

**PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR CU DAN PERSEN  
REDUKSI Pengerolan DINGIN TERHADAP SIFAT  
MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADUAN Al-Mg**

**SKRIPSI**

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



Oleh :

Slamet Tribudi Prakoso  
3334170004

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

**2024**

LEMBAR PENGESAHAN

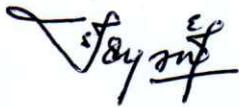
**PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR CU DAN PERSEN  
REDUKSI Pengerolan Dingin Terhadap Sifat  
MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADUAN Al-Mg**

**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



**Suryana, S.T., M.Si.**

NIP. 197402162001121001

Pembimbing II



**Prof. Ir. Agus Pramono S.T., M.T., Ph.D, Tech.**

NIP. 197608182008011012

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR CU DAN PERSEN  
REDUKSI Pengerolan DINGIN TERHADAP SIFAT  
MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADUAN Al-Mg**

**SKRIPSI**

Disusun dan diajukan oleh:

**Slamet Tribudi Prakoso**

**3334170004**

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

21 Juni 2024

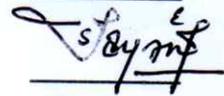
Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

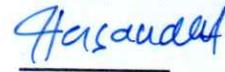
Penguji I : Prof. Ir. Agus Pramono, S.T., M.T., Ph.D., Tech.



Penguji II : Suryana, S.T., M.Si.



Penguji III : Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.



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

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



**Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.**

NIP. 19800030720050111002

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Pengaruh Penambahan Unsur Cu Dan Persen Reduksi  
Pengerolan Dingin Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur  
Mikro Paduan Al-Mg

Nama Mahasiswa : Slamet Tribudi Prakoso

NIM : 3334170004

Fakultas : Teknik Metalurgi

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi di atas adalah benar-benar hasil karya saya sendiri dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggung jawabkan. Apabila di kemudian 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 pernyataan ini.

Cilegon, 29 Juli 2024



**Slamet Tribudi Prakoso**

NIM. 3334170004

## ABSTRAK

Aluminium merupakan logam *non ferro* yang dapat digunakan sebagai material pengganti baja karena memiliki sifat yang ringan, tahan terhadap korosi, dan memiliki konduktivitas listrik dan termal yang baik. Aluminium seri 5xxx merupakan seri aluminium yang dipadukan dengan magnesium. Aluminium seri 5xxx memiliki sifat yang lebih ringan jika dibandingkan dengan aluminium paduan lainnya. Akan tetapi pada aluminium seri 5xxx memiliki kekuatan dan kekerasan yang cukup rendah sehingga peningkatan sifat mekanik pada aluminium seri 5xxx perlu dilakukan agar dapat meningkatkan fungsi dan aplikasi dari paduan tersebut khususnya pada bidang dirgantara. Agar paduan aluminium seri 5xxx dapat ditingkatkan sifat mekaniknya diperlukan analisa penambahan unsur lain seperti penambahan Cu dan proses pengerjaan dingin berupa pengerolan. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan proses pengecoran logam aluminium dengan variasi penambahan Cu menggunakan *masteralloy* sebesar 0,5%, 1%, dan 2%. Setelah itu dilakukan proses pengerolan dingin dengan melakukan variasi persen reduksi sebesar 10%, 20%, dan 30%. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan di peroleh kesimpulan yaitu pada setiap penambahan Cu dan peningkatan persen reduksi pengerolan dingin diperoleh nilai sifat mekanik yang fluktuatif. Setelah dilakukan analisa, nilai yang fluktuatif ini disebabkan oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Hal tersebut menyebabkan timbulnya inklusi, porositas, segregasi, dan struktur dendrit pada mikrostruktur sampel dan terjadinya retak pada bagian sisi sampel ketika dilakukan pengerolan dingin yang mana sangat mempengaruhi nilai kekerasan & kekuatan pada setiap sampel.

**Kata Kunci** : Aluminium 5xxx, Sifat Mekanik, Penambahan Tembaga, Persen Reduksi Pengerolan

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kepada Allah SWT berkat rahmat, hidayah, dan karunianya kepada kita semua sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan cukup baik. Skripsi ini disusun sebagai syarat kelulusan sebagai sarjana teknik metalurgi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan oleh berbagai pihak. Karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Metalurgi.
2. Bapak Suryana, S.T., M.Si., selaku Dosen Pembimbing I saya yang telah membimbing saya.
3. Bapak Prof. Ir. Agus Pramono, S.T., M.T., Ph.D., Tech. selaku Dosen Pembimbing II dan Dosen Pembimbing akademik saya yang selalu memberikan motivasi dan nasihat kepada saya.
4. Kedua orang tua, saudara, dan teman-teman yang selalu memberikan motivasi dan nasehat kepada saya.
5. Partner penelitian penulis yaitu Gada Wira Muslimin atas dukungan dan bantuannya selama penelitian.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Penulis berharap semoga laporan skripsi ini dapat

bermanfaat sebagai acuan penelitian bagi penulis, bagi rekan-rekan mahasiswa maupun pihak lainnya.

Cilegon, 29 Juli 2024

Slamet Tribudi Prakoso

## DAFTAR ISI

<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 GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Ruang Lingkup.....	4
1.5 Hipotesa Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Aluminium .....	7
2.2 Paduan Aluminium.....	9
2.3 Mekanisme Penguatan Logam .....	14
2.3.1 Penghalusan Butir ( <i>Grain-size reduction</i> ).....	14

2.3.2 Pengerasan Presipitasi ( <i>Precipitation Hardening</i> ) .....	16
2.3.3 Pengerasan larutan padat ( <i>Solid solution Hardening</i> ) .....	19
2.3.4 Pengerasan Regangan ( <i>Strain Hardening</i> ) .....	19
2.4 Pengerolan Logam .....	20
2.5 Pengecoran Logam.....	23
2.6 Mekanisme Solidifikasi Pada Pengecoran Logam.....	25
2.7 Struktur Dendrit .....	28
2.8 Segregasi Pada Pengecoran Logam .....	30
2.9 Pengaruh Waktu <i>Aging</i> Pada Sifat Mekanik Aluminium .....	34
2.10 Pengaruh Penambahan Cu Pada Paduan Al-Mg.....	36
2.11 Pengaruh Pengerolan Dingin Pada Paduan Al-Mg.....	38

### **BAB III METODE PENELITIAN**

3.1 Diagram Alir Penelitian .....	42
3.2 Alat dan Bahan.....	43
3.2.1 Alat-alat yang Digunakan.....	43
3.2.2 Bahan-bahan yang Digunakan.....	44
3.3 Prosedur Percobaan.....	44
3.3.1 Prosedur Pengecoran Logam .....	44
3.3.2 Prosedur Pengerolan Dingin.....	46
3.3.3 Prosedur Uji Metalografi .....	46
3.3.4 Prosedur Uji Keras.....	46
3.3.5 Prosedur Uji Tarik .....	47
3.3.6 Pengujian SEM-EDS .....	48

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Karakterisasi Awal .....	49
4.2 Karakterisasi Akhir .....	52
4.3 Analisa Struktur Mikro .....	53
4.4 Analisa Pengujian Tarik.....	68
4.5 Analisa Pengujian Keras .....	73

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan .....	78
5.2 Saran.....	79

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

Lampiran A. Contoh Perhitungan

Lampiran B. Data Hasil Penelitian

Lampiran C. Alat dan Bahan

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Dislokasi butir .....	15
Gambar 2.2 Diagram <i>Precipitation Hardening</i> .....	18
Gambar 2.3 (a) Substitusi (b) Interstisi.....	19
Gambar 2.4 Gaya-gaya selama pengerolan.....	21
Gambar 2.5 Alur proses pengecoran logam.....	23
Gambar 2.6 Skema Pembentukan Logam.....	26
Gambar 2.7 (a) nukleasi dimulai, (b) pembentukan <i>chill zone</i> , (c) pembentukan <i>columnar</i> , dan (d) pembentukan daerah <i>equiaxed</i> .....	27
Gambar 2.8 Struktur dendrit yang sedang tumbuh .....	28
Gambar 2.9 Komponen-komponen dendrit.....	29
Gambar 2.10 Proses pembentukan dendrit.....	30
Gambar 2.11 Proses terjadinya segregasi makro pada ingot baja (a) selama solidifikasi (b) Ingot yang sudah jadi.....	31
Gambar 2.12 segregasi makro pada aluminium DC ( <i>Direct Chill</i> ) cast pada bagian kiri skema proses dan bagian kanan profil segregasi .....	32
Gambar 2.13 Mikrosegregasi pada dendrit .....	34
Gambar 2.14 Diagram perubahan fasa di proses artificial aging .....	35
Gambar 2.15 Hubungan antara lamanya waktu <i>aging</i> dengan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium.....	36
Gambar 2.16 Kekuatan tarik sebagai fungsi kandungan Mg dalam paduan Al-Mg dengan berbagai kandungan Cu .....	37
Gambar 2.17 Variasi kekerasan dari berbagai persen reduksi .....	38
Gambar 2.18 Variasi kekuatan dari berbagai persen reduksi.....	39

Gambar 2.19 Variasi uji tarik dari berbagai paduan Seri 5 yang memiliki perbedaan persentase Cu .....	40
Gambar 2.20 Perbandingan sifat mekanik (a) Paduan AA 5019 (b) Paduan AA 5023.....	41
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	43
Gambar 3.2 Ilustrasi Desain Cetakan Besi.....	45
Gambar 3.2 ASTM E8 untuk <i>subsize</i> spesimen.....	47
Gambar 4.1 Struktur Mikro Perbesaran 500x Pada <i>Base Material</i> .....	54
Gambar 4.2 Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 0% Reduksi (B) 1 % Cu – 0% Reduksi (C) 2 % Cu – 0% Reduksi.....	55
Gambar 4.3 Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 10% Reduksi (B) 1 % Cu – 10% Reduksi (C) 2 % Cu – 10% Reduksi.....	57
Gambar 4.4 Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 20% Reduksi (B) 1 % Cu – 20% Reduksi (C) 2 % Cu – 20% Reduksi.....	59
Gambar 4.5 Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 30% Reduksi (B) 1 % Cu – 30% Reduksi (C) 2 % Cu – 30% Reduksi.....	60
Gambar 4.6 Hasil SEM Perbesaran x100 Pada Sampel (A) 0,5Cu 0% Reduksi (B) 1Cu 0% Reduksi (C) 2Cu 0% Reduksi (D) 0,5Cu 10% Reduksi. ....	62
Gambar 4.7 Pengaruh Persen Penambahan berat Cu Terhadap Ukuran Butir.....	66
Gambar 4.8 Kurva Uji Tarik Pada Semua Sampel .....	69
Gambar 4.9 Pengaruh Persen penambahan Cu Terhadap Kuat Tarik.....	71
Gambar 4.10 Pengaruh Persen Penambahan berat Cu Terhadap Kekerasan .....	75
Gambar B.1 Hasil uji komposisi EDS <i>Masteralloy</i> aluminium 2024.....	91
Gambar B.2 Hasil uji komposisi EDS penambahan Cu 0,5 % .....	91
Gambar B.3 Hasil uji komposisi EDS penambahan Cu 1 % .....	92
Gambar B.4 Hasil uji komposisi EDS penambahan Cu 2 % .....	92
Gambar B.5 Gambar SEM Sampel 0,5Cu 0% Reduksi .....	93
Gambar B.6 Gambar EDS Sampel 1Cu 0% Reduksi.....	93

Gambar B.7 Gambar EDS Sampel 2Cu 0% Reduksi.....	93
Gambar B.8 Gambar EDS Sampel 0,5Cu 10% Reduksi.....	93
Gambar B.9 Data pengujian tarik sampel 10% reduksi .....	94
Gambar B.10 Data pengujian tarik sampel 20% reduksi .....	95
Gambar B.11 Data pengujian tarik sampel 30% reduksi .....	96
Gambar B.12 Data pengujian metalografi dan kekerasan 0,5Cu 10% reduksi.....	97
Gambar B.13 Data pengujian metalografi dan kekerasan 0,5Cu 20% reduksi.....	98
Gambar B.14 Data pengujian metalografi dan kekerasan 0,5Cu 30% reduksi.....	99
Gambar B.15 Data pengujian metalografi dan kekerasan 1Cu 10% reduksi.....	100
Gambar B.16 Data pengujian metalografi dan kekerasan 1Cu 20% reduksi.....	101
Gambar B.17 Data pengujian metalografi dan kekerasan 1Cu 30% reduksi.....	102
Gambar B.18 Data pengujian metalografi dan kekerasan 2Cu 10% reduksi.....	103
Gambar B.19 Data pengujian metalografi dan kekerasan 2Cu 20% reduksi.....	104
Gambar B.20 Data pengujian metalografi dan kekerasan 2Cu 30% reduksi.....	105
Gambar B.21 Data pengujian metalografi dan kekerasan <i>base material</i> .....	106
Gambar B.22 Data pengujian metalografi sampel sebelum di rol .....	107
Gambar B.23 Sertifikat <i>Base Material</i> .....	108
Gambar C.1 Aluminium 5052.....	110
Gambar C.2 Aluminium 2024.....	110
Gambar C.3 Krusibel .....	110
Gambar C.4 <i>Thermogun</i> .....	110
Gambar C.5 Tabung Gas.....	110
Gambar C.6 Tungku Peleburan.....	110
Gambar C.7 Cetakan .....	111
Gambar C.8 <i>Burner</i> .....	111

Gambar C.9 Alat <i>Safety</i> .....	111
Gambar C.10 Mesin <i>Grinding</i> .....	111
Gambar C.11 Alat Uji Tarik.....	111
Gambar C.12 Mesin <i>Mounting</i> .....	111
Gambar C.13 Mikroskop Optik.....	112
Gambar C.14 <i>Muffle Furnace 1</i> .....	112
Gambar C.15 Alat Uji Keras .....	112
Gambar C.16 <i>Muffle Furnace 2</i> .....	112
Gambar C.17 Mesin Roll .....	112

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Sifat-Sifat Fisik Aluminium.....	8
Tabel 2.2 Aluminium dan Paduannya JIS H4000 ~ H4180.....	9
Tabel 2.3 Klasifikasi Paduan Aluminium .....	10
Tabel 4.1 Komposisi Kimia <i>Base Material</i> Aluminium Seri 5052.....	50
Tabel 4.2 Komposisi Kimia <i>Masteralloy</i> Aluminium Seri 2024.....	50
Tabel 4.3 Hasil Uji Komposisi Akhir .....	52
Tabel 4.4 Analisa Persebaran Unsur EDS.....	64
Tabel 4.5 Rata-Rata Ukuran Butir .....	65
Tabel 4.6 Data hasil pengujian tarik .....	69
Tabel 4.7 Data <i>Hardness Vickers</i> .....	74

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Aluminium merupakan logam *non ferro* yang bahan dasarnya adalah bauksit dan kreolit. Aluminium merupakan logam paling melimpah ketiga di kerak bumi yang diproses melalui cara Bayer. Aluminium diperoleh dari tanah tawas lalu tanah tawas direduksi menjadi aluminium melalui elektrolisa Hall Heroult. Secara luas aluminium lebih ekonomis dibanding bahan teknik lainnya. Sehingga penggunaan aluminium terus meningkat dari tahun ke tahun. Hal ini terlihat dari urutan penggunaan logam paduan aluminium yang menempati urutan kedua selama 50 tahun terakhir setelah penggunaan logam besi dan baja, dan urutan pertama untuk logam *non ferro* [1]. Aluminium merupakan logam dengan berat yang cukup ringan serta mempunyai ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Material aluminium sering kali digunakan sebagai peralatan rumah tangga, material pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi dan sebagainya [2].

Logam aluminium pada aplikasinya di dunia industri jarang digunakan dalam bentuk aluminium murni melainkan logam aluminium yang telah dipadu dengan logam lain maupun di campur unsur lain sebagai komposit [3]. Hal ini dikarenakan logam aluminium murni walaupun memiliki banyak kelebihan dibandingkan logam lainnya, tetapi di dalam aplikasi di bidang teknik masih memiliki kelemahan yaitu sifat mekanik aluminium yang kurang baik terutama pada kekerasan, kekuatan,

mampu bentuk, kemampuan las, serta ketahanan korosi pada kondisi tertentu. Sehingga membuat aluminium murni tidak dapat dipakai sebagai bahan konstruksi. Tetapi apabila dicampur dengan sejumlah kecil elemen lain, maka kekuatan dan kekerasannya akan meningkat.

Unsur-unsur paduan yang digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik aluminium adalah tembaga, silikon, mangan, magnesium, dan unsur-unsur lainnya. Dimana paduan aluminium tersebut dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis yaitu : jenis Al murni (seri 1xxx), Al-Cu (seri 2xxx), Al-Mn (seri 3xxx), Al-Si (seri 4xxx), Al-Mg (seri 5xxx), Al-Mg-Si (seri 6xxx), jenis Al-Zn (seri 7xxx), dan paduan lainnya (seri 8xxx) [2]. Paduan aluminium dengan tembaga dan seng dapat memperkuat dan memperkeras logam aluminium, paduan aluminium dengan silikon akan meningkatkan kemampuan tuang, aluminium dengan Mn akan meningkatkan kekuatan dengan mempertahankan ketahanan korosi dan aluminium dengan magnesium akan menyebabkan paduan bertambah ringan serta meningkatkan ketahanan korosi di dalam laut [4].

