisasi. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa penurunan kekerasan pada regangan yg besar, disebabkan oleh rekristalisasi karena temperatur leleh yang relatif rendah pada Mg. (Edalati and Horita, 2011)



**Gambar 4.6** Grafik Pengaruh Jumlah Siklus terhadap Kerapatan Dislokasi



#### 4.4 Hasil Uji Kekerasan

Dari hasil pengujian kekerasan *Vickers*, terlihat perbedaan nilai kekerasan akibat pengaruh dari temperatur *annealing* dan jumlah siklus *accumulative roll bonding* (ARB). Tabel 4.5 menunjukkan hasil dari pengujian kekerasan.

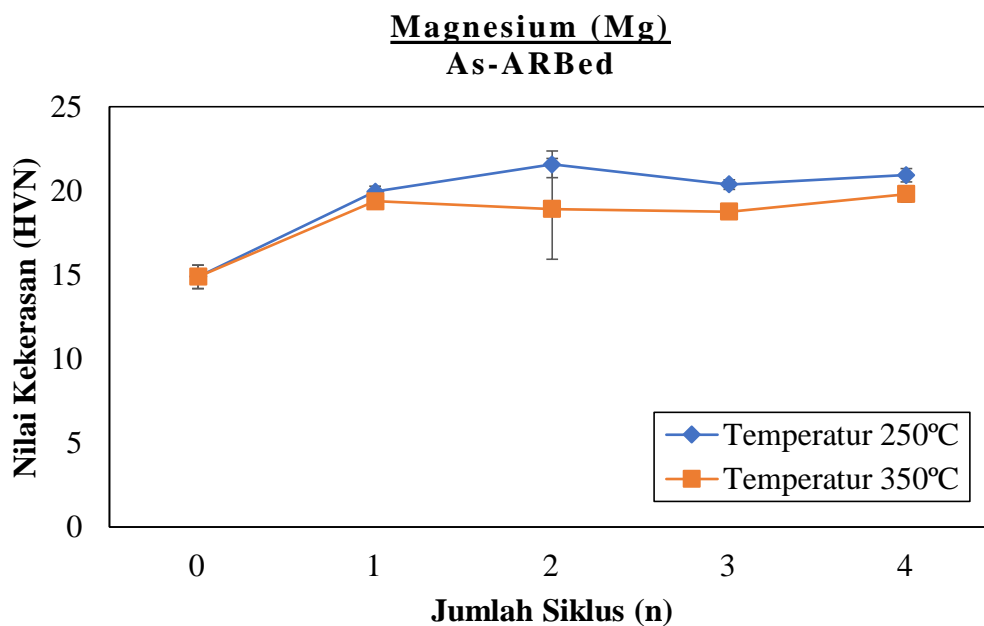
**Tabel 4.5** Data Nilai Kekerasan Mg (*pure*) Sebelum dan Sesudah Proses *Accumulative Roll Bonding* (ARB)

Kode Sampel	Kekerasan (HVN)
Mg 0	14,8778 ± 0,7111
Mg 1A	19,9383 ± 0,3302
Mg 2A	21,5612 ± 0,7893
Mg 3A	20,3683 ± 0,2862
Mg 4A	20,91801 ± 0,3870
Mg 1B	19,3664 ± 0,4106
Mg 2B	18,9134 ± 3,0004
Mg 3B	18,7498 ± 0,3671
Mg 4B	19,8008 ± 0,4716

Hasil uji kekerasan pada Tabel 4.5 menunjukkan bahwa terjadi kenaikan nilai kekerasan sebelum dan sesudah dilakukan proses ARB. Nilai kekerasan Mg (*pure*) sebelum dilakukan proses ARB (Mg 0) adalah sebesar 14,8778 ± 0.7111 HVN, sedangkan nilai kekerasan setelah proses ARB pada Mg 1A (T = 250°C, c = 1) sebesar 19,9383 ± 0,3302 HVN, dan nilai kekerasan setelah proses ARB pada Mg 1B (T = 350°C, c = 1) sebesar 19,3664 ± 0,4106 HVN. Peningkatan nilai kekerasan sebelum dan sesudah proses ARB ini pun terjadi akibat deformasi plastis yang diterapkan, sehingga terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*) yang mengakibatkan distorsi pada kisi. Mekanisme pengerasan regangan membuat dislokasi bergerak dan mengalami penumpukan dislokasi pada Mg (*pure*). Pada

dasarnya proses ARB menerapkan dua mekanisme penguatan logam, yaitu pengerasan regangan dan penghalusan butir (Pramono, Alhamidi and Fadila, 2018).

Perbedaan temperatur *annealing* dan jumlah siklus yang diterapkan juga mempengaruhi nilai kekerasannya. Pada temperatur 250°C, nilai kekerasan tertinggi yaitu pada siklus ke-2 (Mg 2A) sebesar  $21,5612 \pm 0,7893$  HVN. Sedangkan pada temperatur 350°C, nilai kekerasan tertinggi pada siklus ke-1 (Mg 1B), sebesar  $19,3664 \pm 0,4106$  HVN. Namun jika dibandingkan secara keseluruhan, nilai kekerasan pada temperatur 250°C untuk semua siklus lebih besar daripada nilai kekerasan pada temperatur 350°C. Hal ini disebabkan semakin tingginya temperatur *annealing* yang digunakan, akan menyebabkan ukuran butir lebih besar sehingga menyebabkan kerapatan antar butir berkurang yang diikuti dengan menurunnya kekerasan dan kekuatan (Mechanics *et al.*, 2015).



**Gambar 4.7** Grafik Pengaruh Temperatur dan Siklus ARB Terhadap Nilai Kekerasan Mg (*pure*)

Pada Gambar 4.7, nilai kekerasan pada temperatur 250°C maupun 350°C mengalami peningkatan dan penurunan seiring bertambahnya siklus ARB. Menurut Haribabu, *et al.* (2018), seharusnya nilai kekerasan meningkat seiring bertambahnya jumlah siklus, hal ini disebabkan semakin banyaknya siklus yang diterapkan, akumulasi regangan pun semakin meningkat sehingga mengakibatkan pecahnya butiran menjadi semakin kecil atau halus. Semakin kecil atau halusnya ukuran butir maka semakin banyak batas butir yang terbentuk, banyaknya batas butir akan menghalangi pergerakan dislokasi, akibatnya pergerakan dislokasi menjadi kecil dan mengubah arah orientasi dislokasi. Hal ini menyebabkan kekuatan dan kekerasan Mg meningkat (Callister and Wiley, 2007). Namun perilaku kekerasan pada Mg (*pure*) berbeda dari logam lainnya. Pada kebanyakan logam, tingkat optimum dicapai secara langsung setelah kenaikan awal regangan. Pada Mg (*pure*) dengan tingkat kemurnian 99,9%, kekerasan awalnya meningkat dengan meningkatnya regangan dan setelah mencapai maksimum, menurun ke tingkat yang konstan. (Edalati and Horita, 2011)

#### **4.5 Hasil Uji Tarik**

Spesimen hasil pengujian tarik dapat dilihat pada Gambar 4.8. Perbedaan yang sangat signifikan antara sampel sebelum dan sesudah proses ARB, yaitu meningkatnya kekuatan dan rendahnya elongasi, hal ini merupakan ciri khas bahan UFG yang diproses ARB, yang ditampilkan pada Tabel 4.6. Berkurangnya keuletan sampel yang sudah di proses ARB, disebabkan pengerasan regangan yang menghambat mobilitas dislokasi (Gashti *et al.*, 2016). Nilai kekuatan Mg (*pure*)