Perkembangan industri material pada abad ke 20 ini, sangat berkembang pesat sejalan dengan berkembangnya teknologi maupun kebutuhan manusia. Terobosan material baru sangat dibutuhkan di era modern saat ini, seiring dengan hal tersebut banyak peneliti maupun ilmuwan saling bersaing untuk mendapatkan material yang baik dan mampu meningkatkan kinerja material. Salah satu bahan yang paling banyak dipakai pada perusahaan saat ini adalah aluminium paduan. Paduan aluminium pada bidang dirgantara digunakan sebagai material untuk badan dan sayap pesawat terbang yang mana membutuhkan paduan aluminium yang

memiliki berat yang lebih ringan agar dapat menghemat bahan bakar. Pada umumnya paduan aluminium yang digunakan di badan dan sayap pesawat terbang merupakan seri 2xxx atau 7xxx yang memiliki kekuatan tarik sekitar 400 – 500 MPa yang lebih kuat jika dibandingkan dengan paduan seri 5xxx yang memiliki kekuatan tarik sekitar 200 – 300 MPa [5]. Paduan aluminium seri 5xxx memiliki berat yang lebih ringan jika dibandingkan dengan paduan lainnya karena dipadukan dengan unsur magnesium namun memiliki kekuatan yang rendah sehingga kurang cocok digunakan untuk badan dan sayap pesawat terbang. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik dari paduan seri 5xxx agar dapat digunakan sebagai material untuk badan dan sayap pesawat terbang.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas maka dapat dirumuskan beberapa perumusan masalah yang sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh dari penambahan Cu terhadap kekerasan, kekuatan, dan struktur mikro dari produk coran aluminium?
2. Bagaimana pengaruh variasi persen reduksi pengerolan dingin terhadap kekerasan, kekuatan, dan struktur mikro aluminium hasil proses pengecoran?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh penambahan Cu dalam persen berat terhadap kekerasan, kekuatan, dan struktur mikro dari produk paduan aluminium magnesium.
2. Mengetahui pengaruh variasi persen reduksi pengerolan dingin terhadap kekerasan, kekuatan, dan struktur mikro dari produk paduan aluminium magnesium.

#### **1.4 Ruang Lingkup**

Adapun ruang lingkup pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bahan yang digunakan adalah aluminium seri 5xxx dan seri 2xxx.
2. Melakukan pengecoran dengan tungku krusibel dan cetakan permanen berbahan baja.
3. Menggunakan variasi komposisi penambahan Cu sebesar 0,5%, 1%, 2%.
4. Penuangan pada cetakan baja.
5. Hasil produk coran dilakukan pengerolan dingin dengan variasi persen reduksi sebesar 10%, 20%, 30%.
6. Pengujian sampel yang dilakukan yaitu uji kekerasan *vickers*, uji tarik, dan pengamatan di bawah mikroskop optik.
7. Penelitian dilakukan di laboratorium Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

#### **1.5 Hipotesa Penelitian**

Berdasarkan literatur didapatkan hipotesa awal yaitu :

1. Penambahan Cu pada paduan aluminium magnesium dapat memperkuat paduan yang disebabkan oleh penghalusan butir dan munculnya presipitat fasa kedua yang berupa  $\text{Cu}_2\text{Mg}$  dan  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ .
2. Pengerolan dingin pada paduan aluminium magnesium dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan yang disebabkan pergeseran dislokasi pada Paduan.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan penelitian ini terdiri atas tiga bab. Bab I menjelaskan latar belakang penelitian yang berisikan pemanfaatan paduan aluminium dan kebutuhan untuk membuat paduan aluminium baru, perumusan masalah terdiri dari variasi penelitian yaitu penambahan Cu dalam persen berat serta variasi persen reduksi pengerolan dingin, tujuan penelitian berisikan tujuan penelitian secara umum dan khusus, hipotesa penelitian, tempat pengujian yang dilakukan dan lokasi penelitian dilaksanakan serta sistematika penulisan penelitian. Bab II menjelaskan tentang tinjauan pustaka yang mendukung literatur penentuan variabel dan variasi penelitian seperti aluminium, paduan aluminium, pengaruh penambahan unsur Cu dan pengerolan dingin pada paduan Al-Mg. Bab III menjelaskan mengenai metode penelitian yang digunakan yang digambarkan dengan diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, dan prosedur percobaan yang digunakan. Bab IV Hasil dan Pembahasan, bab ini menjelaskan tentang hasil dari penelitian dan pembahasan mengenai pengaruh penambahan tembaga dan persen reduksi pengerolan dingin pada paduan Al-Mg yang disajikan dalam bentuk grafik,

tabel dan gambar yang dijelaskan secara terperinci dan membandingkan hasilnya dengan literatur yang ada. Bab V Kesimpulan dan Saran, bab ini menjelaskan tentang kesimpulan penelitian ini dan saran untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Aluminium**

Aluminium merupakan logam yang termasuk ke dalam golongan *non ferro* yang memiliki warna putih dan cukup lunak. Aluminium memiliki unsur kimia golongan III A dalam sistem periodik unsur, dengan nomor atom 13 dan berat atom 26,98 gram per mol (sma). Struktur kristal aluminium adalah struktur kristal FCC, sehingga aluminium tetap ulet meskipun pada temperatur yang sangat rendah. Keuletan yang tinggi dari aluminium menyebabkan logam tersebut mudah dibentuk atau mempunyai sifat mampu bentuk yang baik. Aluminium adalah unsur paling melimpah ketiga di kerak bumi yang mana di alam ditemukan tidak dalam bentuk unsur melainkan tergabung dalam senyawa kimia [6].

Aluminium pertama kali ditemukan oleh Sir Humvrey Davey pada tahun 1825 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H. C. Oersted. tahun 1825. Secara industri tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C. M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah mengekstraksi logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa dari garamnya yang terfusi. Sampai sekarang proses Hall Heroult masih dipakai untuk memproduksi aluminium. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya selama 50 tahun terakhir berada pada urutan yang kedua setelah besi dan baja dan menempati urutan pertama di antara logam *non ferro*. Produksi aluminium tahunan di dunia mencapai 15 juta ton per tahun pada tahun 1981 [1].

Aluminium merupakan logam ringan mempunyai ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat baik lainnya sebagai sifat logam. Unsur pemuaduan yang ditambahkan pada paduan aluminium untuk meningkatkan kekuatan diantaranya tembaga, magnesium, silikon, mangan, seng, dan nikel. Unsur tersebut dapat ditambahkan secara satu persatu atau bersama-sama, yang memberikan juga sifat-sifat yang baik lainnya seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian yang rendah dan sebagainya [2]. Material ini sangat banyak dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, komponen otomotif, kapal laut, konstruksi, peralatan rumah tangga dan sebagainya. Aluminium memiliki sifat mekanik dan sifat fisik yang cukup bagus jika dibandingkan logam-logam *non ferro* lainnya. Sifat fisik dan sifat mekanik aluminium dipengaruhi oleh berbagai faktor yaitu seperti komposisi bahan dan perlakuan yang dilakukan pada aluminium tersebut. Karakteristik dari sifat fisik dan sifat mekanik aluminium dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

**Tabel 2.1** Sifat-Sifat Fisik Aluminium [2]

Sifat Aluminium	Keterangan
Wujud	Padat
Massa Jenis	2,70 gram /cm <sup>3</sup>
Titik Lebur	660,32 °C
Titik Didih	2792 K, 2519 °C, 4566 °F
Konduktivitas Panas (20 °C - 400 °C)	238 W/m.K
Tahanan Listrik	$2,69 \cdot 10^{-8} \text{ K}\Omega \text{ m}$
Modulus Young	70 Gpa
Modulus Geser	26 Gpa
Kekerasan Skala <i>Vickers</i>	167 Mpa
Kekerasan Skala <i>Brinell</i>	245 Mpa

**Tabel 2.2** Aluminium dan Paduannya JIS H4000 ~ H4180 [7]

Jenis	Sifat Mekanis				Aplikasi
	Perlakuan	Kuat Tarik (MPa)	Kuat Luluh (MPa)	Elongasi (%)	
1050	O	75	30	39	Tangki, wadah, bahan arsitektur
	H18	160	145	7	
1100	O	90	35	35	Tangki, bahan arsitektur, pendingin
	H18	165	150	5	
2024	O	185	75	20	Pesawat terbang, sepeda motor.
	T4	470	325	20	
3003	O	110	40	30	Peralatan sehari-hari, bahan arsitektur, wadah
	H18	200	185	4	
5052	O	195	90	27	Kapal laut, gerbong kereta, bahan arsitektur
	H38	290	255	7	
6063	O	90	50	32	Bingkai jendela, bahan arsitektur
	T6	240	215	12	
7075	O	230	105	17	Pesawat terbang, peralatan olahraga
	T6	570	505	11	
7N01	T6	430	355	15	Gerbong kereta, material konstruksi las

## 2.2 Paduan Aluminium

Memadukan aluminium dengan unsur lainnya merupakan salah satu cara untuk memperbaiki sifat mekanik maupun sifat fisik dari aluminium. Paduan logam merupakan kombinasi dua atau lebih jenis logam, kombinasi ini dapat merupakan campuran dari dua struktur kristalin. Paduan juga dikenal sebagai larutan padat dalam logam. Larutan padat dapat tercipta apabila pelarut dan atom yang larut memiliki ukuran yang sama dan struktur elektron yang serupa. Larutan dalam larutan logam utama memiliki suatu batas yang disebut kelarutan maksimum. Paduan yang masih dalam batas kelarutan disebut dengan paduan logam fasa tunggal. Sedangkan paduan yang melebihi batas kelarutan disebut dengan fasa ganda. Peningkatan kekuatan dan kekerasan logam paduan disebabkan oleh adanya

atom-atom yang larut yang menghambat pergerakan dislokasi dalam kristal saat terjadi deformasi plastik [2]. Secara garis besar paduan aluminium dibedakan menjadi dua jenis yaitu paduan aluminium tempa dan aluminium cor [5]. Untuk lebih jelasnya pengelompokan paduan aluminium ditunjukkan pada Tabel 2.3

**Tabel 2.3** Klasifikasi Paduan Aluminium [5]

Unsur Paduan Utama	Seri Paduan Aluminium Tempa	Seri Paduan Aluminium Cor
Al $\geq$ 99	1xxx	1xx.x
Cu	2xxx	2xx.x
Mn	3xxx	Tidak digunakan
Si + Cu + Mg	Tidak digunakan	3xx.x
Si	4xxx	4xx.x
Mg	5xxx	5xx.x
Mg + Si	6xxx	Tidak digunakan
Zn	7xxx	7xx.x
Sn	Tidak digunakan	8xx.x
<i>Other</i>	8xxx	Tidak digunakan

Menurut *Aluminium Association* (AA) sistem di Amerika, penamaan paduan aluminium tempa dan aluminium cor yaitu untuk Paduan cor (*casting alloys*) menggunakan sistem penamaan empat angka. Angka pertama menunjukkan kandungan utama paduannya. Dua angka selanjutnya menunjukkan penandaan dari paduannya. Angka terakhir yang di pisahkan dengan tanda desimal merupakan bentuk dari hasil pengecoran, misalnya *casting* (0) atau ingot (1,2). Untuk paduan tempa (*wrought alloys*) menggunakan sistem penamaan empat angka juga tetapi

penamaannya berbeda dengan penamaan pada paduan jenis cor. Angka pertama menyatakan kelompok paduan atau kandungan elemen [5].

Dari dua kelompok paduan aluminium tempa dan aluminium cor dikelompokkan lagi menjadi dua kelompok yaitu : tidak dapat diperlakukan dan dapat diperlakukan. Untuk paduan aluminium jenis cor yang dapat diperlakukan meliputi seri 2xx.x, 3xx.x, 7xx.x, dan 8xxx, yang tidak dapat diperlakukan meliputi seri 1xx.x, 4xx.x, dan 5xx.x. Sedangkan aluminium jenis tempa yang tidak dapat diperlakukan meliputi seri 1xxx, 3xxx, 4xxx, dan 5xxx, yang dapat diperlakukan adalah seri 2xxx, 6xxx, 7xxx, dan 8xxx [5]. Sifat aluminium tempa dari seri 1xxx sampai seri bxxx memiliki sifat yang berbeda-beda berikut sifat-sifat dari seri tersebut :

a. Paduan Al Murni (seri 1xxx)

Jenis paduan ini mempunyai kandungan minimal aluminium 99,0% dengan besi dan silikon menjadi kotoran utama (elemen paduan). Aluminium dalam seri ini memiliki kekuatan yang rendah tapi memiliki sifat tahan korosi, konduksi panas dan konduksi listrik yang baik juga memiliki sifat mampu las dan sifat mampu bentuk yang bagus. Aluminium seri ini banyak digunakan pada industri listrik dan industri kimia [5].

b. Paduan Al-Cu (seri 2xxx)

Elemen paduan utama pada seri ini adalah tembaga, tetapi magnesium dan sejumlah kecil elemen lain juga ditambahkan ke sebagian besar paduan jenis ini. Jenis paduan Al-Cu adalah jenis yang dapat diperlakukan. Dengan melalui pengerasan presipitat atau penyepuhan, sifat mekanik paduan

ini dapat menyamai sifat dari baja lunak, tetapi daya tahan korosinya rendah bila dibandingkan dengan jenis paduan yang lainnya. Sifat mampu lasnya juga kurang baik, karena itu paduan jenis ini dalam seri 2xxx sangat cocok untuk suku cadang dan struktur yang membutuhkan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan biasanya digunakan untuk membuat roda truk, suku cadang suspensi truk, badan pesawat dan kulit sayap, suku cadang struktural, dan suku cadang yang membutuhkan kekuatan yang baik pada suhu hingga 150 °C (300 °F) [5].

c. Paduan Al-Mn (seri 3xxx)

*Manganese* merupakan elemen paduan utama seri ini. Paduan ini adalah jenis yang tidak dapat diperlakukanaskan, sehingga kenaikan kekuatannya hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin pada proses pembuatannya. Bila dibandingkan dengan jenis aluminium murni, paduan ini mempunyai sifat yang sama dalam hal ketahanan terhadap korosi, mampu potong dan sifat mampu lasnya, sedangkan dalam hal kekuatannya, jenis paduan ini jauh lebih unggul. Paduan ini banyak digunakan sebagai material yang membutuhkan tingkat kekuatan yang *moderate* namun membutuhkan kemampuan mampu bentuk yang baik [5].

d. Paduan Al-Si (seri 4xxx)

Paduan Al-Si termasuk jenis yang tidak dapat diperlakukanaskan. Jenis ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik dan dalam proses pembekuannya hampir tidak terjadi retak. Karena sifat-sifatnya, maka paduan jenis Al-Si banyak digunakan sebagai bahan atau logam las dalam

pengelasan paduan aluminium baik paduan cor atau tempa serta bagus digunakan sebagai material piston [5].

e. Paduan Al-Mg (seri 5xxx)

Paduan ini adalah jenis yang tidak dapat diperlakukan. Magnesium merupakan paduan utama dengan komposisi sekitar 5%. Jenis ini mempunyai sifat yang baik dalam daya tahan korosi, terutama korosi oleh air laut dan sifat mampu lasnya. Paduan ini kurang cocok digunakan di suhu tinggi karena dapat mengakibatkan *stress corrosion cracking*. Paduan ini digunakan untuk komponen bus, truk, *sheet metal work* dan untuk aplikasi kelautan [5].

f. Paduan Al-Mg-Si (seri 6xxx)

Elemen paduan seri 6xxx adalah magnesium dan silikon. Paduan ini termasuk dalam jenis yang dapat diperlakukan. Paduan ini memiliki kekuatan yang lebih rendah dari seri 2xxx dan seri 7xxx namun mempunyai sifat mampu bentuk yang baik dan daya tahan korosi yang cukup. Sifat yang kurang baik dari paduan ini adalah terjadinya pelunakan pada daerah las sebagai akibat dari panas pengelasan. Paduan jenis ini banyak digunakan untuk tujuan struktur rangka, dan arsitektur [5].

g. Paduan Al-Zn (seri 7xxx)

Paduan dicampur dengan seng dari 1% hingga 7%. Paduan ini termasuk jenis yang dapat diperlakukan. Paduan ini memiliki kekuatan yang sangat tinggi sehingga paduan ini dinamakan juga ultra duralumin yang sering digunakan untuk struktur rangka pesawat. Berlawanan dengan kekuatan

tariknya, sifat mampu las dan daya tahannya terhadap korosi kurang baik. Biasanya paduan ini dicampur dengan skandium dan digunakan pada struktur badan pesawat, badan kendaraan, dan komponen-komponen yang memerlukan kekuatan yang tinggi [5].

### **2.3 Mekanisme Penguatan Logam**

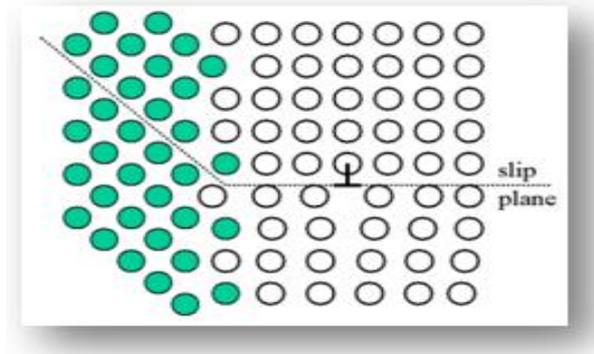
Mekanisme penguatan pada material logam terjadi akibat pergerakan dislokasi dan sifat mekanik dari logam. Kemampuan suatu material logam untuk di ubah secara plastis tergantung pada kemampuan dislokasi untuk dapat bergerak. Dengan mengurangi pergerakan dislokasi, kekuatan mekanik dapat ditingkatkan, hal ini disebabkan oleh energi mekanik yang dibutuhkan untuk membuat deformasi plastis akan semakin besar. Sebaliknya apabila pergerakan dislokasi tidak ada yang menahan, logam akan lebih mudah untuk terdeformasi. Secara umum mekanisme penguatan yang digunakan pada material logam adalah terdapat 4 cara yaitu melalui pengerasan regang, penguatan larutan padat, penguatan presipitasi, dan penghalusan batas butir.

#### **2.3.1 Penghalusan Butir (*Grain size reduction*)**

Penghalusan butir adalah salah satu cara yang efektif untuk penguatan logam. Penghalusan butir memiliki mekanisme dengan cara menghalangi pergerakan dislokasi di sekitar batas butir. Dengan mengecilnya ukuran dari butir akan meningkatkan batas butir per unit volume dan mengurangi pergerakan dislokasi yang berkelanjutan. Pergerakan dislokasi membutuhkan tegangan yang lebih tinggi untuk menghasilkan suatu dislokasi baru pada

butir berikutnya jika material memiliki butir yang lebih banyak [8].

Pergerakan slip dislokasi dapat dilihat pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Dislokasi butir [8]

Untuk hubungan pengaruh ukuran butir terhadap *yield strength* dapat mengacu pada persamaan *Hall-Petch*.

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

Keterangan :

$\sigma_0$  = tegangan geser yang berlawanan arah dengan pergerakan dislokasi pada butir.

$d$  = diameter butir

$k$  = suatu konstanta yang merepresentasikan tingkat kesulitan untuk menghasilkan suatu dislokasi baru pada butir berikutnya

Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin kecil ukuran butir pada material maka nilai kuat luluhnya akan semakin besar.

Walaupun demikian, pengaruh ukuran butir terhadap sifat mekanis memiliki batasan dimana butir yang terlalu halus (<10nm) akan menurunkan sifat

mekanis akibat *grain boundary sliding*. Diameter ukuran butir  $d$  dapat di kontrol melalui

- a) Laju pembekuan (*solidification*),
- b) Deformasi plastis,
- c) Perlakuan panas (*heat treatment*) yang sesuai.

Struktur butir dengan kehalusan tinggi pada material baja dapat diperoleh dengan kombinasi dari proses pengerjaan panas dan pendinginan terkendali serta pengaruh penambahan paduan. Dalam hal ini ukuran butir dikendalikan melalui pengaturan temperatur dan besar deformasi dalam suatu konsep perlakuan termomekanik atau TMCP [8].

### **2.3.2 Pengerasan Presipitasi (*Precipitation Hardening*)**

Pengerasan presipitasi (*precipitation hardening*) merupakan proses pengerasan paduan logam yang menyebabkan penyebaran partikel-partikel halus secara merata. Adapun syarat dari proses pengerasan presipitasi yaitu logam yang digunakan adalah logam paduan, daerah fase tunggal dan daerah dua fase, serta batas kelarutan padat harus berkurang seiring dengan turunnya temperatur. Proses pengerasan presipitasi biasanya digunakan untuk paduan aluminium dan logam *non ferro* lainnya untuk penggunaan komersial. Melalui proses ini sifat mekanik paduan Aluminium dapat ditingkatkan dengan pembentukan partikel-partikel kecil yang tersebar secara seragam. Sifat mekanik yang diinginkan dapat dicapai dengan perlakuan panas yang sesuai. Proses *precipitation hardening* harus melalui beberapa tahapan mulai dari *solution heat treatment*, *quenching*, dan *precipitation heat treatment* [9].

### A. *Solution Heat Treatment*

Pengerasan presipitasi dilakukan dengan dua proses perlakuan panas yang berbeda. Proses pertama adalah perlakuan panas larutan yang melarutkan semua atom terlarut untuk membentuk larutan padat fase tunggal. Pada langkah ini paduan logam dipanaskan hingga temperatur tertentu  $T_0$  atau sampai membentuk fase tunggal (fase  $\alpha$ ) dan ditahan selama periode tertentu hingga dapat untuk melarutkan fase beta. Proses perlakuan panas ini bertujuan untuk menghomogenkan struktur paduan logam [9].

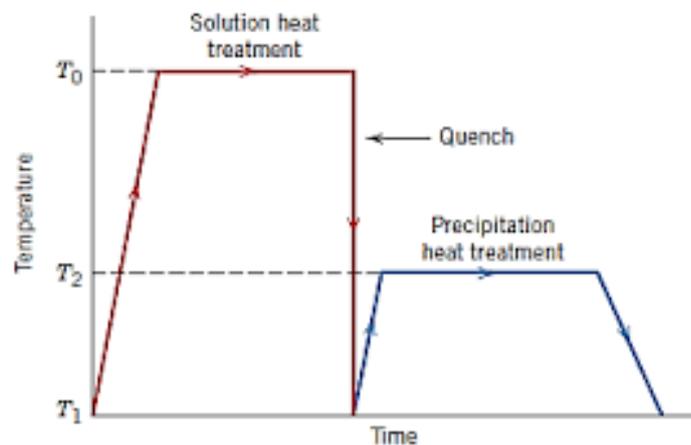
### B. *Quenching*

Proses *quenching* atau pendinginan secara cepat dilakukan pada paduan logam yang telah dihomogenkan strukturnya, sehingga atom-atom di dalamnya tidak mengalami difusi. Pendinginan pada temperatur kamar ini akan membentuk struktur yang disebut larutan padat lemah jenuh [9].

### C. *Precipitation Heat Treatment*

*Precipitation heat treatment* adalah proses pemanasan kembali paduan sampai temperatur menengah  $T_2$  setelah proses *quenching*. Pada perlakuan panas kedua ini atom-atom mulai terdifusi secara halus dan merata membentuk endapan fase kedua. Proses ini disebut juga penuaan (*aging*), yang akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan. Peningkatan tersebut bergantung pada temperatur pengendapan  $T_2$  dan waktu penuaan. Penuaan itu sendiri terdapat dua

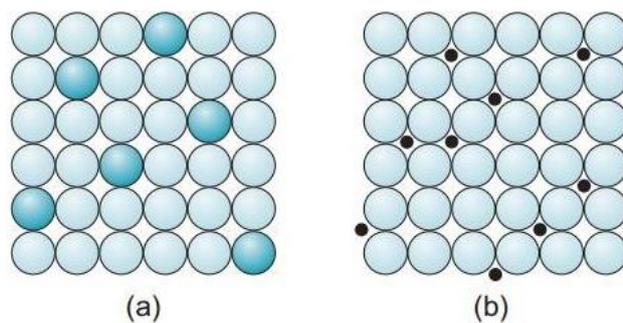
jenis yaitu *natural aging* dan *artificial aging*. *Natural aging* (penuaan alami) adalah proses penguatan paduan yang tidak melalui pemanasan. Penguatan yang dihasilkan tidak terlalu besar karena dilakukan dalam temperatur kamar sehingga memerlukan waktu yang cukup lama. *Artificial aging* (penuaan buatan) adalah proses penguatan paduan melalui pemanasan. Penguatan yang dihasilkan dapat dengan optimal apabila dilakukan pada temperatur sekitar 160 °C – 190 °C dan jangka waktu tertentu. Pada proses ini, endapan tersebar secara merata dan membentuk kelompok partikel [9]. Gambar 2.2 memperlihatkan diagram proses *precipitation hardening* yang melalui beberapa tahapan dimulai dari *solution heat treatment*, *quenching* dan *precipitation heat treatment*.



**Gambar 2.2** Diagram *Precipitation Hardening* [9]

### 2.3.3 Pengerasan larutan padat (*Solid solution Hardening*)

Pengerasan larutan padat terjadi ketika atom dari unsur paduan masuk ke dalam larutan yang mengakibatkan tegangan antar kisi di sekeliling atom induknya. Mekanisme pengerasan larutan padat terjadi ketika Atom dari unsur paduan berinteraksi dengan bidang dislokasi yang menyebabkan regangan pada struktur kristal sehingga menghambat pergerakan dislokasi dan membuat logam menjadi lebih kuat. mekanisme pengerasan larutan padat memiliki dua jenis mekanisme tergantung dari ukuran atom yang larut pada larutan padat yaitu substitusi dan interstisi. Substitusi terjadi ketika atom memiliki ukuran yang sama sedangkan interstisi terjadi ketika atom memiliki ukuran yang lebih kecil atau lebih besar [8].



**Gambar 2.3** (a) Substitusi (b) Interstisi [8]

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

Pengerasan regangan adalah fenomena dimana logam ulet menjadi lebih keras dan lebih kuat yang disebabkan oleh deformasi plastis. Pengerasan regangan biasa disebut juga sebagai *cold working* yang dikarenakan proses yang terjadi dikerjakan pada suhu yang relatif dingin terhadap suhu leleh mutlak logam. Pada proses *cold working* sebagian besar dilakukan pada suhu

kamar. Fenomena pengerasan regangan memiliki mekanisme yang terjadi karena perubahan dislokasi pada medan yang terjadi regangan. Densitas dislokasi dalam logam meningkat dengan terjadinya deformasi plastis selama pengerjaan dingin. Hal ini menyebabkan pembentukan dan penggandaan dislokasi baru pada struktur kristal. Pengerjaan dingin juga menyebabkan bentuk butir logam yang memipih dan dislokasi menjadi berdekatan antara satu sama lain. Akibat peningkatan jumlah dan kerapatan dislokasi menyebabkan energi yang dibutuhkan untuk terjadinya deformasi plastis lebih besar yang berarti kekerasan dan kekuatan logam mengalami peningkatan. Semakin tinggi pengerjaan dingin yang dilakukan maka densitas dislokasi akan semakin tinggi sehingga kekuatan dan kekerasan logam akan semakin tinggi namun hal ini dibayar dengan pengurangan elongasi pada logam [8].

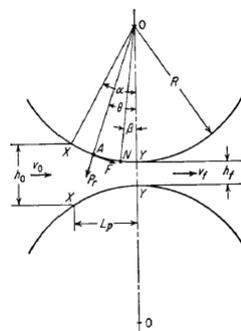
#### **2.4 Pengerolan Logam**

Pengerolan adalah metode yang dilakukan untuk mendeformasi plastis logam dengan gaya kompresi antara 2 rol yang berputar konstan. Gaya ini akan mereduksi ketebalan logam dan mempengaruhi struktur butirnya. Reduksi ketebalan ini dapat diukur dengan melihat perbedaan ketebalan sebelum dan sesudah reduksi. Selama operasi pengerolan logam, bentuk geometri benda kerja berubah tapi volumenya tetap sama [10].

Berdasarkan temperatur kerjanya, proses pengerolan logam dibagi menjadi *hot rolling* dan *cold rolling*. *Hot rolling* merupakan proses pengerolan logam

dimana benda kerja sebelum dirol dipanaskan sampai di atas temperatur rekristalisasinya. Pemanasan di atas temperatur rekristalisasinya ini akan memberikan reduksi ketebalan yang besar dan tidak terjadi fenomena *strain hardening* namun akan membuat logam menjadi lebih tangguh dan ulet. Selain itu, *hot rolling* dapat menimbulkan toleransi dimensi yang besar dan permukaan benda kerja menjadi kasar [10].

*Cold rolling* merupakan proses pengerolan logam pada temperatur di bawah temperatur rekristalisasinya. Proses *cold rolling* ini akan memberikan produk hasil pengerolan memiliki toleransi dimensi yang sempit dan permukaan benda kerja menjadi halus. Namun *cold rolling* ini dapat menimbulkan fenomena *strain hardening* yang mana membuat kekuatan dan kekerasan logam meningkat namun elongasinya menurun. *Cold rolling* membutuhkan gaya yang lebih tinggi dibandingkan dengan *hot rolling*. Pada proses pengerolan logam terdapat dua gaya yang bekerja, yaitu gaya radial ( $P_r$ ) dan gaya tangensial ( $F$ ). Arah gaya radial keluar bidang lingkaran pada rol sedangkan arah gaya tangensial tegak lurus terhadap gaya radial [10]. Gaya-gaya yang terjadi pada proses pengerolan dapat dilihat pada Gambar 2.4



**Gambar 2.4** Gaya-gaya selama pengerolan [10]

Keterangan :

$h_o$  = tebal awal spesimen

$h_f$  = tebal akhir spesimen

$P_r$  = gaya radial

$F$  = gaya gesek tangensial

$L_p$  = panjang kontak spesimen dan rol

$V_o$  = kecepatan awal spesimen

$N$  = titik netral

$v_f$  = kecepatan akhir spesimen

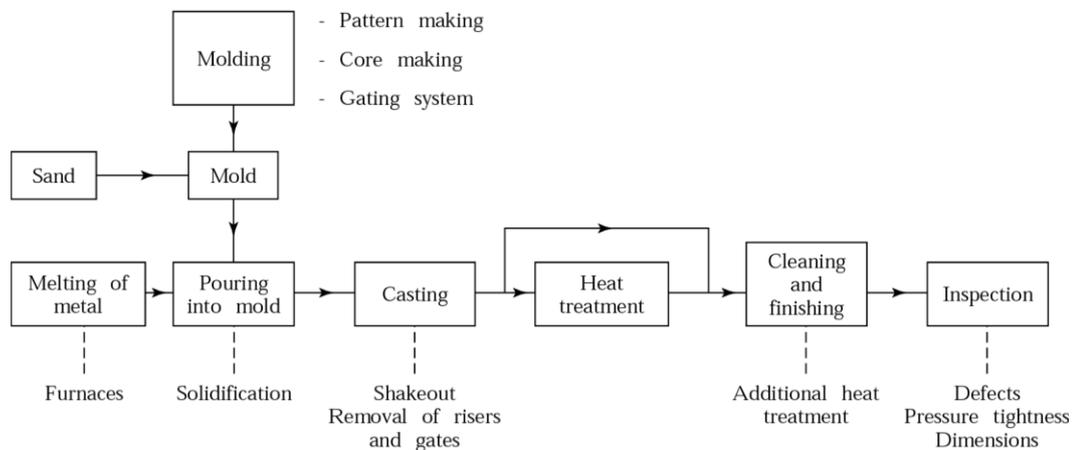
$R$  = jari-jari rol

$\alpha$  = sudut kontak

Titik netral merupakan titik dimana kecepatan rol sama dengan kecepatan pelat. Antara bidang masuk dan titik netral, kecepatan benda lebih rendah daripada kecepatan rol sehingga gaya gesek tangensial searah pengerolan. Sedangkan antara titik netral dan bidang keluar, kecepatan benda lebih besar daripada kecepatan rol sehingga gaya gesek tangensial berlawanan arah pengerolan. Secara garis besar, cacat pada proses pengerolan antara lain *roll flattening* dan *roll bending*. *Roll flattening* merupakan cacat berupa rol lebih datar akibat kekerasan benda kerja lebih besar dari rol. Sedangkan *roll bending* merupakan fenomena cacat benda kerja yang menjadi bengkok karena gaya tarik di tepi benda kerja lebih besar daripada bagian tengah [10].

## 2.5 Pengecoran Logam

Pengecoran logam merupakan salah satu proses manufaktur untuk membuat suatu produk atau benda kerja dengan cara meleburkan logam pada suatu tungku peleburan kemudian menuangkannya ke dalam rongga cetakan dan membiarkannya hingga terjadi solidifikasi. Proses pengecoran logam merupakan proses yang praktis dan cukup mudah jika dibandingkan dengan proses manufaktur lainnya [11]. Secara garis besar, proses pengecoran logam terdiri dari beberapa tahap yang seperti pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2.5** Alur proses pengecoran logam [11]

Dari Gambar 2.5 proses pengecoran logam terdiri dari beberapa tahapan yang perlu dilakukan yaitu :

### A. *Molding*

Proses *molding* adalah proses yang dilakukan sebelum proses pengecoran logam. Proses *molding* terdiri dari perencanaan seperti pembuatan pola, pembuatan inti, dan sistem saluran masuk. Perencanaan ini terdiri atas pembuatan desain dan rancangan dari pola, inti, dan sistem saluran masuk

yang mengacu pada desain benda kerja yang telah dibuat sebelumnya untuk membuat cetakan. Setelah itu dapat menentukan bahan dari cetakan tersebut (*expandable mold* atau *permanent mold*) [11].

#### B. *Mold*

Hasil akhir proses *molding* berupa cetakan (*mold*) yang akan dipakai untuk proses pengecoran. Cetakan dibuat dari bahan-bahan tertentu, tergantung dari jenis pengecoran dipilih. Jenis cetakan ada dua yaitu *expandable mold* dan *permanent mold*. *Expandable mold* merupakan cetakan pengecoran logam yang hanya dapat digunakan satu kali untuk proses pengecoran sehingga perlu dilakukan proses daur ulang. Berbeda dengan *expandable mold*, *permanent mold* merupakan cetakan yang dapat dipakai berulang-ulang. Cetakan untuk jenis pengecoran ini biasanya menggunakan material seperti besi cor, baja, kuningan, grafit, dan logam-logam paduan yang memiliki suhu leleh yang lebih tinggi dari bahan yang digunakan [11].