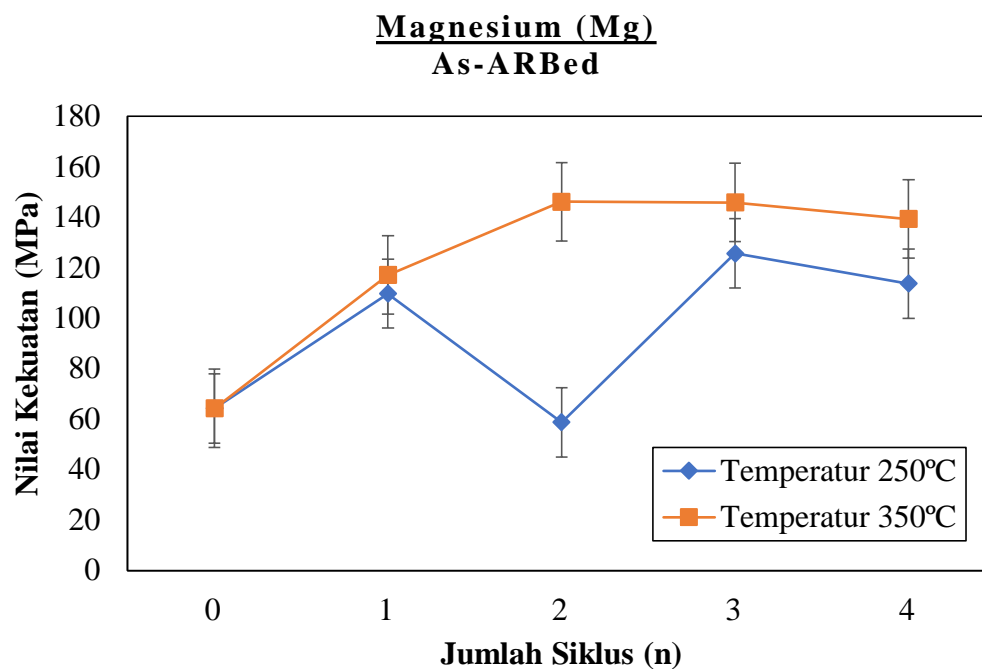
sebelum dilakukan ARB (Mg 0) adalah sebesar 64,2464 MPa, sedangkan nilai kekuatan setelah proses ARB pada Mg 1A ( $T = 250^{\circ}\text{C}$ ,  $c = 1$ ) sebesar 109,705 MPa, dan nilai kekuatan setelah proses ARB pada Mg 1B ( $T = 350^{\circ}\text{C}$ ,  $c = 1$ ) sebesar 117,105 MPa. Peningkatan nilai kekuatan sebelum dan sesudah proses ARB ini terjadi akibat dua mekanisme penguatan logam dalam proses ARB, yaitu pengerasan regangan dan penghalusan butir oleh dislokasi (Gashti *et al.*, 2016).



**Gambar 4.8** Penampakan Sampel Setelah Dilakukan Pengujian Tarik

**Tabel 4.6** Data Hasil Uji Tarik Mg (*pure*) Sebelum dan Sesudah Proses *Accumulative Roll Bonding* (ARB)

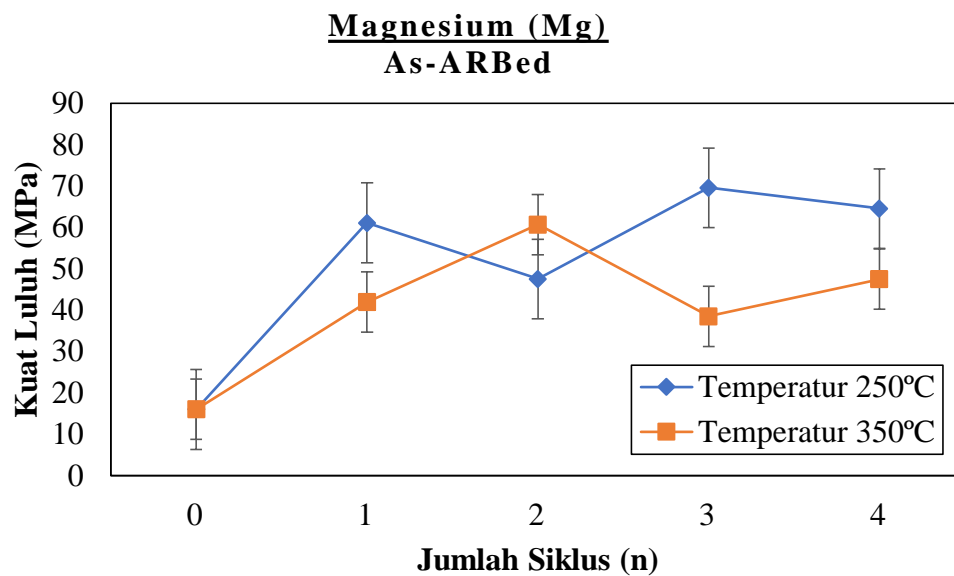
Kode Sampel	<i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa)	<i>Yield Strength</i> (MPa)	Elongasi (%)
Mg 0	64,2464	16,0322	10,2930
Mg 1A	109,705	61,1185	0,7194
Mg 2A	58,7189	47,5377	0,9167
Mg 3A	125,615	69,5896	1,4434
Mg 4A	113,655	64,5596	3,41092
Mg 1B	117,105	41,9299	2,3923
Mg 2B	146,144	60,7117	3,5885
Mg 3B	145,857	38,5454	6,1679
Mg 4B	139,315	47,4731	6,2230



**Gambar 4.9** Grafik Pengaruh Jumlah Siklus ARB Terhadap Kekuatan Mg (*pure*)

Terlihat pada grafik pengaruh jumlah siklus ARB terhadap kekuatan Mg (*pure*) (Gambar 4.9), terjadi penurunan nilai kekuatan yang sangat besar dari siklus 1 ke siklus 2 pada temperatur 250°C, hal ini disebabkan proses laminasi antar permukaan pelat (*interface bonding*) pada sampel Mg 2A tidak sempurna, sehingga mempengaruhi nilai kekuatannya. Hal ini mungkin disebabkan karena adanya *impurities* atau kotoran yang masih berada pada permukaan pelat atau antar pelat akibat dari proses pembersihan yang tidak baik. Sedangkan grafik pengaruh jumlah siklus ARB terhadap kuat luluh Mg (*pure*) pada Gambar 4.10, terlihat bahwa nilai kuat luluh tidak mencapai kriteria implan maksilofasial, yaitu 104 – 121 MPa. Kekuatan luluh dan kekuatan tarik dapat meningkat secara signifikan dengan penambahan elemen seperti *zinc* (Zn). Elemen paduan ini menyediakan partikel

fase kedua, atau presipitat, yang meningkatkan kekuatan serta memperlambat rekristalisasi, pertumbuhan butir, dan proses *creep* (ASM International, 2008).



**Gambar 4.10** Grafik Pengaruh Jumlah Siklus ARB terhadap Kuat Luluh

Kurva *engineering stress-strain* Mg (*pure*) pada Gambar 4.11, dan 4.12 adalah hasil perhitungan dari *engineering stress* ( $\sigma_{eng}$ ) dan *engineering strain* ( $\epsilon_{eng}$ ), yang dirumuskan pada persamaan berikut (Bailey *et al.*, 2000):

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\epsilon_{eng} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \dots\dots\dots(4.2)$$

Dimana:

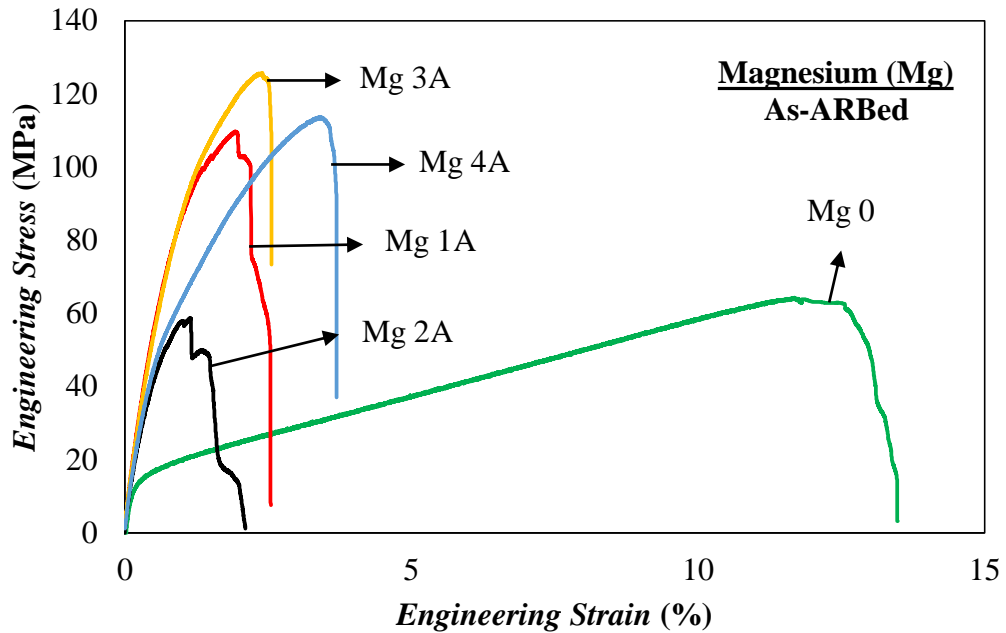
$\sigma_{eng}$  = *Engineering stress* (MPa)

$\epsilon_{eng}$  = *Engineering strain* (MPa)