#### C. *Pouring*

Setelah memiliki kedua bahan utama yaitu logam cair dan cetakan, selanjutnya logam cair dituang ke dalam cetakan yang telah dibuat dengan temperatur penuangan tertentu, sesuai dengan jenis material yang digunakan. Kecepatan penuangan juga perlu diperhatikan karena dapat mempengaruhi fluiditas dari logam cair itu sendiri dan menyebabkan pendinginan prematur (*cold shuts*) [11].

#### D. *Casting*

Logam cair yang dituangkan kemudian dibiarkan selama beberapa saat hingga terjadi solidifikasi. Selanjutnya, dilakukan pemisahan hasil coran (*casting*) dari cetakannya [11].

#### E. *Heat Treatment*

Proses perlakuan panas (*heat treatment*) di sini merupakan proses opsional, yang artinya hanya dilakukan jika diperlukan. Tujuan dari proses *heat treatment* ini adalah untuk mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan, yang belum didapatkan dari proses pengecoran [11].

#### F. *Cleaning & Finishing*

Produk hasil coran selanjutnya dibersihkan dan dilakukan *finishing* untuk memperbaiki kualitas dan menyempurnakan produk agar sesuai dengan rancangan atau desain awal. Dapat juga dilakukan proses perlakuan panas tambahan apabila diperlukan [11].

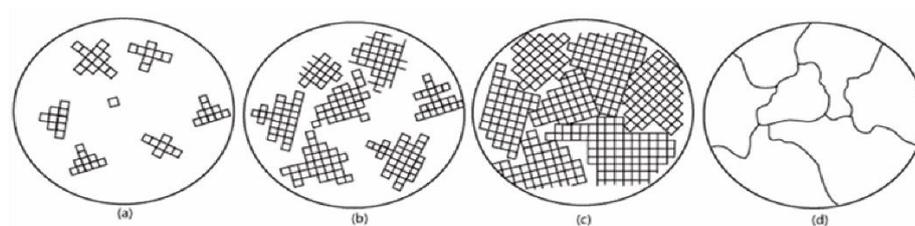
#### G. *Inspection*

Tahap terakhir merupakan tahap inspeksi (*inspection*) yang terdiri atas pengecekan cacat coran, pengukuran dimensi, dan sebagainya. Tujuan dari proses ini adalah untuk mengetahui kualitas dari produk hasil coran, untuk menentukan apakah produk tersebut layak untuk digunakan atau tidak [11].

### **2.6 Mekanisme Solidifikasi Pada Pengecoran Logam**

Mekanisme pembekuan logam cair pada proses pengecoran logam diawali dengan tumbuhnya inti-inti kristal (nukleasi). Setelah inti-inti kristal tersebut

muncul lalu kristal-kristal akan tumbuh dari inti tersebut diikuti dengan inti baru yang muncul pada saat yang sama. Ketika logam cair menjadi beku sepenuhnya maka kristal-kristal yang telah tumbuh akan membentuk susunan kelompok-kelompok kristal yang dibatasi oleh batas butir. Ukuran butir kristal tergantung pada laju pengintian dan pertumbuhan inti. Apabila laju pertumbuhan lebih besar dari laju pengintian, maka akan didapatkan kelompok butir-butir kristal yang besar dan apabila laju pengintian lebih besar dari laju pertumbuhan maka akan didapatkan kelompok butir-butir kristal halus. Adapun proses-prosesnya dapat dilihat pada Gambar 2.6 menjelaskan tentang skema pembentukan logam, (a) inti mulai terbentuk, (b) butir mulai tumbuh, (c) butir mulai menumbuk satu sama lain dan (d) batas butir mulai terbentuk [12].

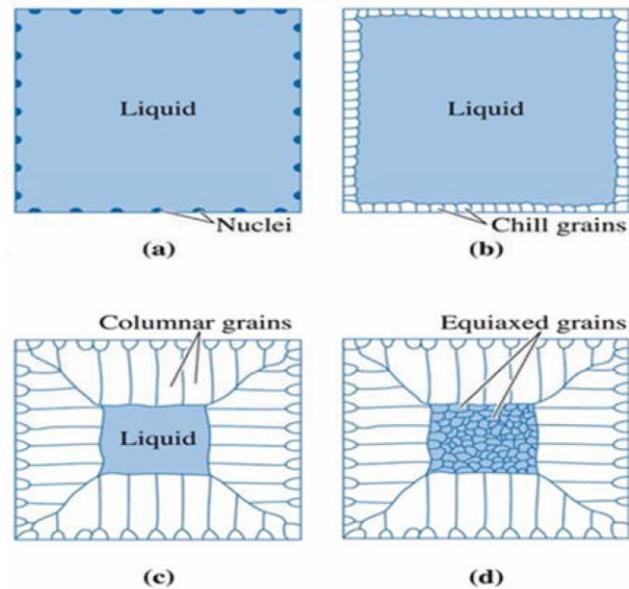


**Gambar 2.6** Skema Pembentukan Logam [12]

Pada proses solidifikasi di pengecoran logam, pada umumnya proses solidifikasi dimulai dari permukaan cetakan yang dikarenakan panas dari logam cair pertama kali akan diserap oleh permukaan cetakan. Logam cair yang kontak langsung dengan cetakan akan mengalami pembekuan terlebih dahulu dibandingkan dengan logam cair yang tidak kontak langsung dengan cetakan. Hal ini menyebabkan inti-inti kristal tumbuh ke arah dalam cetakan. Kristal-kristal tumbuh dari inti asal mengarah ke bagian dalam coran dan butir-butir kristal tersebut akan

berbentuk memanjang seperti kolom yang disebut dengan struktur *columnar* [12].

Mekanisme solidifikasi secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** (a) nukleasi dimulai, (b) pembentukan *chill zone*, (c) pembentukan *columnar*, dan (d) pembentukan daerah *equiaxed* [12]

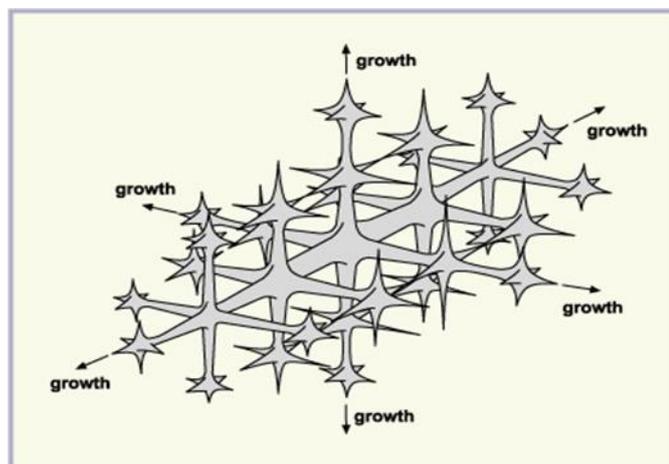
Gambar 2.7 menjelaskan tentang mekanisme solidifikasi pada proses pembekuan logam. Dari Gambar 2.7, kita dapat melihat bentuk mikrostruktur yang dihasilkan selama proses pembekuan berlangsung, antara lain : [12].

1. *Chill zone*, daerah pendinginan cepat sehingga sering dihasilkan struktur yang berbutir halus tergantung dari perbedaan temperatur antara cetakan dan logam cair.
2. *Columnar zone*, daerah perpanjangan *chill* yang dikontrol oleh kecepatan perpindahan panas akibat adanya pertumbuhan kontinyu dari daerah *chill*.

3. *Equiaxed zone*, struktur yang berorientasi acak akibat adanya perbedaan temperatur yang kecil antara *solid* dan *liquid* sehingga pendinginan lanjut konstitusional menjadi efektif bagi proses nukleasi kristal-kristal baru.

## 2.7 Struktur Dendrit

Struktur dendrit merupakan suatu struktur yang khas pada produk hasil pengecoran. Struktur dendrit menyerupai bentuk pohon atau ranting dengan banyak cabang yang menyebar dari pusat pertumbuhan. Struktur dendrit tidak diharapkan selama proses pengecoran logam dikarenakan dapat menurunkan sifat mekanik dari bahan coran. Struktur dendrit dapat dihilangkan dengan proses perlakuan panas berupa homogenisasi. Struktur dendrit terbentuk ketika kecepatan pendinginan di *interface* antara logam cair dengan cetakan berlangsung dengan cepat sehingga terbentuk struktur yang bercabang-cabang yang umumnya mengikuti arah kristalografi tertentu yang dapat dilihat pada Gambar 2.8 [12].

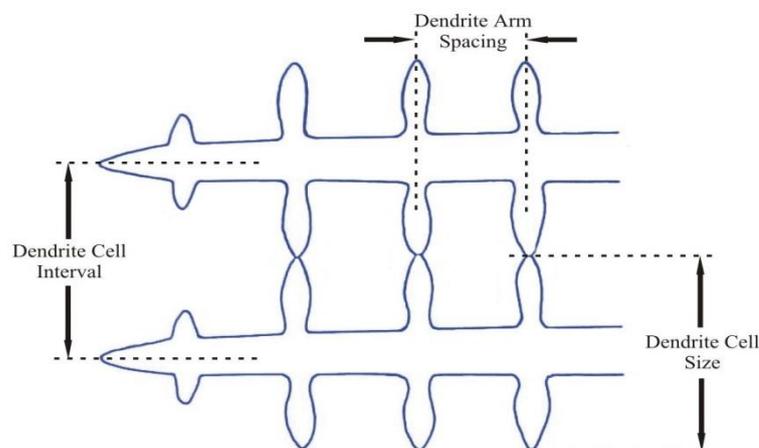


**Gambar 2.8** Struktur dendrit yang sedang tumbuh [12]

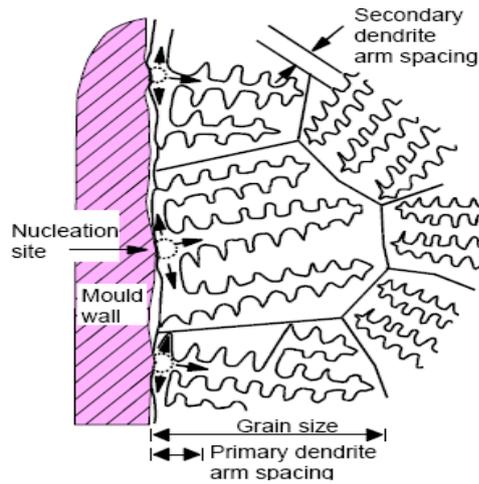
Ada beberapa hal penting yang menjadi acuan dalam menjelaskan karakteristik dendrit terdapat dalam Gambar 2.8, antara lain :

1. Jarak lengan dendrit, jarak antar lengan sekunder dendrit.
2. Jarak sel dendrit, jarak antara garis sumbu dendrit yang saling berdekatan.
3. Ukuran sel dendrit, lebar dendrit.

Jarak lengan dendrit atau *dendrite arm spacing* (DAS) ini dipengaruhi oleh kecepatan proses pembekuan pada pengecoran logam. DAS ini dihitung dari tengah cabang dendrit ke tengah cabang dendrit yang lain. Nilai DAS ini sangat berpengaruh terhadap sifat fisik dan mekanik pada suatu paduan logam. Nilai DAS yang semakin besar mengindikasikan struktur mikro yang kasar sehingga dapat disimpulkan bahwa sifat mekanik yang terbentuk tidak begitu baik. Sedangkan nilai DAS yang kecil mengindikasikan bahwa struktur mikro yang terbentuk halus sehingga sifat mekanik yang dihasilkan cukup baik. Pada Gambar 2.9 menjelaskan komponen-komponen dendrit dan Gambar 2.10 menjelaskan tentang mekanisme pembentukan DAS [12].



**Gambar 2.9** Komponen-komponen dendrit [12]



**Gambar 2.10** Proses pembentukan dendrit [12]

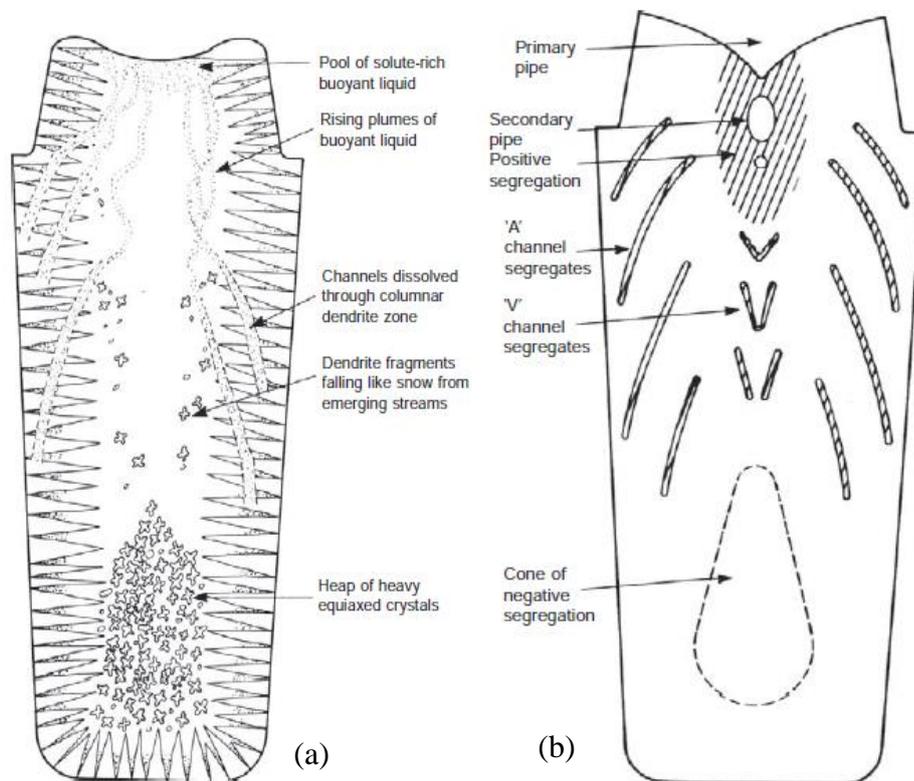
## 2.8 Segregasi Pada Pengecoran Logam

Segregasi pada pengecoran adalah fenomena di mana komponen atau elemen dalam logam cair tidak terdistribusi secara merata selama solidifikasi. Segregasi ini dapat menyebabkan variasi komposisi kimia dan sifat mekanik dalam material cor. Segregasi secara umum dapat dipengaruhi oleh laju pendinginan, gradien temperatur antara cetakan dan logam cair, komposisi pada paduan dan cetakan yang digunakan selama proses pengecoran. Segregasi dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu : [13].

### 1. Segregasi makro (*Macrosegregation*)

Segregasi yang terjadi pada skala besar dan dapat mempengaruhi seluruh bagian pengecoran. Disebabkan karena perbedaan pendinginan dan solidifikasi di berbagai bagian cetakan. Bagian yang mendingin lebih cepat cenderung memiliki komposisi berbeda dari bagian yang mendingin lebih lambat. Segregasi makro dapat menyebabkan variasi signifikan dalam sifat mekanik

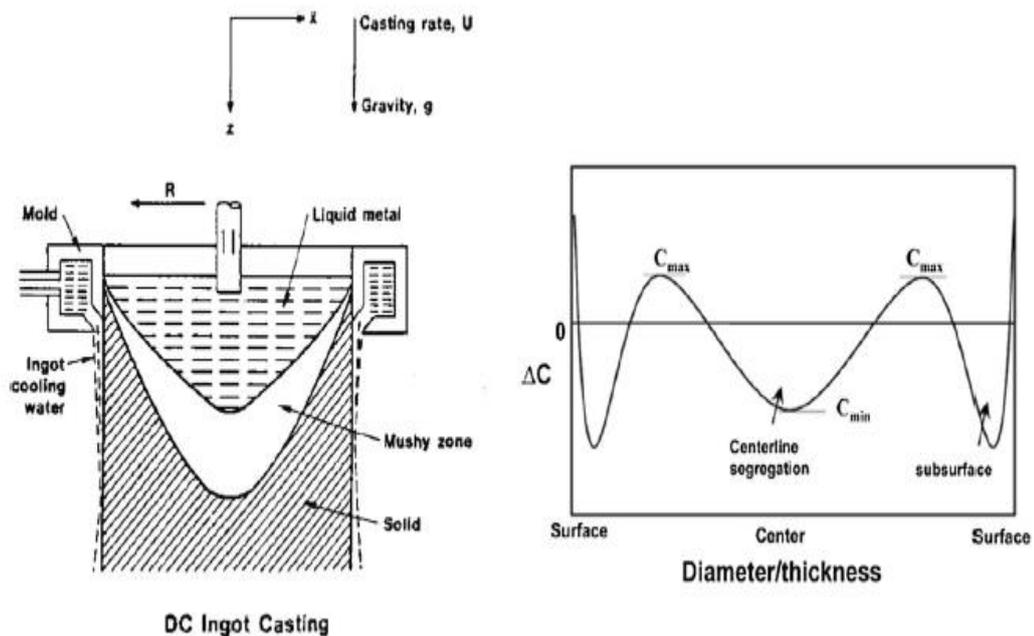
dan kimia material di berbagai bagian pengecoran, yang dapat mempengaruhi performa keseluruhan komponen [13]. Untuk contoh ilustrasi segregasi makro yang terjadi pada ingot baja dapat dilihat pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Proses terjadinya segregasi makro pada ingot baja  
(a) selama solidifikasi (b) Ingot yang sudah jadi [13]

Pada Gambar 2.11 dapat dilihat, ketika logam cair baja yang mengandung unsur paduan seperti karbon, sulfur, dan fosfor dituangkan pada bagian atas cetakan ingot dan mengisi seluruh ruang cetakan, maka akan terbentuk segregasi pada bagian atas ingot. Hal ini disebabkan unsur-unsur paduan seperti karbon, sulfur, dan fosfor memiliki densitas dan titik leleh yang lebih rendah dari baja. Akibat densitas dan titik leleh yang lebih rendah tersebut ketika logam cair mengalir akan membentuk saluran yang bercabang-cabang dan dapat

melarutkan dendrit-dendrit pada daerah *columnar zone* yang dapat dilihat pada Gambar 2.11(a). Akibat pergerakan aliran logam tersebut selama proses solidifikasi akan membentuk makrosegregasi seperti huruf A dan huruf V dan terbentuknya daerah positif makrosegregasi pada bagian atas ingot dan daerah negatif segregasi pada bagian bawah ingot yang dapat dilihat pada Gambar 2.11(b) [13]. Untuk ilustrasi makrosegregasi pada paduan aluminium DC *cast* dapat dilihat pada Gambar 2.12.



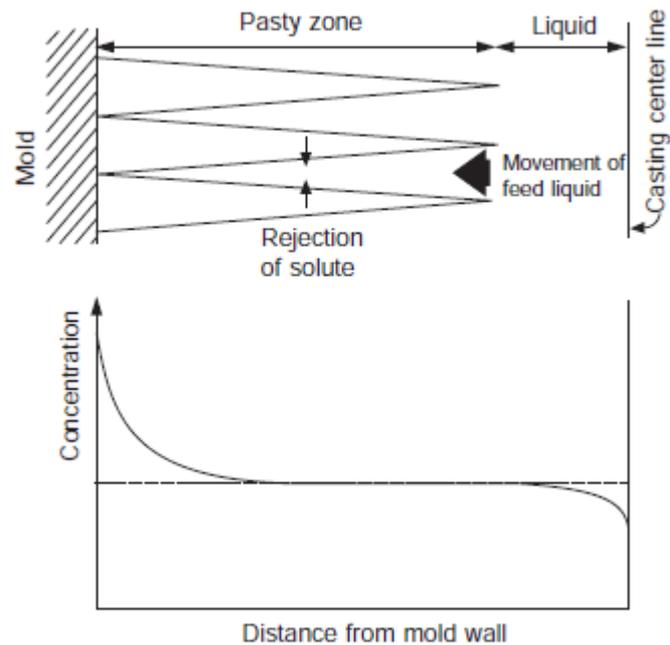
**Gambar 2.12** segregasi makro pada aluminium DC (*Direct Chill*) *cast* pada bagian kiri skema proses dan bagian kanan profil segregasi [14]

Pada aluminium DC (*Direct Chill*) terdapat segregasi yang terbentuk selama proses pendorongan logam cair ke dalam cetakan. Dapat dilihat pada Gambar 2.12 di sebelah kiri merupakan skema terbentuknya segregasi, yang mana ketika logam cair diberikan tekanan atau didorong ke dalam cetakan maka terjadi

perbedaan temperatur antara logam cair yang berada di bagian atas dan logam cair yang berada di bagian bawah. Akibat perbedaan temperatur tersebut mengakibatkan terbentuknya *mushy zone* atau zona campuran cair dan padat yang berada pada bagian tengah dari logam aluminium. Pada Gambar 2.12 di sebelah kanan dapat dilihat grafik hubungan derajat segregasi ( $\Delta C$ ) terhadap daerah logam. Dapat dilihat pada grafik terdapat adanya segregasi makro yang berupa *centerline segregation* pada daerah *mushy zone* yang terbentuk selama proses *direct chill casting* [14].

## 2. Segregasi mikro (*Microsegregation*)

Segregasi mikro terjadi pada skala kecil, di dalam dendrit atau antara dendrit (interdendritik). Segregasi ini disebabkan oleh perbedaan kecepatan difusi elemen selama solidifikasi. Unsur-unsur dengan difusivitas lebih rendah cenderung terjebak di antara dendrit. Segregasi mikro dapat menyebabkan variasi komposisi kimia pada skala mikro, yang mempengaruhi kekuatan, keuletan, dan ketahanan korosi. Partikel – partikel dari unsur – unsur paduan cenderung akan terperangkap selama proses solidifikasi pada lengan – lengan dendrit [13]. atau Untuk ilustrasi mikrosegregasi secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.13.

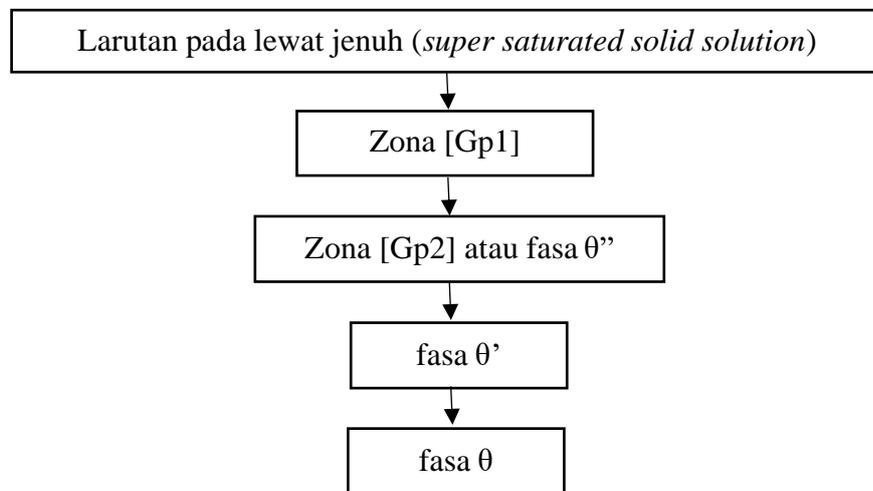


**Gambar 2.13** Mikrosegregasi pada dendrit [13]

## 2.9 Pengaruh Waktu *Aging* Pada Sifat Mekanik Aluminium

Lamanya waktu *aging* pada aluminium dapat mempengaruhi sifat mekanik dari aluminium. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan presipitat selama proses *aging* berlangsung. Proses *aging* dibagi menjadi 2 jenis yaitu *natural aging* dan *artificial aging*. *Natural aging* adalah *aging* untuk paduan aluminium yang di *age hardening* dalam keadaan dingin. *Natural aging* berlangsung pada temperatur ruang antara 15 °C - 25 °C dan dengan waktu penahanan 5 sampai 8 hari. *Artificial aging* adalah *aging* untuk paduan aluminium yang di *age hardening* dalam keadaan panas. *Artificial aging* berlangsung pada temperatur antara 100 °C - 200 °C dan dengan lamanya waktu penahanan antara 1 sampai 24 jam. Pengambilan temperatur *artificial aging* pada temperatur antara 100 °C - 200 °C akan berpengaruh pada tingkat kekerasan sebab pada proses *artificial aging* akan terjadi perubahan-perubahan fasa atau struktur.

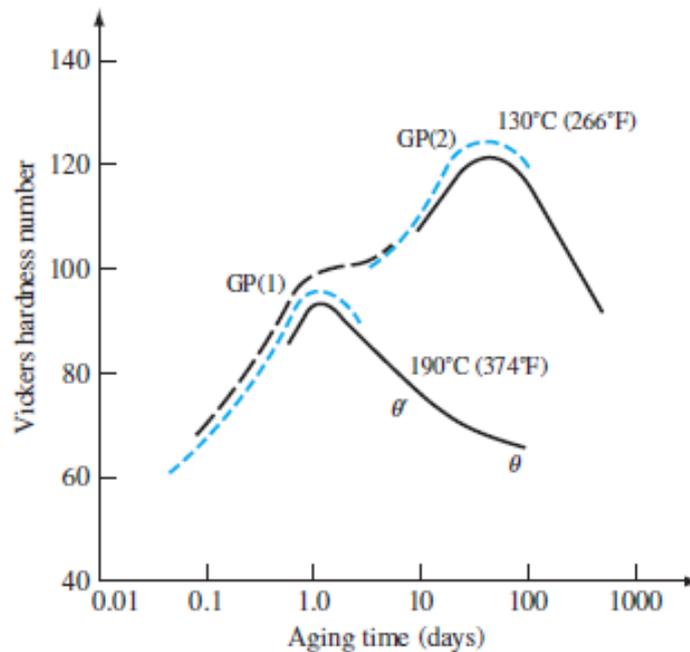
Perubahan fasa tersebut akan memberikan sumbangan terhadap pengerasan [15]. Berikut pada Gambar 2.14 merupakan diagram urutan perubahan fasa yang terjadi pada proses *artificial aging*.



**Gambar 2.14** Diagram perubahan fasa di proses artificial aging [15]

Pada gambar diagram di atas dapat menjelaskan beberapa tahapan fasa yang terbentuk pada proses *artificial aging*, Pada awal-awal tahap *artificial aging* struktur atau fasanya masih berupa larutan padat lewat jenuh (*Super Saturated Solid Solution*). Seiring dengan penambahan waktu penuaan atau ketika penuaan sampai di daerah *under aged*, maka mulai terbentuk zona presipitat zona [GP 1] dan paduan aluminium menjadi agak kuat dan keras. Ketika waktu *aging* ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *peak aged*. Pada daerah *peak aged* presipitat mengumpul atau mulai paduan aluminium yang optimal. Apabila setelah mencapai *peak aged* (puncak penuaan) waktu *artificial aging* masih ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *over aged*. Pada daerah *over aged* ini akan didapatkan fasa  $\theta$ , jika fasa  $\theta$  ini terbentuk maka akan menyebabkan paduan aluminium menjadi lunak kembali dan berkurang

kekerasannya [16]. Pada kurva penuaan di Gambar 2.15 menjelaskan hubungan lamanya waktu *aging* dengan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium.



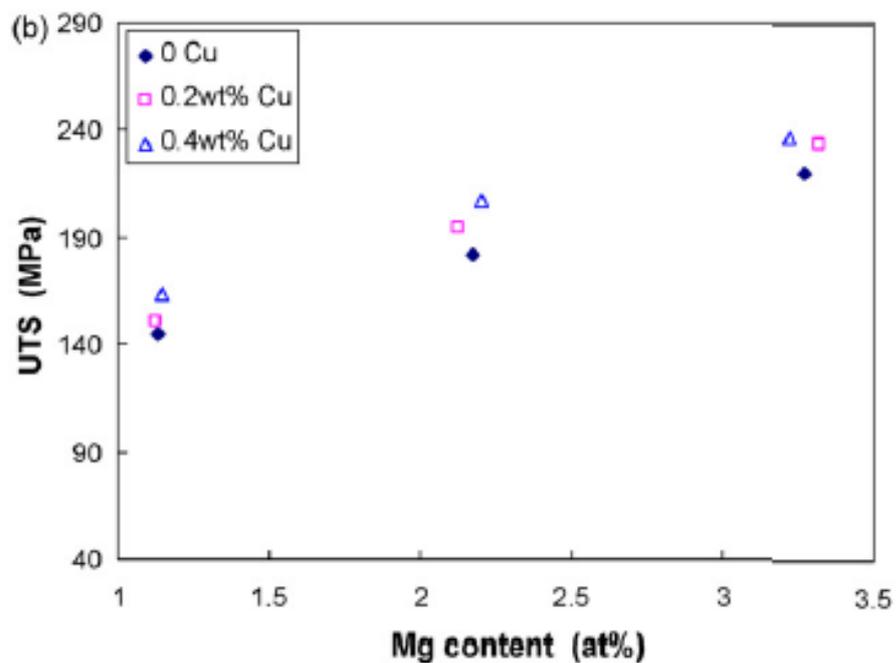
**Gambar 2.15** Hubungan antara lamanya waktu *aging* dengan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium [16]

## 2.10 Pengaruh Penambahan Cu Pada Paduan Al-Mg

Penambahan unsur Cu dapat mengubah ketahanan paduan Al-Mg terhadap korosi, yang mana penambahan Cu sebesar 0,33% pada paduan AA 5023 dapat sedikit meningkatkan ketahanan terhadap *pitting corrosion* dan *filiform corrosion* dalam jumlah yang dapat diterima [17]. Penambahan Cu dapat meningkatkan elongasi dan kuat tarik pada paduan AA 5083. Dengan penambahan Cu sebesar 0,6% elongasi paduan AA 5083 meningkat sebesar 3% dan kekuatannya meningkat menjadi 334 MPa yang awalnya 289 MPa [18]. Penambahan Cu sebesar 6% juga

dilaporkan dapat meningkatkan elongasi pada paduan Al-Mg yang ditambahkan unsur Zn sebesar 6% [19].

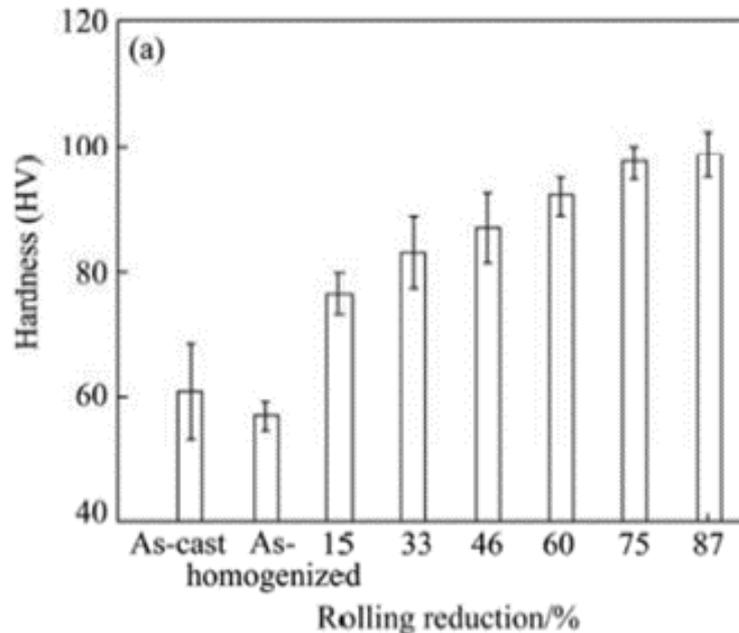
Penambahan Cu pada paduan Al-Mg dapat meningkatkan sifat kekerasan ketika dilakukan proses *aging*, yang mana dengan penambahan Cu dari 0,2 % menjadi 0,4% kekerasan paduan meningkat dari 63 HV menjadi 77,4 HV ketika di *aging* pada suhu 200°C selama 16 jam [20]. Pengaruh Penambahan unsur Cu pada paduan aluminium magnesium juga dapat meningkatkan sifat mekanik berupa kekuatan dari paduan ini. Unsur Cu dapat memperhalus butir paduan dan membentuk presipitat berupa  $Al_2Cu$  dan  $Al_2CuMg$  yang dapat memperkuat paduan [21]. Dapat dilihat pada Gambar 2.16 bahwa penambahan sejumlah kecil Cu sebesar 0,2% dan 0,4% sebagai fungsi kandungan Mg dapat meningkatkan kuat tariknya secara signifikan.



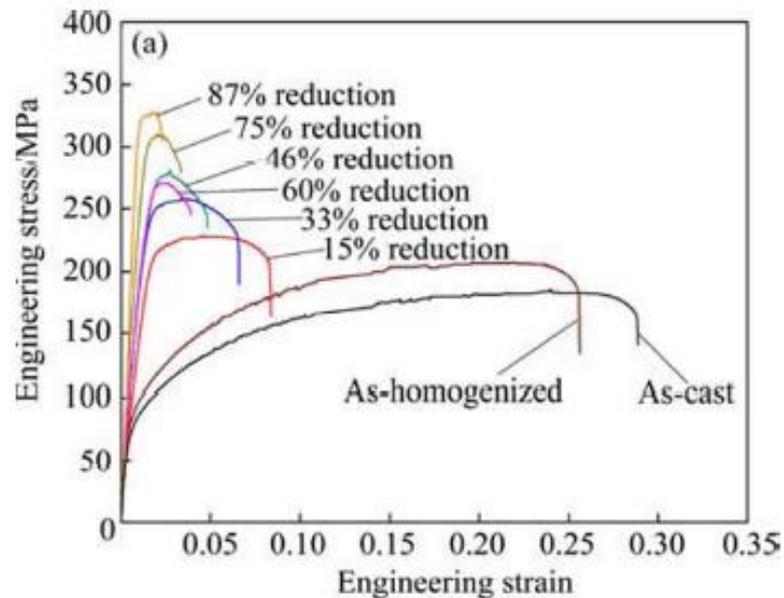
**Gambar 2.16** Kekuatan tarik sebagai fungsi kandungan Mg dalam paduan Al-Mg dengan berbagai kandungan Cu [21]

## 2.11 Pengaruh Pengerolan Dingin Pada Paduan Al-Mg

Pada paduan aluminium magnesium dapat ditingkatkan kekuatannya dengan cara pengerjaan dingin salah satunya adalah dengan pengerolan dingin. Proses pengerolan dingin pada paduan aluminium magnesium dapat meningkatkan kekerasan kuat tarik, kuat luluh dari paduan namun dapat mengurangi elongasi atau *ductility*. Selain meningkatkan kekuatan pengerolan dingin juga dapat meningkatkan *fatigue performance* dari paduan [22]. Pada paduan aluminium magnesium seri 5052 dengan variasi persen reduksi 15%, 33%, 46%, 60%, 75%, dan 87% didapatkan kenaikan nilai kekuatan dan kekerasan yang signifikan yang dapat dilihat pada Gambar 2.17 dan 2.18 [23].