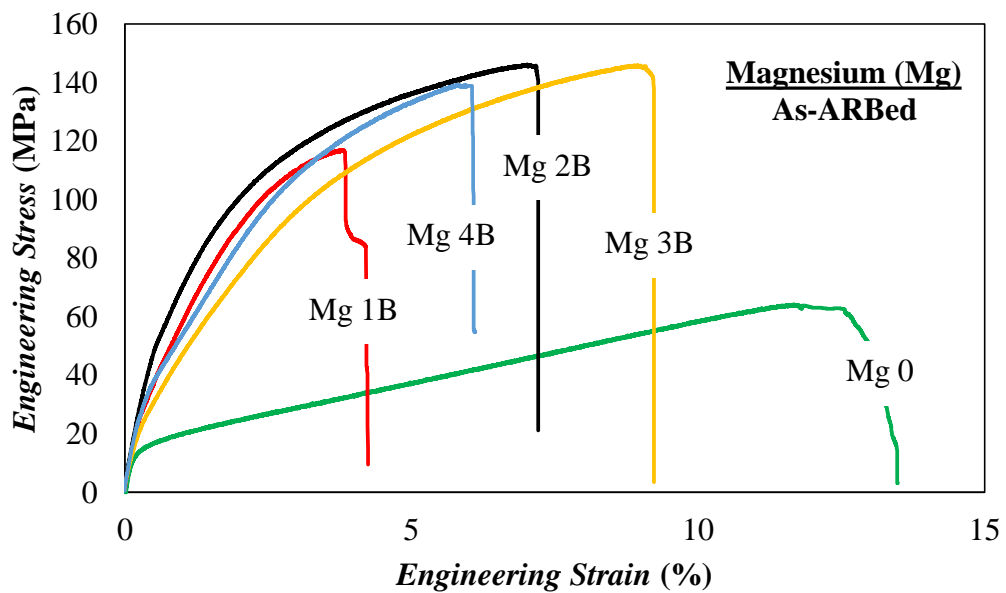
F = Gaya (N)

l = Panjang setelah diberi gaya (mm)

$A_0$  = Luas permukaan awal ( $\text{mm}^2$ )       $l_0$  = Panjang mula-mula (mm)



**Gambar 4.11** Kurva *Engineering Stress-Strain* Temperatur 250°C



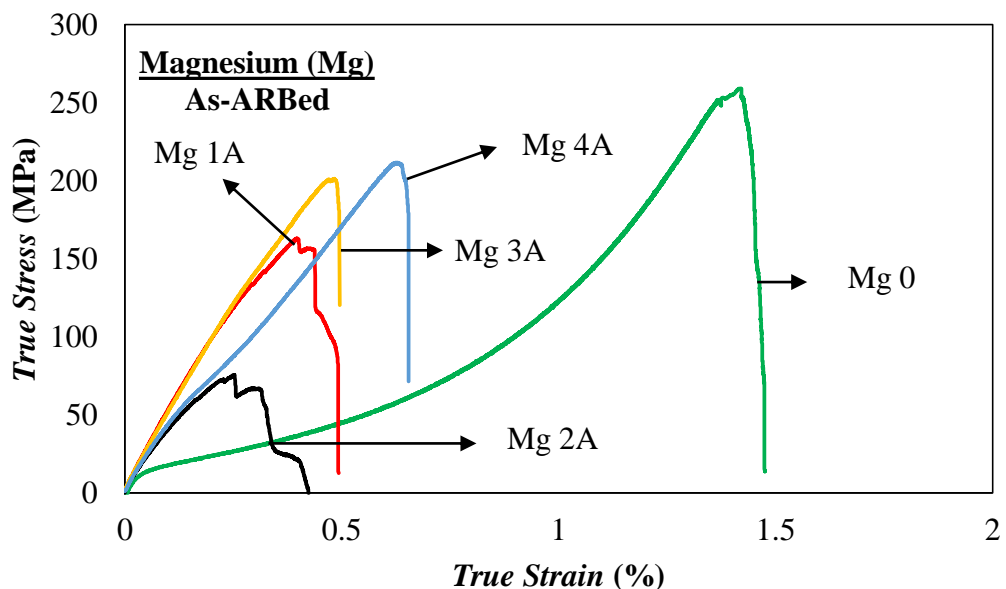
**Gambar 4.12** Kurva *Engineering Stress-Strain* Temperatur 350°C

Kuat tarik tertinggi (UTS) pada temperatur 250°C diperoleh di siklus ke 3 sebesar 125,615 MPa, dan pada temperatur 350°C yaitu di siklus ke 2, sebesar 146,144 MPa. Kurva *true stress-strain* Mg (*pure*) pada Gambar 4.13, dan 4.14 diperoleh dari konversi kurva *engineering stress-strain*, melalui persamaan berikut (Bailey *et al.*, 2000):

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{eng}} (1 + \epsilon_{\text{eng}}) \dots \dots \dots (4.3)$$

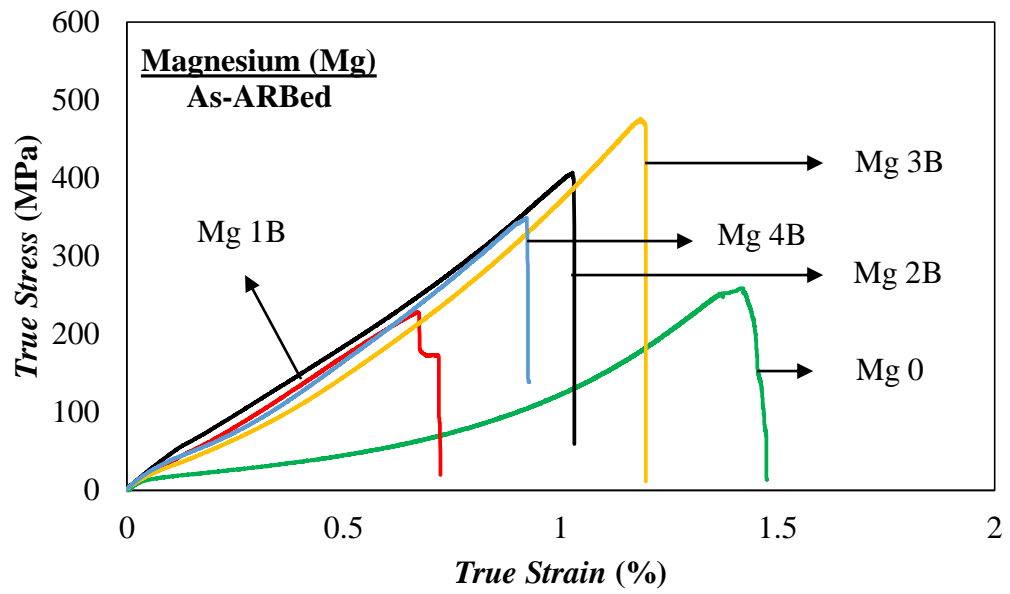
$$\epsilon_{\text{true}} = \ln (1 + \epsilon_{\text{eng}}) \dots \dots \dots (4.4)$$

Menurut penelitian lain, peran pengerasan regangan atau penguatan dislokasi dalam peningkatan kekuatan lebih jelas pada tahap awal proses ARB, tetapi pada siklus ARB yang lebih tinggi, peningkatan kekuatan sebagian besar disebabkan oleh penghalusan butir, dimana peran pengerasan regangan menjadi kurang efektif (Gashti *et al.*, 2016).



**Gambar 4.13** Kurva *True Stress-Strain* Temperatur 250°C





**Gambar 4.14** Kurva *True Stress-Strain* Temperatur 350°C

## Bab V

### Kesimpulan dan Saran

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisa pada penelitian ini, kesimpulan yang didapat antara lain:

1. Ukuran butir rata-rata terkecil dihasilkan oleh sampel Mg 3A sebesar  $7,631 \pm 1,414 \mu\text{m}$ , dengan nilai kerapatan dislokasi paling tinggi sebesar  $2,6684 \times 10^{12}/\text{mm}^2$ .
2. Kekerasan tertinggi yaitu pada sampel Mg 2A, sebesar  $21,5612 \pm 0,7893$  HVN. Sedangkan kekuatan tertinggi yaitu pada sampel Mg 2B, sebesar 146,144 MPa.
3. Temperatur *annealing* optimal pada penelitian proses ARB ini yaitu pada  $350^\circ\text{C}$ , untuk menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi.
4. Jumlah siklus optimal pada penelitian ini untuk menghasilkan sifat mekanik yang baik yaitu hingga siklus ke 3.