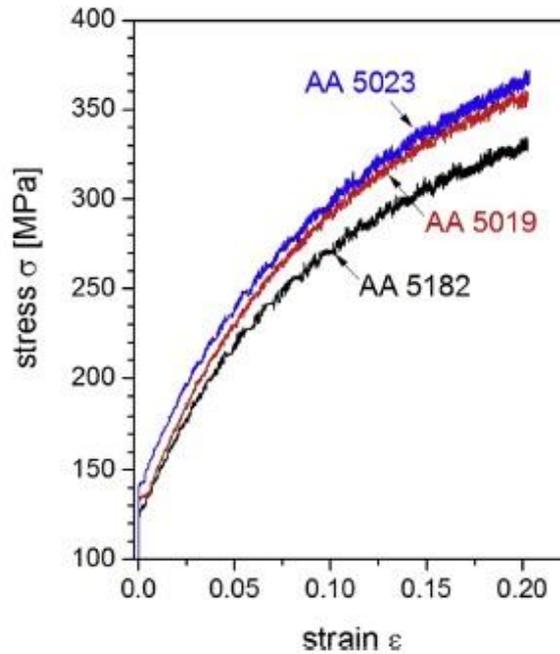


**Gambar 2.17** Variasi kekerasan dari berbagai persen reduksi [23]



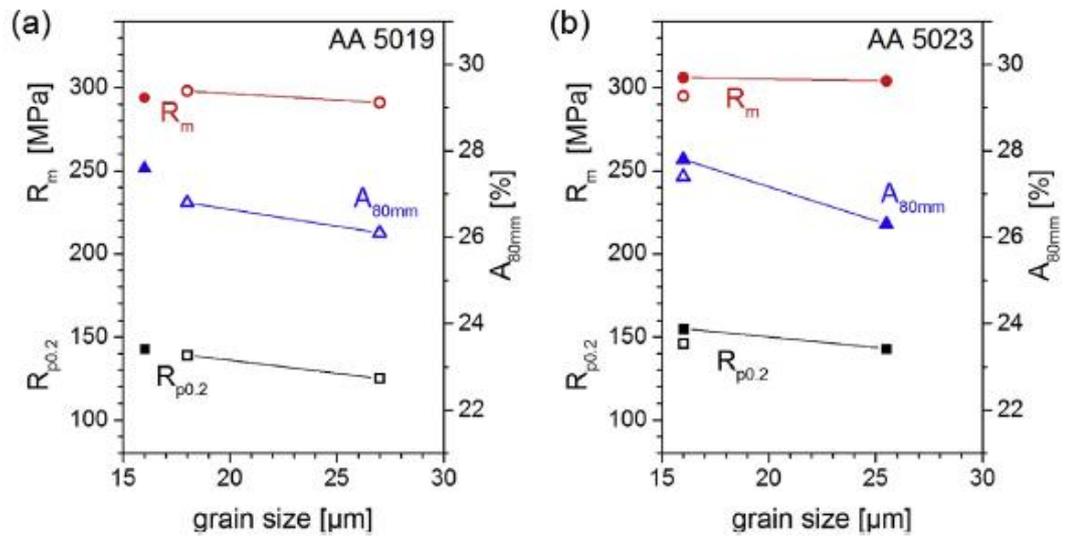
**Gambar 2.18** Variasi kekuatan dari berbagai persen reduksi [23]

Kandungan Cu pada paduan aluminium magnesium dapat mempengaruhi kekuatan dari paduan. Telah diteliti perbandingan kuat tarik antara paduan aluminium magnesium atau paduan seri 5 yaitu antara AA 5182, AA 5019, AA 5023. Perbedaan kandungan Cu antara ketiga paduan tersebut yaitu pada paduan AA 5019 kandungan Cu  $<0,10\%$ , paduan AA 5182 kandungan Cu  $<0,15\%$ , dan pada paduan AA 5023 kandungan Cu sebesar  $0,2\% - 0,5\%$ . Dapat dilihat pada Gambar 2.19 perbandingan grafik uji tarik pada ketiga paduan tersebut. Dari grafik dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kandungan Cu pada paduan aluminium magnesium maka akan semakin tinggi kekuatan dari paduan [17].



**Gambar 2.19** Variasi uji tarik dari berbagai paduan Seri 5 yang memiliki perbedaan persentase Cu [17]

Persen reduksi pengerolan dingin pada paduan aluminium magnesium juga dapat mempengaruhi kekuatan dari paduan. Terdapat perbedaan persen reduksi pengerolan pada paduan AA 5019 paduan AA 5023 yang mana pada kedua paduan memiliki variasi persen reduksi sebesar 46% dan 25%. Untuk paduan AA 5019 setelah dirol didapat ukuran butir sebesar 18 μm dan 27 μm. Untuk paduan AA 5023 memiliki ukuran butir yang lebih kecil yaitu 16 μ dan 25 μm [17]. Untuk grafik perbandingan nilai kuat tarik, kuat luluh, dan elongasi dapat dilihat pada Gambar 2.20.

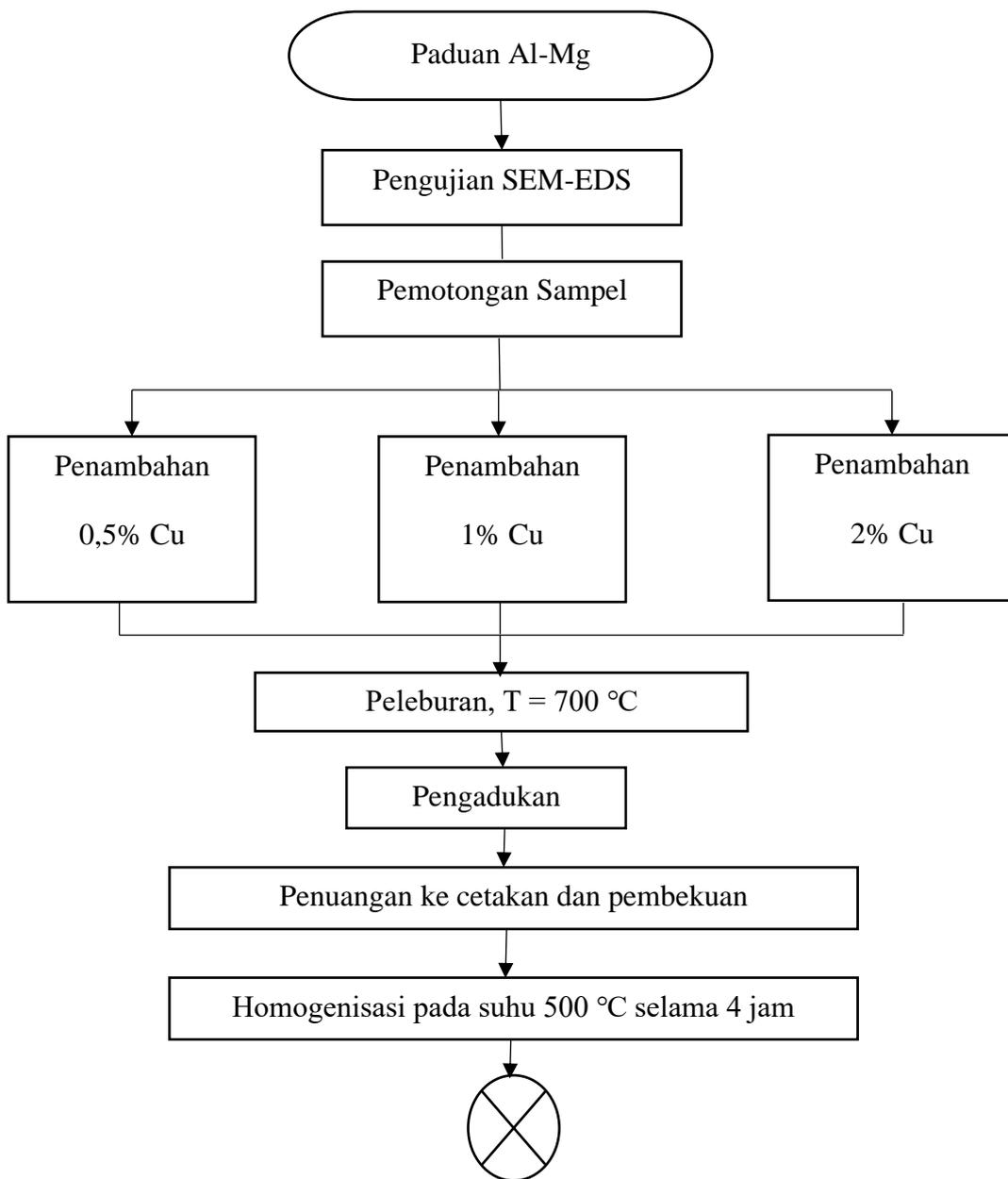


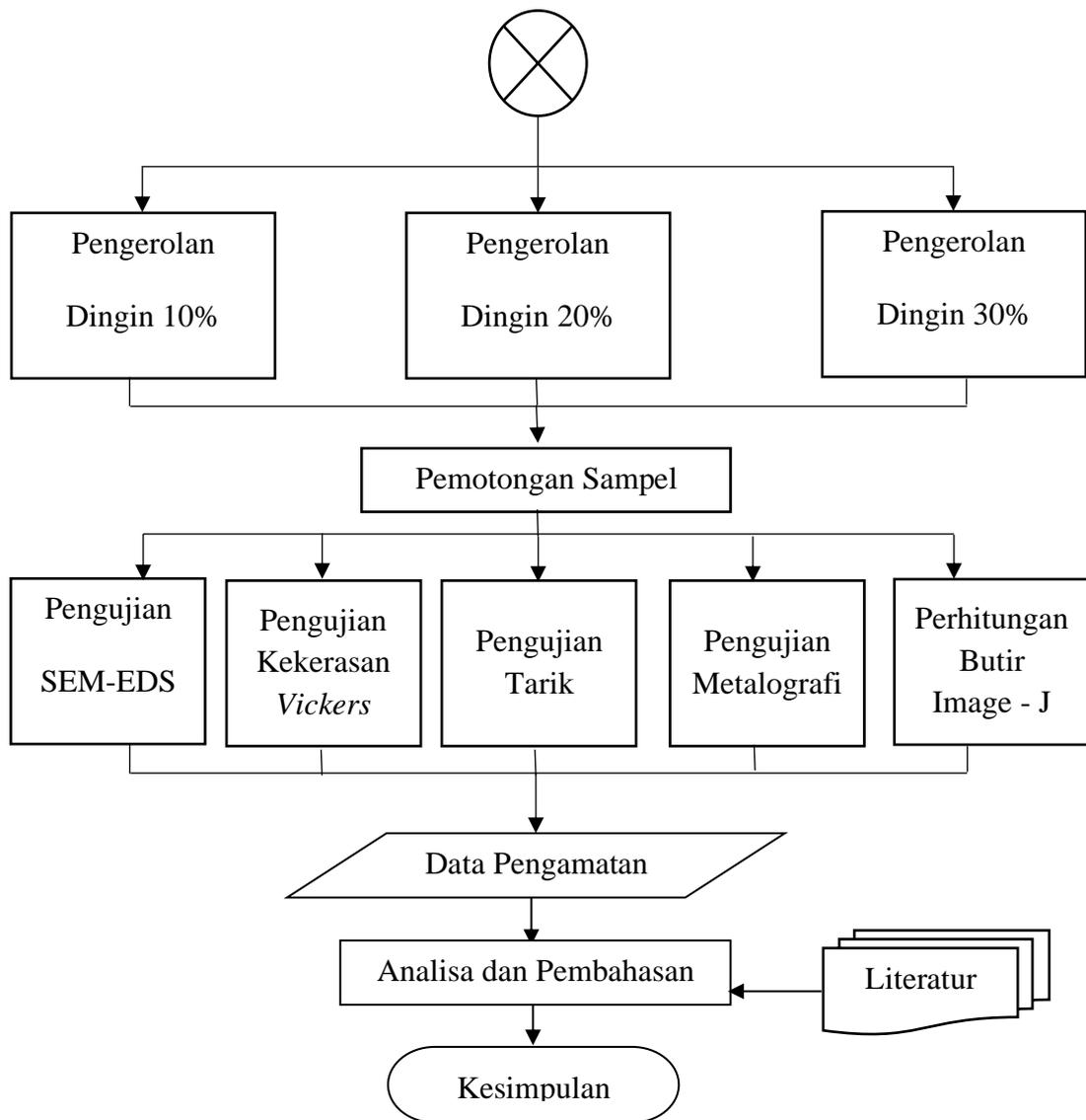
**Gambar 2.20** Perbandingan sifat mekanik  
 (a) Paduan AA 5019 (b) Paduan AA 5023 [17]

**BAB III**  
**METODE PENELITIAN**

**3.1 Diagram Alir Penelitian**

Adapun tahap-tahap penelitian yang akan dilakukan dapat diuraikan secara singkat menggunakan diagram penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.





**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

#### 3.2.1 Alat-alat yang Digunakan

Berikut ini merupakan alat-alat yang digunakan sebagai berikut :

1. Alat *Safety*

2. Krusibel
3. Tabung gas
4. Tungku peleburan
5. *Muffle Furnace 1*
6. *Muffle Furnace 2*
7. Alat Pengerolan Logam
8. Cetakan besi
9. Timbangan Digital
10. *Thermocouple*
11. Mikroskop Optik
12. Mesin *Hardness Vickers*.
13. Mesin Uji Tarik
14. Alat Uji SEM-EDS

### **3.2.2 Bahan-bahan yang Digunakan**

Berikut ini merupakan bahan-bahan yang digunakan sebagai berikut :

1. Aluminium Paduan Seri 5052
2. Aluminium Paduan Seri 2024

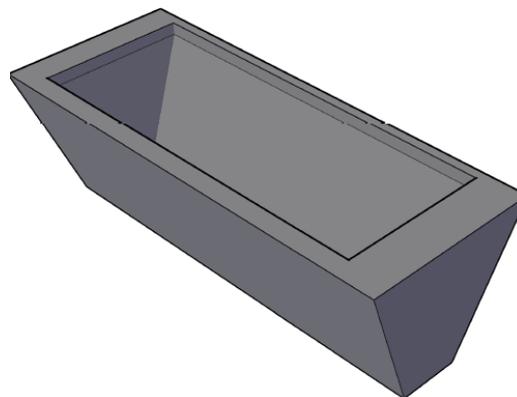
### **3.3 Prosedur Percobaan**

Adapun prosedur-prosedur penelitian yang dilakukan yaitu sebagai berikut :

#### **3.3.1 Prosedur Pengecoran Logam**

Pada penelitian kali ini dibuat 9 sampel dengan variasi penambahan Cu. Penelitian dilakukan di Laboratorium Metalurgi FT Untirta. Sampel

dibuat dengan menggunakan metode pengecoran menggunakan cetakan besi dan di rol pada suhu kamar menggunakan mesin rol. Bahan yang digunakan berupa paduan aluminium 5052 dan 2024. Sebelum kedua bahan dilakukan proses pengecoran kedua bahan di karakterisasi awal menggunakan metode SEM-EDS. Setelah kedua bahan di karakterisasi awal kemudian bahan dipotong-potong dan ditimbang sesuai dengan variasi penambahan Cu 0,5%, 1%, dan 2%. Kedua bahan yang telah dipotong dan ditimbang dilakukan proses peleburan pada suhu 700 °C. Selama proses peleburan logam cair dilakukan pengadukan dan pengambilan *scale* pada permukaan logam cair. Setelah logam telah melebur sepenuhnya dilakukan penuangan ke cetakan besi dan proses solidifikasi pada udara terbuka. Pada 3 sampel yang telah dicor dengan variasi penambahan Cu dilakukan karakterisasi akhir menggunakan SEM-EDS. Untuk ilustrasi desain cetakan besi yang digunakan selama proses pengecoran dapat dilihat pada Gambar 3.2



**Gambar 3.2** Ilustrasi Desain Cetakan Besi

### **3.3.2 Prosedur Pengerolan Dingin**

Untuk proses pengerolan dingin menggunakan mesin rol yang dilakukan di Laboratorium Metalurgi FT Untirta. Sampel hasil proses pengecoran kemudian dibubut menjadi bentuk plat. Dilakukan pengerolan dingin pada suhu kamar dengan variasi persen reduksi 10%, 20%, dan 30%. Setelah di rol, sampel dibubut kembali sehingga dapat dilakukan berbagai macam pengujian berupa uji keras, uji tarik, dan uji metalografi.

### **3.3.3 Prosedur Uji Metalografi**

Pengujian metalografi dilakukan di laboratorium PT Dirgantara Indonesia menggunakan standar ASTM E3. Pengujian diawali dengan pemotongan pada sampel sesuai dengan standar pengujian. Setelah dipotong, sampel kemudian dilakukan *mounting* menggunakan mesin *mounting*. Setelah sampel selesai di *mounting* dilakukan *grinding* pada mesin *grinding* dengan ukuran amplas 80#, 120#, 320#, 600#, 800#, 1000# dan 1200#. Setelah selesai di *grinding* dilakukan *polishing* menggunakan pasta alumina. Kemudian dilakukan etsa dengan mencelupkannya ke larutan kehrler lalu dicuci dengan air hangat dan dikeringkan. Sampel kemudian diambil gambar struktur mikronya menggunakan mikroskop optik dan diolah menggunakan *software imageJ*.