#### 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Melakukan pengamatan pada permukaan antar pelat untuk mengetahui adanya *missing line*, sebagai parameter proses penyatuan (laminasi) antar pelat yang sempurna (kuat).

2. Menambahkan variasi arah, kecepatan *rolling*, dan besar reduksi, untuk membandingkan sifat mekanik yang dihasilkan.
3. Menambahkan paduan seperti *zinc* dan *zirconium* untuk meningkatkan sifat mekanisnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, S. *et al.* (2016) *Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications*, *Materials Science and Engineering C*. Elsevier B.V., 68, pp. 948–963. doi: 10.1016/j.msec.2016.06.020.
- ASM International (2008) *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. Edited by F. C. Campbell. Ohio, USA: ASM International. doi: 10.1361/emea2008p003.
- Azushima, A. *et al.* (2008) *Severe plastic deformation (SPD) processes for metals*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(2), pp. 716–735. doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.005.
- Badeges, A. (2012) *Analisis Proses Biodegradasi Magnesium Melalui Proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP) Dalam Cairan Fisiologis (In Vitro)*. Universitas Indonesia.
- Bailey, J. A. *et al.* (2000) *ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*. 8th edn. ASM International.
- Bergmann, C. P. and Stumpf, A. (2013) *Dental ceramics: Microstructure, properties and degradation*, *Dental Ceramics: Microstructure, Properties and Degradation*. doi: 10.1007/978-3-642-38224-6.
- Callister, W. D. and Wiley, J. (2007) *Materials Science*.
- Chang, H. *et al.* (2010) *Microstructure and mechanical properties of the*

- accumulative roll bonded (ARBed) pure magnesium sheet, Materials Science and Engineering A*, 527(27–28), pp. 7176–7183. doi: 10.1016/j.msea.2010.07.065.
- Charyeva, O. *et al.* (2015) *Histological Comparison of New Biodegradable Magnesium- Based Implants for Maxillofacial Applications*. Giessen. doi: 10.1007/s12663-015-0743-z.
- Chen, K., Dai, J. and Zhang, X. (2015) *Improvement of corrosion resistance of magnesium alloys for biomedical applications, Corrosion Reviews*, 33(3–4). doi: 10.1515/correv-2015-0007.
- Chen, Y. *et al.* (2014) *Recent advances on the development of magnesium alloys for biodegradable implants, Acta Biomaterialia*. Acta Materialia Inc., 10(11), pp. 4561–4573. doi: 10.1016/j.actbio.2014.07.005.
- Edalati, K. *et al.* (2011) *High-pressure torsion of pure magnesium : Evolution of mechanical properties , microstructures and hydrogen storage capacity with equivalent strain, Scripta Materialia*, 64(September 2018), pp. 880–883. doi: 10.1016/j.scriptamat.2011.01.023.
- Edalati, K. and Horita, Z. (2011) *Significance of homologous temperatur in softening behavior and grain size of pure metals processed by high-pressure torsion, Materials Science & Engineering A*. Elsevier B.V., 528(25–26), pp. 7514–7523. doi: 10.1016/j.msea.2011.06.080.
- Eddy Jai Poinern, G., Brundavanam, S. and Fawcett, D. (2013) *Biomedical Magnesium Alloys: A Review of Material Properties, Surface Modifications and Potential as a Biodegradable Orthopaedic Implan, American Journal*

of *Biomedical Engineering*, 2(6), pp. 218–240. doi: 10.5923/j.ajbe.20120206.02.

Gashti, S. O. *et al.* (2016) *Effects of grain size and dislocation density on strain hardening behavior of ultrafine grained AA1050 processed by accumulative roll bonding*, *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier B.V, 658, pp. 854–861. doi: 10.1016/j.jallcom.2015.11.032.

Gruber, P. A. *et al.* (2008) *Texture, microstructure, and mechanical properties of equiaxed ultrafine-grained Zr fabricated by accumulative roll bonding*, 56, pp. 1228–1242. doi: 10.1016/j.actamat.2007.11.017.

Haribabu, S. *et al.* (2018) *Fabrication and Analysis of Accumulative Roll Bonding Process between Magnesium and Aluminum Multi-Layers*, *Applied Mechanics and Materials*, 877(February), pp. 183–189. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.877.183.

Hu, X. S. *et al.* (2010) *Microstructure and Properties of Pure Mg/ZK60 Laminate Processed by Accumulative Roll Bonding*, *Materials Science Forum*, 650(May), pp. 343–346. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.650.343.

Jamaati, R. *et al.* (2012) *Investigation of nanostructured Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite produced by accumulative roll bonding process*, *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 35, pp. 37–42. doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.040.

Kaya, A. A. (2013) *Physical Metallurgy of Magnesium, Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy*. Woodhead Publishing Limited. doi: 10.1533/9780857097293.33.

Limited, W. P. (2013) *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy*, in.

Woodhead Publishing Limited.

Mechanics, A. *et al.* (2015) *Heat Treatment of Ultrafine Grained AA6061 Consolidation by Equal Channel Heat Treatment of Ultrafine Grained AA6061 Consolidation by Equal Channel Angular Pressing*, (May). doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.771.253.

Pandiangan, P. (2014) *Ketidakpastian dan Pengukuran*, in *Ketidakpastian dan Pengukuran*. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka, pp. 3–15.

Pérez-Prado, M. T., Del Valle, J. A. and Ruano, O. A. (2004) *Grain refinement of MG-Al-Zn alloys via accumulative roll bonding*, *Scripta Materialia*, 51(11), pp. 1093–1097. doi: 10.1016/j.scriptamat.2004.07.028.

Prabowo, G. (2010) *Studi Pengaruh Deformasi dan Temperatur Terhadap Besar Butir Ferit pada Baja HSLA A572 Grade 50 Hasil Proses Canai Panas*. Universitas Indonesia.

Pramono, A., Alhamidi, A. A. and Fadila, N. (2018) *Pengaruh Parameter Terkontrol Pada Proses Accumulative Roll Bonding (ARB) Terhadap Sifat Mekanik Dan Mikrostruktur Aluminium Seri 6 (AA6061)*, *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin*, IV(2), pp. 68–73.

Radha, R. and Sreekanth, D. (2017) *Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implan applications – a review*, *Journal of Magnesium and Alloys*. Elsevier B.V., 5(3), pp. 286–312. doi: 10.1016/j.jma.2017.08.003.

Rahmi Syaflida (2012) *Analisis Sifat Mekanis Magnesium Proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP) Melalui Uji Tarik dan Uji Kekerasan Dalam Cairan Fisiologis (In vitro)*. Universitas Indonesia.

- Rezaei, M. R., Toroghinejad, M. R. and Ashrafizadeh, F. (2011) *Production of nano-grained structure in 6061 aluminum alloy strip by accumulative roll bonding*, *Materials Science & Engineering A*. Elsevier B.V., (November 2017), pp. 1–6. doi: 10.1016/j.msea.2011.09.057.
- Rosochowski, A. (2005) *Processing Metals by Severe Plastic Deformation*, 101–102, pp. 13–22. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.101-102.13.
- Saito, Y. *et al.* (1998) *Ultra-fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process*, *Scripta Materialia*, 39(9), pp. 1221–1227.
- Sanusi, K. O. and Akinlabi, E. T. (2017) *Accumulative Roll Bonding (ARB) Process for Effective Biomedical NiTi Alloys*, pp. 1–5.
- Sasha, P. and Viswanathan, S. (2014) *Grain Refinement of Magnesium by Zirconium: Characterization and Analysis*, (January 2011), pp. 1–10. doi: 10.1002/9781118062029.ch34.
- Sulaiman (2015) *Perubahan Nilai Kekerasan Pelat Baja Kapal Dengan Perlakuan Bending Line Heating*, 10, pp. 76–80.
- Tsuji, B. N. *et al.* (2003) *ARB (Accumulative Roll-Bonding) and other new Techniques to Produce Bulk Ultrafine Grained Materials*, (5), pp. 338–344. doi: 10.1002/adem.200310077.
- Valle, J. A. and Ruano, O. A. (2005) *Achieving high strength in commercial Mg cast alloys through large strain rolling*, 59, pp. 3299–3303. doi: 10.1016/j.matlet.2005.04.061.
- Voort, G. Vander (2008) *Metallography of Magnesium and its Alloys*, *Nature*,



156(3969), pp. 614–614. doi: 10.1038/156614b0.

Yi, S., Schestakow, I. and Zaefferer, S. (2009) *Twinning-related microstructural evolution during hot rolling and subsequent annealing of pure magnesium*, 516, pp. 58–64. doi: 10.1016/j.msea.2009.03.015.

## LAMPIRAN A

## Contoh Perhitungan

## 1. Pengujian Kekerasan

Sampel	$d_1$	$d_2$	D	$D^2$	HVN	Rata- Rata HVN
Mg 0	0,08867464	0,06035316	0,0745139	0,005552321	16,6993218	14,87788436
	0,07479214	0,07948808	0,07714011	0,005950597	15,581631	
	0,09138202	0,08172204	0,08655203	0,007491254	12,37710019	
	0,09138202	0,06576952	0,07857577	0,006174152	15,01744783	
	0,09164904	0,06711513	0,079382085	0,006301515	14,71392099	
Mg 350°C 1 siklus	0,0727425	0,06772236	0,07023243	0,004932594	18,79741081	19,36645112
	0,07178393	0,06665385	0,06921889	0,004791255	19,35192453	
	0,07263843	0,0702324	0,071435415	0,005103019	18,16963817	
	0,06820523	0,06752055	0,06786289	0,004605372	20,13301059	
	0,06805664	0,06684329	0,067449965	0,004549498	20,38027152	
Mg 350°C 2 siklus	0,07503946	0,07163759	0,073338525	0,005378539	17,23888136	18,9134777
	0,06777545	0,06586418	0,066819815	0,004464888	20,76647986	
	0,07429451	0,06626103	0,07027777	0,004938965	18,77316418	
	0,07103407	0,06796286	0,069498465	0,004830037	19,19654176	
	0,07076681	0,07047065	0,07061873	0,004987005	18,59232134	
Mg 350°C 3 siklus	0,0702324	0,06735174	0,06879207	0,004732349	19,59280731	18,74985274
	0,0702324	0,06751891	0,068875655	0,004743856	19,54528192	
	0,07195368	0,06971305	0,070833365	0,005017366	18,47981739	
	0,07195368	0,06971305	0,070833365	0,005017366	18,47981739	
	0,073878	0,0710744	0,0724762	0,0052528	17,65153968	
Mg 350°C 4 siklus	0,07119936	0,0710744	0,07113688	0,005060456	18,32246058	19,80083377
	0,06939244	0,06778803	0,068590235	0,00470462	19,70828533	
	0,06594801	0,06711181	0,06652991	0,004426229	20,94785461	
	0,07034636	0,06805768	0,06920202	0,00478892	19,36136087	
	0,06730162	0,06666831	0,066984965	0,004486986	20,66420746	
Mg 250°C 1 siklus	0,06706704	0,06675447	0,066910755	0,004477049	20,71006978	19,93838436
	0,0682775	0,07006748	0,06917249	0,004784833	19,37789527	
	0,06971305	0,06787332	0,068793185	0,004732502	19,59217219	
	0,06954316	0,06926105	0,069402105	0,004816652	19,24988489	
	0,06730162	0,06635275	0,066827185	0,004465873	20,76189967	

Sampel	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	D	D <sup>2</sup>	HVN	Rata- Rata HVN
Mg 250°C 2 siklus	0,06725256	0,06644266	0,06684761	0,004468603	20,74921419	21,56121481
	0,06250341	0,06191986	0,062211635	0,003870288	23,95687641	
	0,06761934	0,06145529	0,064537315	0,004165065	22,26135712	
	0,0664488	0,06447523	0,065462015	0,004285275	21,63688239	
	0,07002936	0,06894874	0,06948905	0,004828728	19,20174395	
Mg 250°C 3 siklus	0,06747276	0,0662168	0,06684478	0,004468225	20,75097114	20,36830586
	0,06926105	0,06344147	0,06635126	0,00440249	21,06081019	
	0,06944498	0,06456029	0,067002635	0,004489353	20,65330973	
	0,06859286	0,06845487	0,068523865	0,00469552	19,74648144	
	0,07163759	0,0658163	0,068726945	0,004723393	19,62995681	
Mg 250°C 4 siklus	0,06603792	0,06420608	0,065122	0,004240875	21,86341322	20,9180107
	0,0655962	0,06599242	0,06579431	0,004328891	21,41887959	
	0,06845487	0,06541052	0,066932695	0,004479986	20,69649482	
	0,06867984	0,06894874	0,06881429	0,004735407	19,58015639	
	0,06608451	0,06671168	0,066398095	0,004408707	21,03110948	

## 2. Perhitungan Ralat

### a) Mg 0

No	HVN	HVN - HVR	(HVN-HVR) <sup>2</sup>
1	16,6993218	1,82143744	3,317634348
2	15,581631	0,70374664	0,495259333
3	12,3771002	-2,50078416	6,253921415
4	15,0174478	0,13956344	0,019477954
5	14,713921	-0,16396336	0,026883983
Σ	74,3894218	-8,88178E-15	10,11317703
HVR = 14,87788436			

$$\gamma = \sqrt{\frac{10,11317703}{5(5-1)}} = 0,7111$$

$$NS = 14,87788436 \pm 0,7111$$

$$RN = \frac{0,7111}{14,87788436} \times 100\% = 4,7795\%$$

## b) Mg 1A

No	HVN	HVN - HVR	(HVN-HVR) <sup>2</sup>
1	20,71007	0,7716854	0,59549839
2	19,377895	-0,560489	0,31414801
3	19,592172	-0,346212	0,11986287
4	19,249885	-0,688499	0,47403153
5	20,7619	0,8235153	0,67817748
Σ	99,691922	7,105E-15	2,18171829
HVR = 19,938384			

$$\gamma = \sqrt{\frac{2,18171829}{5(5-1)}} = 0,3302$$

$$NS = 19,938384 \pm 0,3302$$

$$RN = \frac{0,3302}{19,938384} \times 100\% = 1,6565\%$$

## c) Mg 2A

No	HVN	HVN - HVR	(HVN-HVR) <sup>2</sup>
1	20,749214	-0,812001	0,65934497
2	23,956876	2,3956616	5,7391945
3	22,261357	0,7001423	0,49019924
4	21,636882	0,0756676	0,00572559
5	19,201744	-2,359471	5,56710293
Σ	107,80607	1,066E-14	12,4615672
HVR = 21,561215			

$$\gamma = \sqrt{\frac{12,4615672}{5(5-1)}} = 0,7893$$

$$NS = 21,561215 \pm 0,7893$$

$$RN = \frac{0,7893}{21,561215} \times 100\% = 3,6609\%$$

d) Mg 3A

No	HVN	HVN - HVR	(HVN-HVR) <sup>2</sup>
1	20,750971	0,3826653	0,1464327
2	21,06081	0,6925044	0,47956229
3	20,65331	0,2850039	0,0812272
4	19,746481	-0,621824	0,38666563
5	19,629957	-0,738349	0,5451593
Σ	101,84153	1,066E-14	1,63904713
HVR = 20,368306			

$$\gamma = \sqrt{\frac{1,63904713}{5(5-1)}} = 0,2862$$

$$NS = 20,368306 \pm 0,2862$$

$$RN = \frac{0,7111}{20,368306} \times 100\% = 1,4054\%$$

e) Mg 4A

No	HVN	HVN - HVR	(HVN-HVR) <sup>2</sup>
1	21,863413	0,9454025	0,89378589
2	21,41888	0,5008689	0,25086965
3	20,696495	-0,221516	0,04906929
4	19,580156	-1,337854	1,78985413
5	21,03111	0,1130988	0,01279134
Σ	104,59005	0	2,9963703
HVR = 20,918011			

$$\gamma = \sqrt{\frac{2,9963703}{5(5-1)}} = 0,3870$$

$$NS = 20,918011 \pm 0,3870$$

$$RN = \frac{0,3870}{20,918011} \times 100\% = 1,8503\%$$

f) Mg 1B

No	HVN	HVN - HVR	(HVN-HVR) <sup>2</sup>
1	18,7974108	-0,56904032	0,323806886
2	19,3519245	-0,01452662	0,000211023
3	18,1696382	-1,19681292	1,432361165
4	20,1330106	0,76655948	0,587613436
5	20,3802715	1,01382038	1,027831763
Σ	96,8322556	-3,55271E-15	3,371824273
HVR = 19,36645112			

$$\gamma = \sqrt{\frac{3,371824273}{5(5-1)}} = 0,4105$$

$$NS = 19,36645112 \pm 0,4105$$

$$RN = \frac{0,4105}{19,36645112} \times 100\% = 2,1201\%$$

g) Mg 2B

No	HVN	HVN - HVR	(HVN-HVR) <sup>2</sup>
1	17,2388814	-1,67459632	2,804272835
2	20,7664799	1,85300218	3,433617079
3	18,7731642	-0,14031352	0,019687884
4	19,1965418	0,28306408	0,080125273
5	18,5923213	-0,32115642	0,103141446
Σ	94,5673886	0	6,440844517
HVR = 18,91347772			