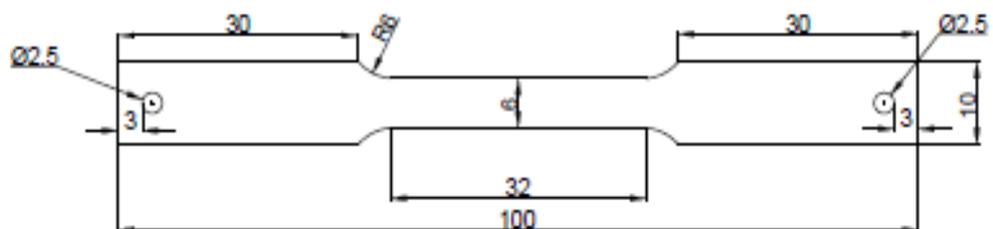
### **3.3.4 Prosedur Uji Keras**

Pengujian dilakukan di laboratorium PT Dirgantara Indonesia menggunakan standar ASTM E92 dengan metode *vickers*. Pengujian diawali dengan pemotongan pada sampel sesuai dengan standar pengujian. Setelah

dipotong, sampel ditandai sebanyak 5 titik yang akan dilakukan uji keras. Sampel diletakan pada *holder* mesin uji keras kemudian dilakukan uji keras pada 5 titik yang sudah ditandai dengan menggunakan bebas sebesar 10 gf. Setelah uji keras selesai, dilakukan analisa pada data uji keras yang telah diperoleh.

### 3.3.5 Prosedur Uji Tarik

Pengujian dilakukan di laboratorium PT Dirgantara Indonesia menggunakan standar ASTM E8. Pengujian diawali dengan pembuatan sampel dengan dimensi sesuai standar pengujian. Setelah sampel telah sesuai dengan standar pengujian. Sampel diletakan pada *grip* atas dan bawah mesin uji tarik. Kemudian dilakukan uji tarik dengan mengatur panjang serta luas penampang sampel pada mesin uji tarik. Pada uji tarik dilakukan pembebanan pada sampel hingga putus. Data berupa kurva uji tarik akan muncul pada mesin uji tarik. Dilakukan analisa pada data uji tarik yang telah diperoleh. Untuk dimensi sampel yang dilakukan uji tarik dapat dilihat pada Gambar 3.2



**Gambar 3.2** ASTM E8 untuk *subsize* spesimen

### 3.3.6 Pengujian SEM-EDS

Pengujian SEM-EDS (*Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X – Ray Spectroscopy*) memiliki fungsi untuk mengetahui keberadaan fasa presipitat, inklusi, dan komposisi dari sampel. Pengujian ini dilakukan di laboratorium material PT KNSS (Krakatau Nipon *Steel Synergy*). Pengujian SEM-EDS diawali dengan pemotongan sampel menjadi ukuran yang lebih kecil sehingga dapat ditempatkan pada *specimen holder* di dalam *vacum chamber*. Kemudian sampel dicuci menggunakan etanol dan dibilas dengan aquades. Setelah dicuci, sampel kemudian diletakan pada *specimen holder* di dalam *vacum chamber*. Proses pengamatan SEM-EDS dapat dimulai dengan mengaktifkan *vacum chamber* dan menembak elektron pada sampel yang berada di dalam *vacum chamber*. Data berupa gambar elektron, spektrum dan *mapping* unsur dapat diperoleh menggunakan *software* komputer yang telah terkoneksi dengan mesin SEM-EDS.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada penelitian kali ini bahan yang digunakan berupa aluminium seri 5052 sebagai *base material* dan aluminium seri 2024 sebagai campuran *masteralloy*. Kedua bahan dilakukan proses pengecoran logam dengan metode *casting* dengan dilakukannya variasi penambahan persen berat tembaga sebesar 0,5 %, 1%, dan 2%, setelah sampel dicetak dengan bentuk plat, sampel dilakukan proses pengerolan dingin dengan variasi persen reduksi sebesar 10%, 20%, dan 30%. Penambahan persen berat tembaga dan pengerolan dingin bertujuan untuk meningkatkan sifat-sifat mekanik dari *base material*. Setelah dilakukan proses pengecoran dan pengerolan dengan variasi yang telah dilakukan, didapatkan 9 sampel yang memiliki bentuk plat dengan masing-masing sampel memiliki perbedaan persen berat tembaga dan persen reduksi pengerolan dingin. Tahap selanjutnya dilakukan beberapa tahapan proses yang dilakukan seperti preparasi untuk dilakukan proses analisa data dari hasil pengujian komposisi kimia, uji kekerasan, uji tarik serta uji metalografi yang telah dilakukan.

#### **4.1 Karakterisasi Awal**

Karakterisasi awal yang dilakukan pada awal penelitian bertujuan untuk mengetahui komposisi paduan dari bahan yang dipakai sehingga dapat membandingkannya dengan paduan yang telah dilakukan proses penambahan persen tembaga. Pada penelitian kali ini menggunakan material aluminium seri

5052 sebagai *base material* dan aluminium seri 2024 sebagai campuran *masteralloy* yang berfungsi meningkatkan persen tembaga pada *base material*. Pada komposisi *base material* aluminium seri 5052, kandungan komposisi paduan diperoleh dari sertifikat material tersebut sedangkan untuk *masteralloy* aluminium seri 2024 nilai komposisinya diperoleh dari pengujian komposisi menggunakan alat SEM-EDS. Nilai kandungan komposisi pada *base material* aluminium seri 5052 dan *masteralloy* aluminium seri 2024 dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

**Tabel 4.1** Komposisi Kimia *Base Material* Aluminium Seri 5052

Unsur	Persentase Dalam Berat (%)	Nilai Maksimum (%)
Al	96,6	95,7 – 97,7
Mg	2,411	2,2 – 2,8
Cu	0,032	0,1
Si	0,112	0,25
Fe	0,331	0,4
Mn	0,063	0,1
Cr	0,177	0,15 – 0,35
Zn	0,047	0,1
<i>Other, each</i>	0,05	0,05
<i>Other, total</i>	0,15	0,15
Total	100	

**Tabel 4.2** Komposisi Kimia *Masteralloy* Aluminium Seri 2024

Unsur	Persentase Dalam Berat (%)
Al	74,18
Mg	2,19

**Tabel 4.2** (Lanjutan)

Unsur	Persentase dalam berat (%)
Cu	3,15
O	6,18
C	14,31
Total	100

Pada Tabel 4.1 Berdasarkan sertifikat material aluminium seri 5052 dapat disimpulkan bahwa bahan tersebut memiliki komposisi yang sesuai standar. Dapat dilihat pada Tabel 4.1 juga dapat dilihat kandungan unsur Mg pada bahan yaitu sebesar 2,6 % yang masuk di kisaran 2,2 % - 2,8 %. Kandungan unsur-unsur pengotor yang lain seperti Si, Fe, Mn, Cr, Zn, Cu persentase unsur-unsur tersebut tidak melebihi batas maksimumnya [24].

Pada Tabel 4.2 Berdasarkan hasil proses uji komposisi menggunakan SEM-EDS dapat disimpulkan bahwa pada *masteralloy* aluminium seri 2024 memiliki ketidakh murnian pada paduan tersebut yang dibuktikan dengan persentase kandungan Al yang cukup rendah yaitu sebesar 74,18 %. Pada Tabel 4.2 juga dapat dilihat terdapat kandungan berupa Oksigen sebesar 6,18 % dan karbon sebesar 14,31 %. Kandungan karbon dan oksigen pada *masteralloy* aluminium seri 2024 merupakan unsur-unsur inklusi yang terdapat pada paduan yang disebabkan oleh proses manufaktur yang kurang baik. Akibat kandungan unsur-unsur inklusi tersebut, kandungan unsur tembaga pada *masteralloy* aluminium seri 2024 persentasenya tidak memenuhi standar. Untuk standar kandungan unsur tembaga pada aluminium seri 2024 berdasarkan literatur yaitu berkisar antara 3,8 % - 4,9 %

[24]. Kandungan unsur tembaga pada *masteralloy* aluminium seri 2024 setelah di uji komposisi yaitu sebesar 3,15 % yang dapat diartikan kandungan unsur tembaga yang dimiliki berada di bawah ketentuan. Ketidaksesuaian nilai kandungan tembaga pada *masteralloy* aluminium seri 2024 bisa disebabkan oleh beberapa faktor yaitu ditemukannya unsur pengotor berupa inklusi yang cukup banyak saat proses pengujian komposisi dan segregasi sehingga kadar yang diperoleh kurang tepat.

#### 4.2 Karakterisasi Akhir

Pada 3 Sampel yang memiliki variasi penambahan persen berat tembaga yang telah melalui proses pengecoran dilakukan karakterisasi menggunakan alat SEM-EDS. Pada proses karakterisasi akhir bertujuan untuk membandingkan komposisi sampel yang telah dilakukan penambahan tembaga dengan komposisi *base material* yang belum dilakukan penambahan tembaga sehingga dapat memastikan komposisi sampel yang telah dibuat apakah telah sesuai dengan penambahan persen berat tembaga yang diinginkan. Hasil karakterisasi dari 3 sampel yang telah dilakukan penambahan persen berat tembaga dan *base material* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.3

**Tabel 4.3** Hasil Uji Komposisi Akhir

Sampel	Penambahan Berat Cu (%)	Unsur				
		Al	Cu	Mg	C	O
<i>Base Material</i>	0	96,6	0,01	2,6	<0,15	<0,15
1	0,5	90,39	0,66	2,03	4,80	2,12

**Tabel 4.3** (Lanjutan)

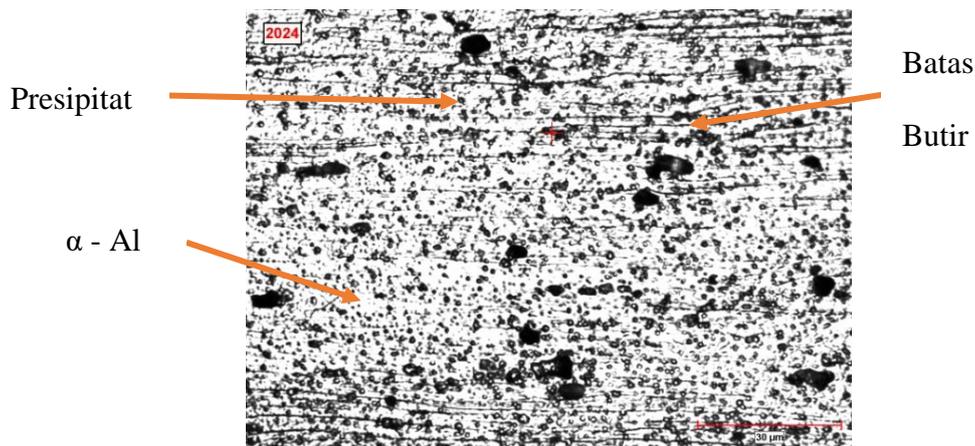
Sampel	Penambahan Berat Cu (%)	Unsur				
		Al	Cu	Mg	C	O
2	1	91,68	1,49	1,98	3,23	1,62
3	2	92,46	3,07	1,72	1,64	1,10

Dapat dilihat pada Tabel 4.3 komposisi kimia dari *base material* dan 3 sampel yang memiliki variasi penambahan berat tembaga diketahui bahwa penambahan berat tembaga yang dihasilkan tidak sesuai dari yang diharapkan. Pada ketiga sampel dengan penambahan berat tembaga yang masing-masing sebesar 0,5%, 1%, dan 2% dihasilkan kadar tembaga masing-masing sebesar 0,66%, 1,49%, 3,07% yang mana nilai tersebut di atas dari persentase tembaga yang diinginkan. Kelebihan kadar tembaga pada masing-masing sampel dapat disebabkan oleh adanya segregasi dan unsur pengotor yang dalam jumlah banyak yang dapat dilihat pada Tabel 4.3 sehingga kadar tembaga yang dihasilkan melebihi dari kadar yang diinginkan. Penyebab lain juga bisa disebabkan terjadinya kesalahan selama proses perhitungan *material balance* dan penimbangan bahan pada saat akan dilakukannya proses pengecoran.

### 4.3 Analisa Struktur Mikro

Analisa struktur mikro dilakukan dengan menggunakan alat berupa mikroskop optik. Analisa dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk dari *base material* dan sampel yang telah dilakukan penambahan tembaga dan peningkatan persen reduksi pengerolan dingin. Dari hasil

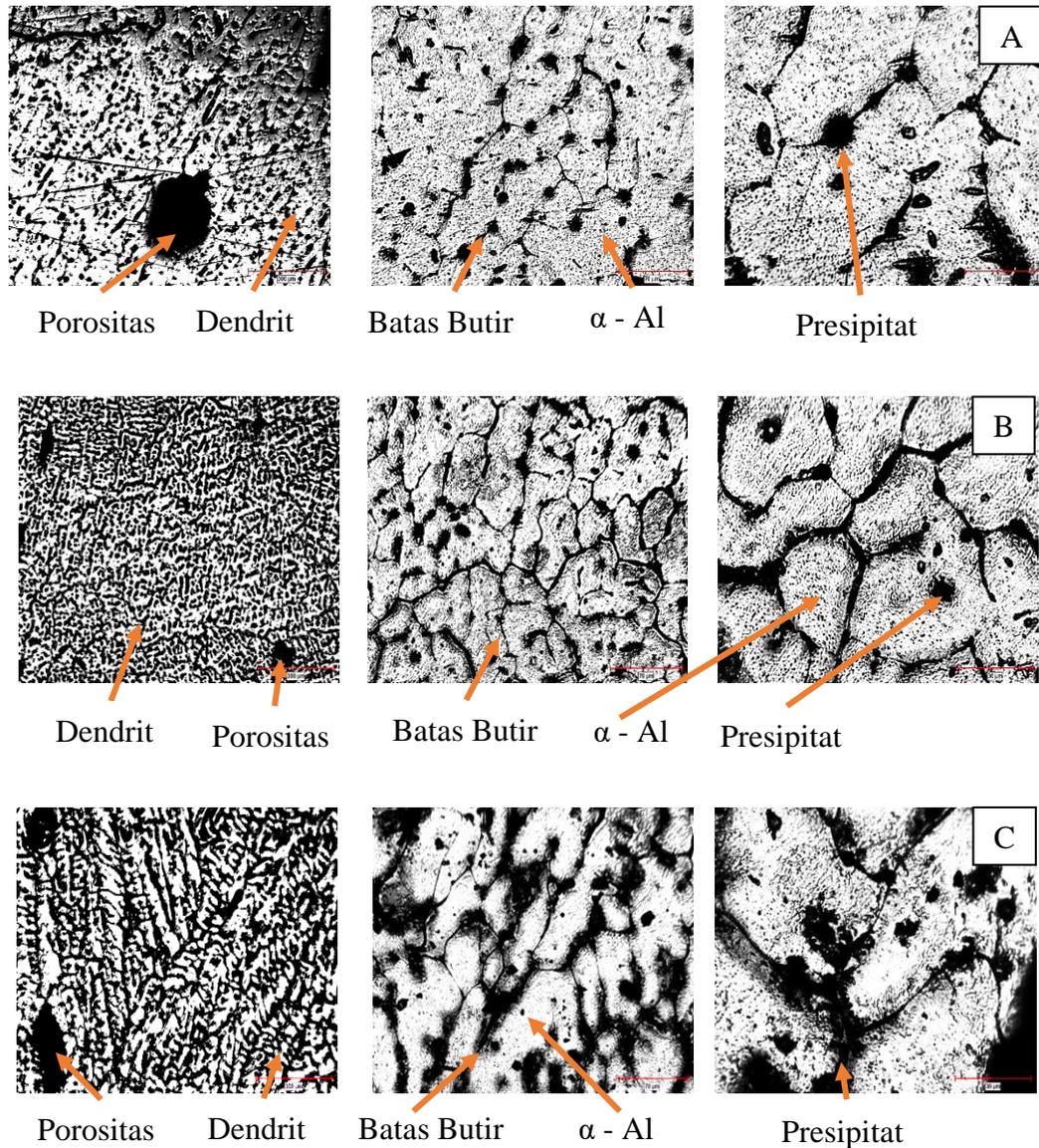
struktur yang didapat dapat diketahui komponen fasa yang terdapat pada sampel dan rata-rata ukuran butir pada setiap sampel dengan mengukurnya menggunakan *software ImageJ*. Rata-rata ukuran butir pada sampel dan komponen fasa yang terbentuk dapat mempengaruhi sifat mekanik dari setiap sampel. Analisa metalografi pada sampel dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 500X. Pada Gambar 4.1 merupakan struktur mikro *base material* dengan penambahan tembaga di pembesaran 500X.