$$\gamma = \sqrt{\frac{6,440844517}{5(5-1)}} = 0,5674$$

$$NS = 18,91347772 \pm 0,5674$$

$$RN = \frac{0,5674}{18,91347772} \times 100\% = 3,0004\%$$

h) Mg 3B

No	HVN	HVN - HVR	(HVN-HVR) <sup>2</sup>
1	19,5928073	0,84295456	0,71057239
2	19,5452819	0,79542916	0,632707549
3	18,4798174	-0,27003534	0,072919085
4	18,4798174	-0,27003534	0,072919085
5	17,6515397	-1,09831304	1,206291534
Σ	93,7492637	-3,55271E-15	2,695409642
HVR = 18,74985274			

$$\gamma = \sqrt{\frac{2,695409642}{5(5-1)}} = 0,3671$$

$$NS = 18,74985274 \pm 0,3671$$

$$RN = \frac{0,3671}{18,74985274} \times 100\% = 1,9579\%$$

i) Mg 4B

No	HVN	HVN - HVR	(HVN-HVR) <sup>2</sup>
1	18,3224606	-1,47837318	2,185587259
2	19,7082853	-0,09254848	0,008565221
3	20,9478546	1,14702082	1,315656762
4	19,3613609	-0,43947288	0,193136412
5	20,6642075	0,86337372	0,74541418
Σ	99,0041689	1,06581E-14	4,448359835
HVR = 19,80083378			

$$\gamma = \sqrt{\frac{4,448359835}{5(5-1)}} = 0,4716$$

$$NS = 19,80083378 \pm 0,4716$$

$$RN = \frac{0,4716}{19,80083378} \times 100\% = 2,3817\%$$

## LAMPIRAN B

## Contoh Perhitungan Nilai Kerapatan Dislokasi

Mg 0										
No	D	D <sup>2</sup>	ε	ε <sup>2</sup>	K	b <sup>2</sup>	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	ρ	ρ
1	42.5	1806.25	0.27	0.0729	18.84	0.000576	0.001661	2384.438	1.990053	
2	105.3	11088.09	0.075	0.005625	18.84	0.000576	0.000271	183.9844	0.223112	
3	105.4	11109.16	0.074	0.005476	18.84	0.000576	0.00027	179.1108	0.219928	0.953185
4	79.6	6336.16	0.089	0.007921	18.84	0.000576	0.000473	259.0827	0.350241	
5	31.6	998.56	0.2	0.04	18.84	0.000576	0.003004	1308.333	1.982589	

Kerapatan Dislokasi Mg 0 = 0,953185 x 10<sup>12</sup>/mm<sup>2</sup>

Mg 1A										
No	D	D <sup>2</sup>	ε	ε <sup>2</sup>	K	b <sup>2</sup>	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	ρ	ρ
1	57	3249	0.217	0.047089	18.84	0.000576	0.000923	1540.203	1.192545	
2	48.9	2391.21	0.236	0.055696	18.84	0.000576	0.001255	1821.723	1.511795	
3	34.6	1197.16	0.272	0.073984	18.84	0.000576	0.002506	2419.893	2.462536	1.146696
4	92.4	8537.76	0.1	0.01	18.84	0.000576	0.000351	327.0833	0.339014	
5	99.1	9820.81	0.072	0.005184	18.84	0.000576	0.000305	169.56	0.227588	

Kerapatan Dislokasi Mg 1A = 1,146696 x 10<sup>12</sup>/mm<sup>2</sup>

Mg 2A										
No	D	D <sup>2</sup>	ε	ε <sup>2</sup>	K	b <sup>2</sup>	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	ρ	ρ
1	27.7	767.29	0.464	0.215296	18.84	0.000576	0.00391	7041.973	5.247205	
2	57	3249	0.217	0.047089	18.84	0.000576	0.000923	1540.203	1.192545	
3	69.7	4858.09	0.168	0.028224	18.84	0.000576	0.000618	923.16	0.755034	2.230431
4	44.1	1944.81	0.202	0.040804	18.84	0.000576	0.001543	1334.631	1.434837	
5	30.3	918.09	0.244	0.059536	18.84	0.000576	0.003268	1947.323	2.522534	

Kerapatan Dislokasi Mg 2A = 2,230431 x 10<sup>12</sup>/mm<sup>2</sup>

Mg 3A										
No	D	D <sup>2</sup>	ε	ε <sup>2</sup>	K	b <sup>2</sup>	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	ρ	ρ
1	57	3249	0.217	0.047089	18.84	0.000576	0.000923	1540.203	1.192545	
2	48.9	2391.21	0.236	0.055696	18.84	0.000576	0.001255	1821.723	1.511795	
3	72.4	5241.76	0.126	0.015876	18.84	0.000576	0.000572	519.2775	0.545157	2.668369
4	26.8	718.24	0.572	0.327184	18.84	0.000576	0.004177	10701.64	6.685764	
5	24	576	0.261	0.068121	18.84	0.000576	0.005208	2228.124	3.406584	

Kerapatan Dislokasi Mg 3A = 2,668369 x 10<sup>12</sup>/mm<sup>2</sup>



<b>Mg 4A</b>										
No	D	D <sup>2</sup>	ε	ε <sup>2</sup>	K	b <sup>2</sup>	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	ρ	ρ
1	69.3	4802.49	0.18	0.0324	18.84	0.000576	0.000625	1059.75	0.813634	1.642999
2	48.9	2391.21	0.236	0.055696	18.84	0.000576	0.001255	1821.723	1.511795	
3	35	1225	0.252	0.063504	18.84	0.000576	0.002449	2077.11	2.255394	
4	99.1	9820.81	0.072	0.005184	18.84	0.000576	0.000305	169.56	0.227588	
5	24	576	0.261	0.068121	18.84	0.000576	0.005208	2228.124	3.406584	

Kerapatan Dislokasi Mg 4A =  $1,642999 \times 10^{12}/\text{mm}^2$

<b>Mg 1B</b>										
No	D	D <sup>2</sup>	ε	ε <sup>2</sup>	K	b <sup>2</sup>	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	ρ	ρ
1	42	1764	0.11	0.0121	18.84	0.000576	0.001701	395.7708	0.820414	1.058548
2	69.3	4802.49	0.18	0.0324	18.84	0.000576	0.000625	1059.75	0.813634	
3	89	7921	0.134	0.017956	18.84	0.000576	0.000379	587.3108	0.471633	
4	34.6	1197.16	0.272	0.073984	18.84	0.000576	0.002506	2419.893	2.462536	
5	44.1	1944.81	0.102	0.010404	18.84	0.000576	0.001543	340.2975	0.724522	

Kerapatan Dislokasi Mg 1B =  $1,058548 \times 10^{12}/\text{mm}^2$

<b>Mg 2B</b>										
No	D	D <sup>2</sup>	ε	ε <sup>2</sup>	K	b <sup>2</sup>	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	ρ	ρ
1	69.3	4802.49	0.18	0.0324	18.84	0.000576	0.000625	1059.75	0.813634	1.139625
2	69.7	4858.09	0.169	0.028561	18.84	0.000576	0.000618	934.1827	0.759528	
3	34.6	1197.16	0.272	0.073984	18.84	0.000576	0.002506	2419.893	2.462536	
4	44.1	1944.81	0.202	0.040804	18.84	0.000576	0.001543	1334.631	1.434837	
5	99.1	9820.81	0.072	0.005184	18.84	0.000576	0.000305	169.56	0.227588	

Kerapatan Dislokasi Mg 2B =  $1,139625 \times 10^{12}/\text{mm}^2$

<b>Mg 3B</b>										
No	D	D <sup>2</sup>	ε	ε <sup>2</sup>	K	b <sup>2</sup>	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	ρ	ρ
1	69.3	4802.49	0.18	0.0324	18.84	0.000576	0.000625	1059.75	0.813634	1.189196
2	57.3	3283.29	0.203	0.041209	18.84	0.000576	0.000914	1347.878	1.109766	
3	34.6	1197.16	0.272	0.073984	18.84	0.000576	0.002506	2419.893	2.462536	
4	44.1	1944.81	0.202	0.040804	18.84	0.000576	0.001543	1334.631	1.434837	
5	135.1	18252.01	0.054	0.002916	18.84	0.000576	0.000164	95.3775	0.125207	

Kerapatan Dislokasi Mg 3B =  $1,189196 \times 10^{12}/\text{mm}^2$

Mg 4B										
No	D	D <sup>2</sup>	ε	ε <sup>2</sup>	K	b <sup>2</sup>	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	ρ	ρ
1	69.3	4802.49	0.28	0.0784	18.84	0.000576	0.000625	2564.333	1.265653	
2	57.3	3283.29	0.203	0.041209	18.84	0.000576	0.000914	1347.878	1.109766	
3	44.1	1944.81	0.202	0.040804	18.84	0.000576	0.001543	1334.631	1.434837	1.171999
4	37.6	1413.76	0.182	0.033124	18.84	0.000576	0.002122	1083.431	1.516259	
5	114.5	13110.25	0.195	0.038025	18.84	0.000576	0.000229	1243.734	0.533481	

Kerapatan Dislokasi Mg 4B =  $1,171999 \times 10^{12}/\text{mm}^2$

## 2. Perhitungan Ralat

a) Mg 0

No	ρ	ρ - ρ <sub>r</sub>	(ρ - ρ <sub>r</sub> ) <sup>2</sup>
1	1,99005	1,82143744	3,317634348
2	0,22311	0,70374664	0,495259333
3	0,21993	-0,73325	0,537656
4	0,35024	-0,60294	0,363537
5	1,98259	1,02941	1,059685
Σ	4,76592	2E-05	3,568979
ρ <sub>r</sub> = 0,95318			

$$\gamma = \sqrt{\frac{3,568979}{5(5-1)}} = 0,4224$$

$$\text{NS} = 0,95318 \pm 0,4224$$

$$\text{RN} = \frac{0,4224}{0,95318} \times 100\% = 44,3181\%$$

## b) Mg 1A

No	$\rho$	$\rho - \rho r$	$(\rho - \rho r)^2$
1	1.19254	0.04584	0.002101
2	1.5118	0.3651	0.133298
3	2.46254	1.31584	1.731435
4	0.33901	-0.80769	0.652363
5	0.22759	-0.91911	0.844763
$\Sigma$	5.73348	-2E-05	3.363961
$\rho r = 1,1467$			

$$\gamma = \sqrt{\frac{3,363961}{5(5-1)}} = 0,4101$$

$$NS = 1,1467 \pm 0,4101$$

$$RN = \frac{0,4101}{1,1467} \times 100\% = 35,7652\%$$

## c) Mg 2A

No	$\rho$	$\rho - \rho r$	$(\rho - \rho r)^2$
1	5.24721	3.01678	9.100962
2	1.19254	-1.03789	1.077216
3	0.75503	-1.4754	2.176805
4	1.43484	-0.79559	0.632963
5	2.52253	0.2921	0.085322
$\Sigma$	11.15215	-6.661E-16	13.07327
$\rho r = 2,23043$			

$$\gamma = \sqrt{\frac{13,07327}{5(5-1)}} = 0,8084$$

$$NS = 2,23043 \pm 0,8084$$

$$RN = \frac{0,8084}{2,23043} \times 100\% = 36,24837\%$$

d) Mg 3A

No	$\rho$	$\rho - \rho_r$	$(\rho - \rho_r)^2$
1	1.19254	-1.47583	2.178074
2	1.5118	-1.15657	1.337654
3	0.52516	-2.14321	4.593349
4	6.68576	4.01739	16.13942
5	3.40658	0.73821	0.544954
$\Sigma$	13.32184	-0.02001	24.79345
$\rho_r = 2,66837$			

$$\gamma = \sqrt{\frac{24,79345}{5(5-1)}} = 1,1134$$

$$NS = 2,66837 \pm 1,1134$$

$$RN = \frac{1,1134}{2,66837} \times 100\% = 41,72607\%$$

e) Mg 4A

No	$\rho$	$\rho - \rho_r$	$(\rho - \rho_r)^2$
1	0.81363	-0.82937	0.687855
2	1.5118	-0.1312	0.017213
3	2.25539	0.61239	0.375022
4	0.22759	-1.41541	2.003385
5	3.40658	1.76358	3.110214
$\Sigma$	8.21499	-1E-05	6.193689
$\rho_r = 1,6430$			

$$\gamma = \sqrt{\frac{6,193689}{5(5-1)}} = 0,5564$$

$$NS = 1,6430 \pm 0,5564$$

$$RN = \frac{0,5564}{1,6430} \times 100\% = 33,87054\%$$

f) Mg 1B

No	$\rho$	$\rho - \rho r$	$(\rho - \rho r)^2$
1	0.82041	-0.23814	0.056711
2	0.81363	-0.24492	0.059986
3	0.47163	-0.58692	0.344475
4	2.46254	1.40399	1.971188
5	0.72452	-0.33403	0.111576
$\Sigma$	5.29273	-2E-05	2.543936
$\rho r = 1,05855$			

$$\gamma = \sqrt{\frac{2,543936}{5(5-1)}} = 0,3566$$

$$NS = 1,05855 \pm 0,3566$$

$$RN = \frac{0,3566}{1,05855} \times 100\% = 33,69199\%$$

g) Mg 2B

No	$\rho$	$\rho - \rho r$	$(\rho - \rho r)^2$
1	0.81363	-0.32599	0.106269
2	0.75953	-0.38009	0.144468
3	2.46254	1.32292	1.750117
4	1.43484	0.29522	0.087155
5	0.22759	-0.91203	0.831799
$\Sigma$	5.69813	3E-05	2.919809
$\rho r = 1,13962$			

$$\gamma = \sqrt{\frac{2,919809}{5(5-1)}} = 0,3820$$

$$NS = 1,13962 \pm 0,3820$$

$$RN = \frac{0,3820}{1,13962} \times 100\% = 33,52758\%$$

h) Mg 3B

No	$\rho$	$\rho - \rho_r$	$(\rho - \rho_r)^2$
1	0.81363	-0.37557	0.141053
2	1.10977	-0.07943	0.006309
3	2.46254	1.27334	1.621395
4	1.43484	0.24564	0.060339
5	0.12521	-1.06399	1.132075
$\Sigma$	5.94599	-1E-05	2.96117
$\rho_r = 1,1892$			

$$\gamma = \sqrt{\frac{2,96117}{5(5-1)}} = 0,3847$$

$$NS = 1,1892 \pm 0,3847$$

$$RN = \frac{0,3847}{1,1892} \times 100\% = 32,35652\%$$

i) Mg 4B

No	$\rho$	$\rho - \rho_r$	$(\rho - \rho_r)^2$
1	1.26565	0.09365	0.00877
2	1.10977	-0.06223	0.003873
3	1.43484	0.26284	0.069085
4	1.51626	0.34426	0.118515
5	0.53348	-0.63852	0.407708
$\Sigma$	5.86	0	0.60795
$\rho_r = 1,172$			

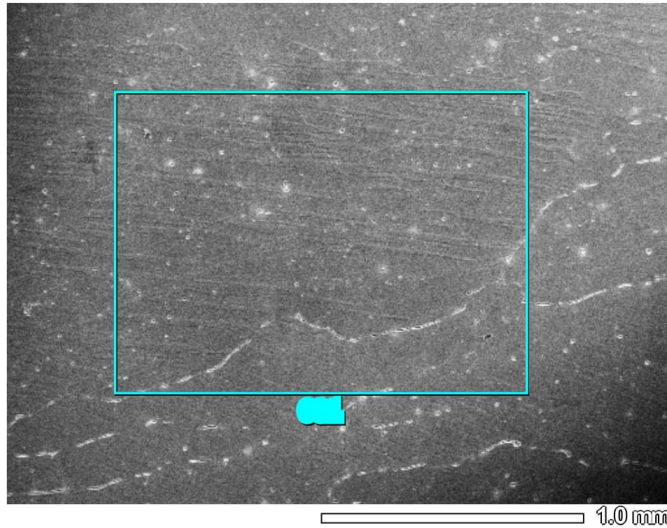
$$\gamma = \sqrt{\frac{0,60795}{5(5-1)}} = 0,1743$$

$$NS = 1,172 \pm 0,1743$$

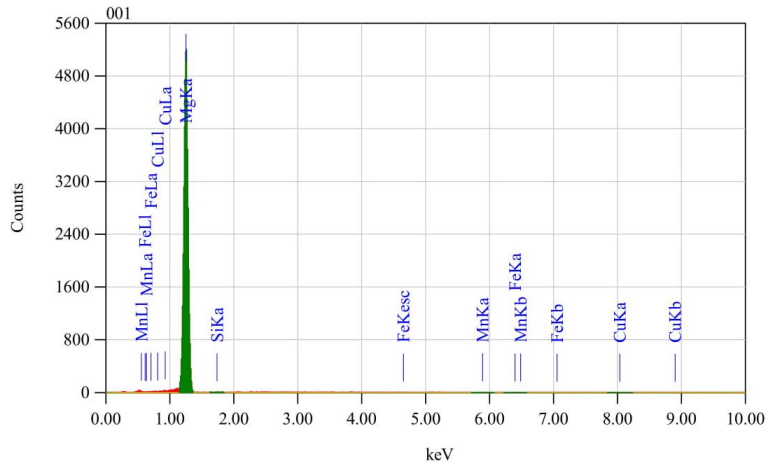
$$RN = \frac{0,1743}{1,172} \times 100\% = 14,87618\%$$

## LAMPIRAN C

## Hasil Pengujian SEM-EDS

Mg 0 Cyl

Title	: IMG1
Instrument	: 6510 (LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 50
Date	: 2020/02/27
Pixel	: 512 x 384



Acquisition Parameter	
Instrument	: 6510 (LA)
Acc. Voltage	: 20.0 kV
Probe Current	: 1.00000 nA
PHA mode	: T3
Real Time	: 32.87 sec
Live Time	: 30.00 sec
Dead Time	: 8 %
Counting Rate	: 1748 cps
Energy Range	: 0 - 20 keV

## ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.6228

Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
Mg K	1.253	99.77	1.51	99.82				99.8882
Si K	1.739	0.18	4.83	0.16				0.0710
Mn K	5.894	0.00	7.91	0.00				0.0034
Fe K	6.398	0.00	8.14	0.00				0.0012
Cu K	8.040	0.05	16.56	0.02				0.0362
Total		100.00		100.00				

## LAMPIRAN D

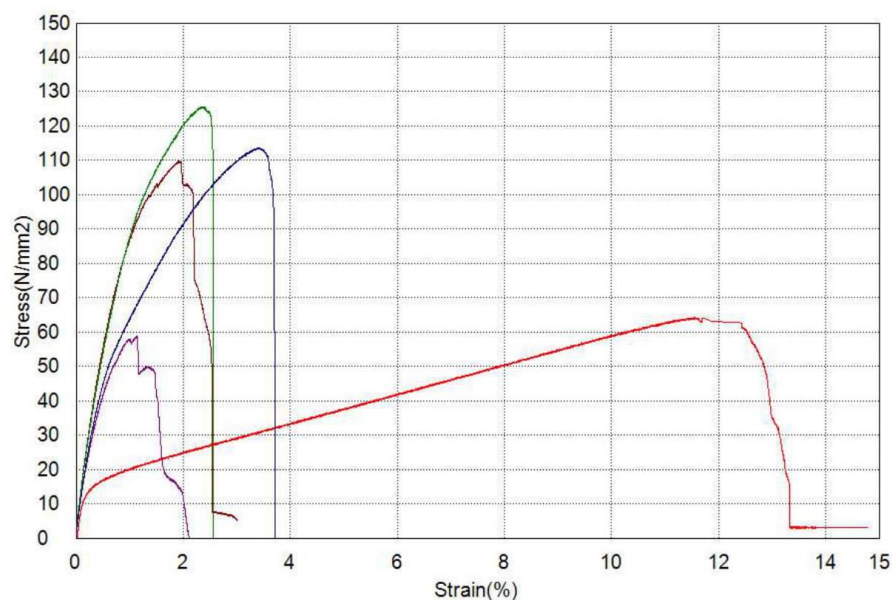
### Hasil Pengujian Tarik

### Magnesium hasil rolling 250c

Product Name	MgRoll250	Operator	L/H/M
Report Date	1/29/2020	Temperature	26 C
Humidity:	55%	Speed	2mm/min
Shape	Plate	No of Batches:	1
Qty/Batch:	5		

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Mg 0	682.751	64.2464	2.91925	11.5568
Mg 1C	1225.23	109.705	0.48240	1.92804
Mg 2B	546.018	58.7189	0.28269	1.12669
Mg 3A	1152.87	125.615	0.59968	2.40448
Mg 4C	1387.84	113.655	0.85066	3.41355
Average	998.942	94.3881	1.02694	4.08591
Standard Deviation	364.437	30.6666	1.07760	4.25755
Maximum	1387.84	125.615	2.91925	11.5568
Minimum	546.018	58.7189	0.28269	1.12669

Name	Elongation
Parameters	
Unit	%
Mg 0	10.2930
Mg 1C	0.71943
Mg 2B	0.91670
Mg 3A	1.44346
Mg 4C	3.41092
Average	3.35670
Standard Deviation	4.02133
Maximum	10.2930
Minimum	0.71943



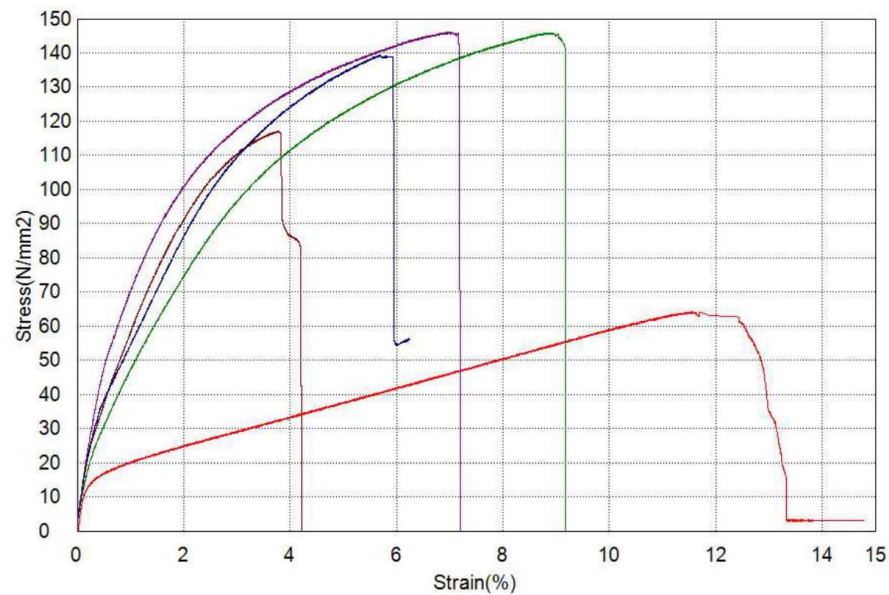


## Magnesium hasil rolling 350c

Product Name	MgRoll350	Operator	L/H/M
Report Date	1/29/2020	Temperature	26 C
Humidity:	55%	Speed	2mm/min
Shape	Plate	No of Batches:	1
Qty/Batch:	5		

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Mg 0	682.751	64.2464	2.91925	11.5568
Mg 1E	1198.57	117.105	0.94306	3.76022
Mg 2E	1434.72	146.144	1.75433	6.99495
Mg 3E	1784.21	145.857	2.21933	8.83141
Mg 4D	1467.03	139.315	1.45137	5.68049
Average	1313.46	122.534	1.85747	7.36477
Standard Deviation	409.538	34.6768	0.75333	2.98708
Maximum	1784.21	146.144	2.91925	11.5568
Minimum	682.751	64.2464	0.94306	3.76022

Name	Elongation
Parameters	%
Mg 0	10.2930
Mg 1E	2.39235
Mg 2E	3.58852
Mg 3E	6.16793
Mg 4D	6.22309
Average	5.73298
Standard Deviation	3.04063
Maximum	10.2930
Minimum	2.39235



**LAMPIRAN E****Gambar Alat dan Bahan****Gambar E.1** *Muffle Furnace***Gambar E.2** *Mini Rolling***Gambar E.3** *Thermocouple***Gambar E.4** *Mesin Bor***Gambar E.5** *Mesin Cutting***Gambar E.6** *Mesin Grinding*



**Gambar E.7** Jangka Sorong



**Gambar E.8** *Slim Taper*



**Gambar E.9** Penggaris



**Gambar E.10** Tang Potong



**Gambar E.11** Tang Lancip



**Gambar E.12** Spidol



**Gambar E.13** Mikroskop



**Gambar E.14** Alat Uji Tarik



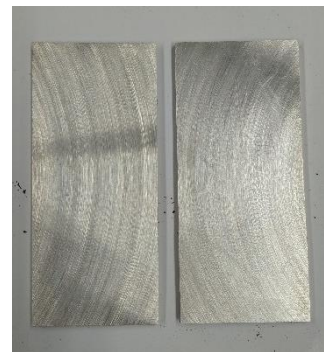
**Gambar E.15** *Tissue*



**Gambar E.16** Kawat Tembaga



**Gambar E.17** Aseton



**Gambar E.18** Magnesium



**Gambar E.19** Mesin *Polishing*