**Gambar 4.1** Struktur Mikro Perbesaran 500x Pada *Base Material*

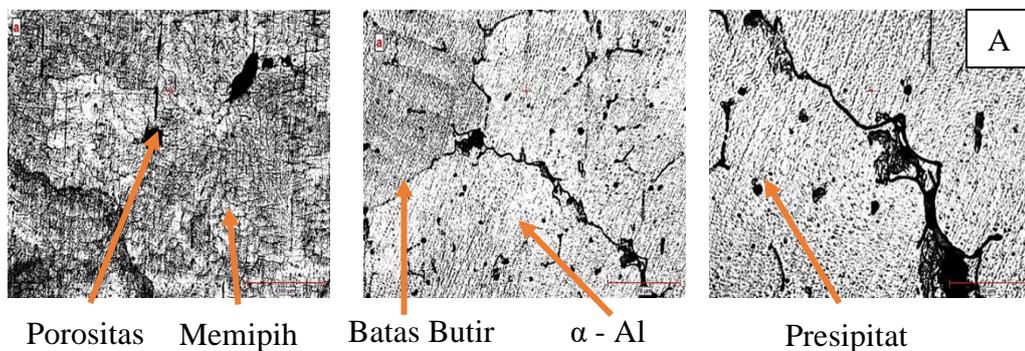
Pada Gambar 4.1 menyajikan gambar struktur mikro dari *base material* paduan aluminium 5052 menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 500x. Pada *base material* terdapat kandungan magnesium sebesar 2,411 % dan dilakukan pengerjaan dingin sebesar < 12,5%. Dapat dilihat pada Gambar 4.1 yang berwarna putih merupakan fasa  $\alpha - Al$  yang merupakan fasa aluminium yang telah tercampur dengan magnesium yang larut. Pada bagian yang berwarna hitam merupakan fasa intermetalik berupa  $Mg_2Al_3$  yang terbentuk oleh magnesium yang tidak larut ke dalam matriks aluminium dan berkumpul membentuk suatu senyawa. Dapat dilihat

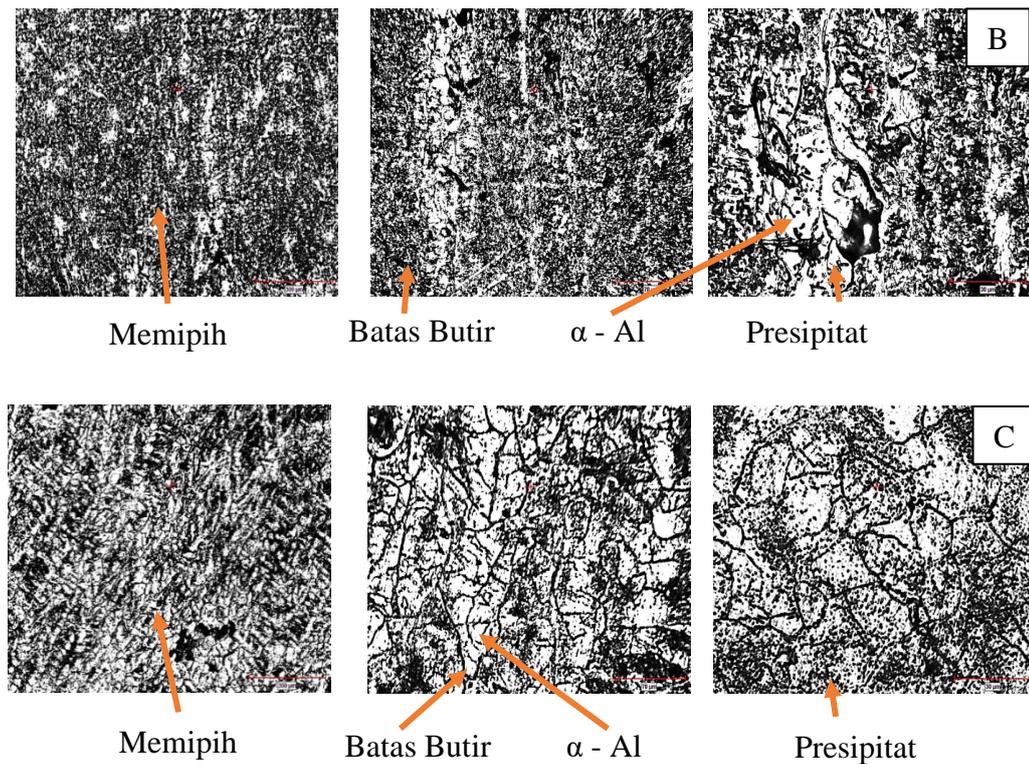
pada mikrostruktur secara keseluruhan bahwa butir yang terlihat memiliki bentuk yang memipih dan halus yang disebabkan oleh proses pengerjaan dingin yang baik. Untuk struktur mikro sampel yang belum dilakukan pengerolan dan homogenisasi dapat dilihat pada Gambar 4.2



**Gambar 4.2** Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 0% Reduksi (B) 1 % Cu – 0% Reduksi (C) 2 % Cu – 0% Reduksi

Pada Gambar 4.2 menyajikan gambar struktur mikro dari sampel yang telah dilakukan penambahan persen tembaga namun belum dilakukan homogenisasi dan pengerjaan dingin pada perbesaran 50x, 200x, 500x. Jika membandingkan pada gambar A, B, & C secara kasat mata dapat dilihat bahwa butir pada gambar B lebih kecil jika dibandingkan dengan gambar C dan gambar C lebih kecil jika dibandingkan dengan gambar A. Pada gambar A, B, dan C dapat dilihat komponen mikrostruktur yang terlihat yaitu fasa *solid solution*  $\alpha - Al$ , presipitat dan terdapat porositas pada ketiga gambar di perbesaran 50x. Dapat dilihat juga pada semua gambar bahwa morfologi mikrostruktur yang terlihat berupa dendrit. Porositas dan struktur dendrit yang terbentuk disebabkan oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik, serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Struktur dendrit & porositas ini menyebabkan sifat mekanik yang dihasilkan oleh sampel yang terbuat menjadi fluktuatif dan lebih rendah jika dibandingkan dengan *base material*. Untuk struktur mikro sampel yang dilakukan 10% reduksi pengerolan dapat dilihat pada Gambar 4.3

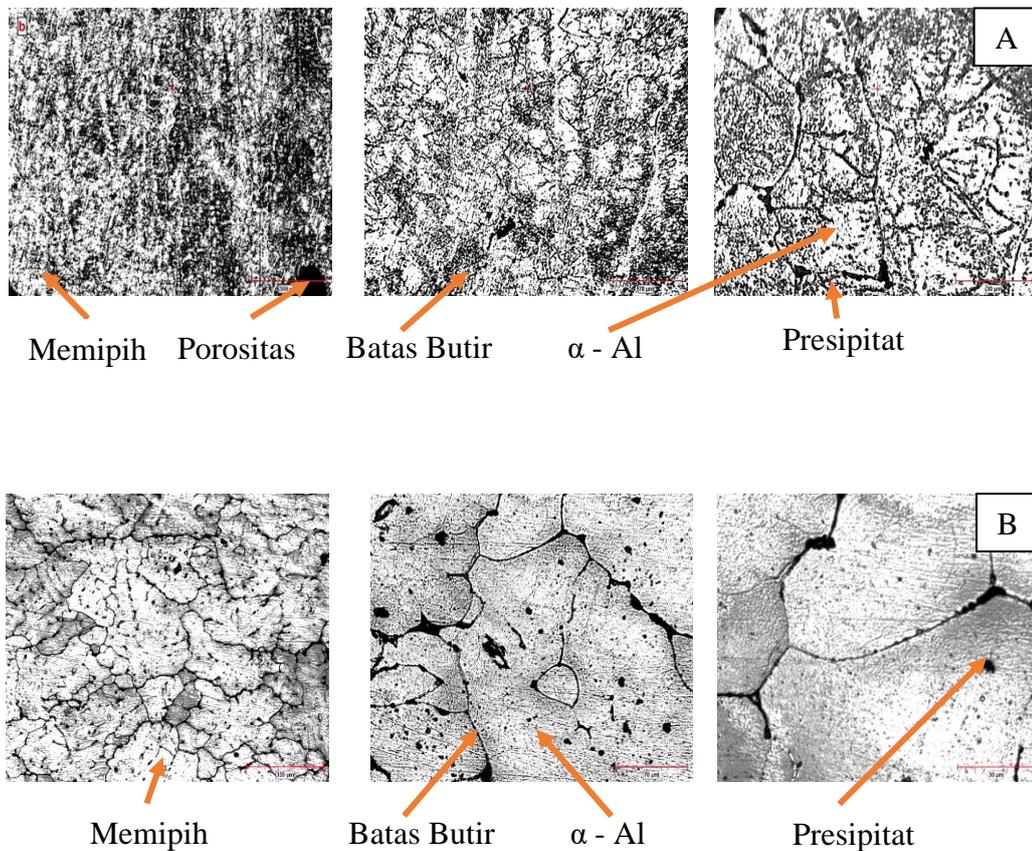


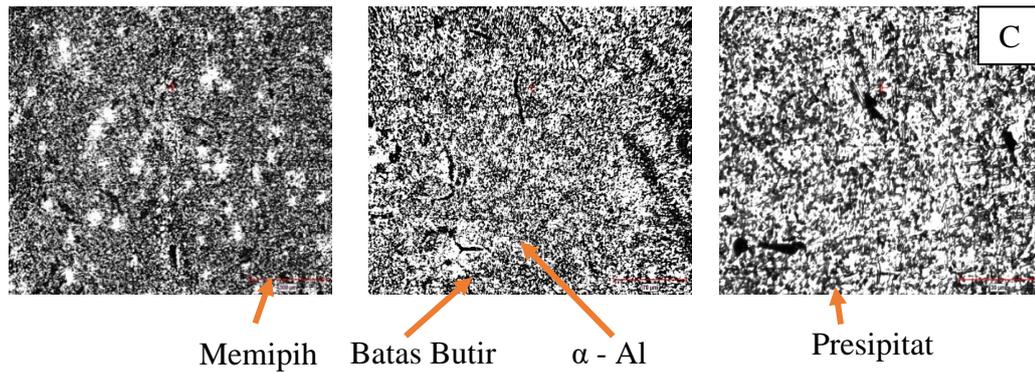


**Gambar 4.3** Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 10% Reduksi (B) 1 % Cu – 10% Reduksi (C) 2 % Cu – 10% Reduksi

Pada Gambar 4.3 menyajikan gambar struktur mikro dari sampel yang telah dilakukan penambahan persen tembaga pada 10% reduksi pengerolan dingin pada perbesaran 50x, 200x, 500x. Pada gambar A, B, dan C terdapat komponen mikrostruktur berupa fasa *solid solution*  $\alpha$  – Al, dan presipitat. Pada gambar A di perbesaran 50x dapat terlihat adanya porositas. Jika membandingkan pada gambar A, B, & C secara kasat mata dapat dilihat bahwa pada gambar A bintik-bintik hitam yang berupa presipitat berukuran lebih kecil jika dibandingkan pada gambar B dan C. Hal ini disebabkan pada sampel digambar A merupakan sampel baru sehingga tidak mengalami proses *natural aging* yang tidak terlalu lama jika dibandingkan

dengan sampel digambar B dan C. Pada ketiga gambar memiliki morfologi mikrostruktur yang awalnya dendrit menjadi memipih akibat proses pengerolan dingin sebesar 10 % reduksi. Adanya porositas pada gambar A disebabkan juga oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Porositas pada gambar A dapat menyebabkan sifat mekanik yang dihasilkan oleh sampel yang terbuat menjadi fluktuatif dan lebih rendah jika dibandingkan dengan *base material*. Untuk struktur mikro sampel yang dilakukan 20% pengerolan dapat dilihat pada Gambar 4.4

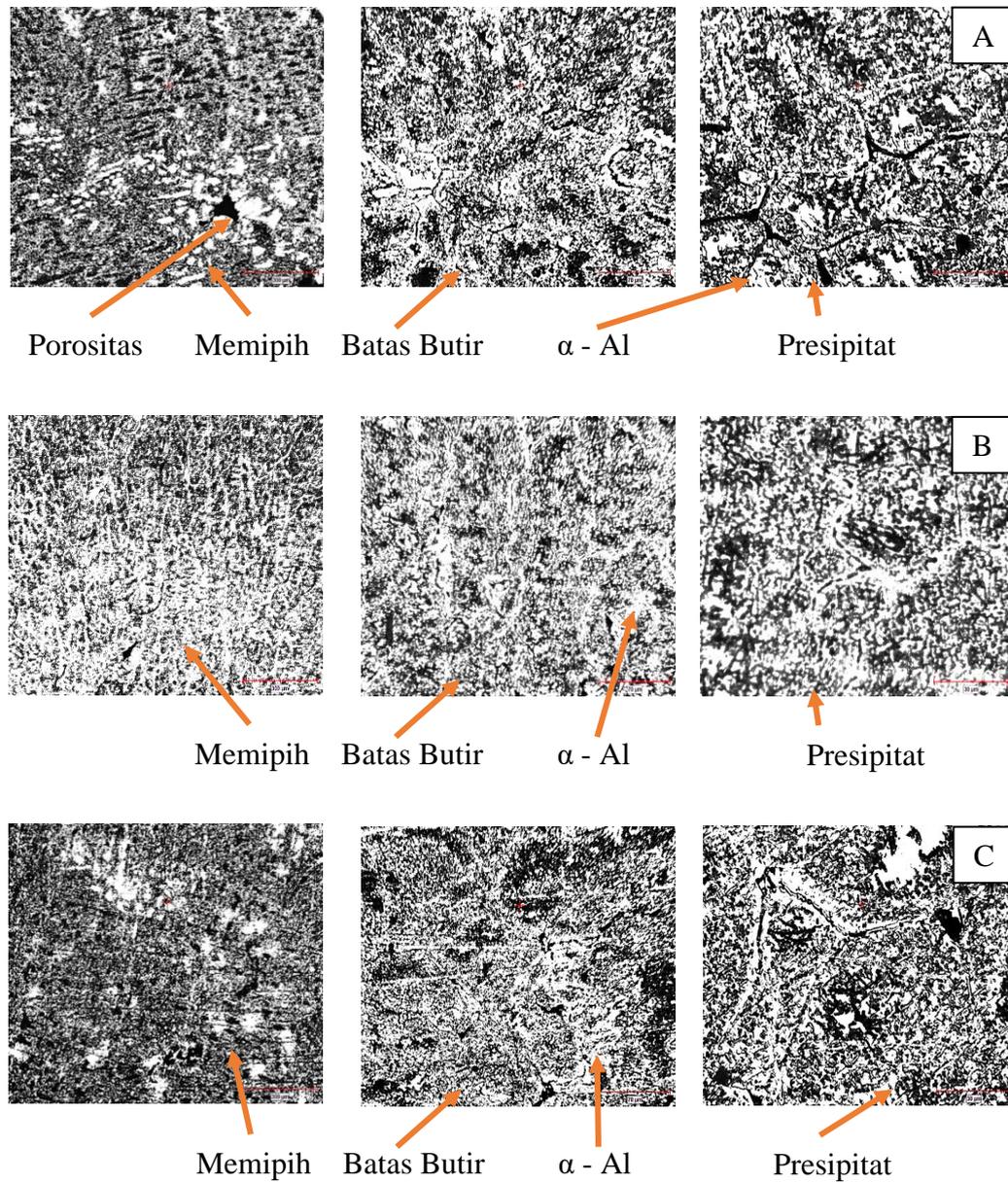




**Gambar 4.4** Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 20% Reduksi (B) 1 % Cu – 20% Reduksi (C) 2 % Cu – 20% Reduksi

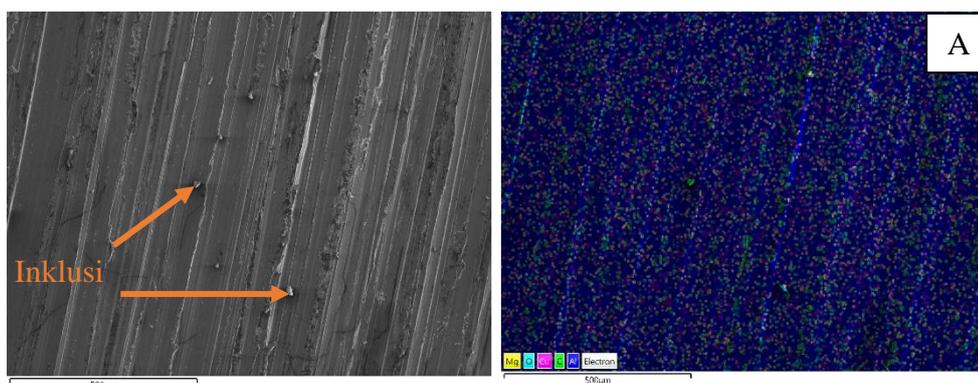
Pada Gambar 4.4 menyajikan gambar struktur mikro dari sampel yang telah dilakukan penambahan persen tembaga pada 20% reduksi pengerolan dingin pada perbesaran 50x, 200x, 500x. Pada gambar A, B, dan C juga terdapat komponen berupa fasa *solid solution*  $\alpha - Al$ , dan presipitat. Pada gambar A di perbesaran 50x dapat terlihat adanya porositas. Jika membandingkan pada gambar A, B, & C secara kasat mata dapat dilihat bahwa pada gambar B bintik-bintik hitam yang berupa presipitat berukuran lebih kecil jika dibandingkan pada gambar A dan C. Hal ini disebabkan pada sampel digambar B merupakan sampel baru sehingga tidak mengalami proses *natural aging* yang tidak terlalu lama jika dibandingkan dengan sampel digambar A dan C. Pada ketiga gambar memiliki morfologi mikrostruktur yang memipih akibat proses pengerolan dingin sebesar 20% reduksi. Adanya porositas pada gambar A disebabkan juga oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Porositas pada gambar A dapat menyebabkan sifat mekanik yang dihasilkan oleh sampel yang terbuat menjadi fluktuatif dan lebih rendah jika

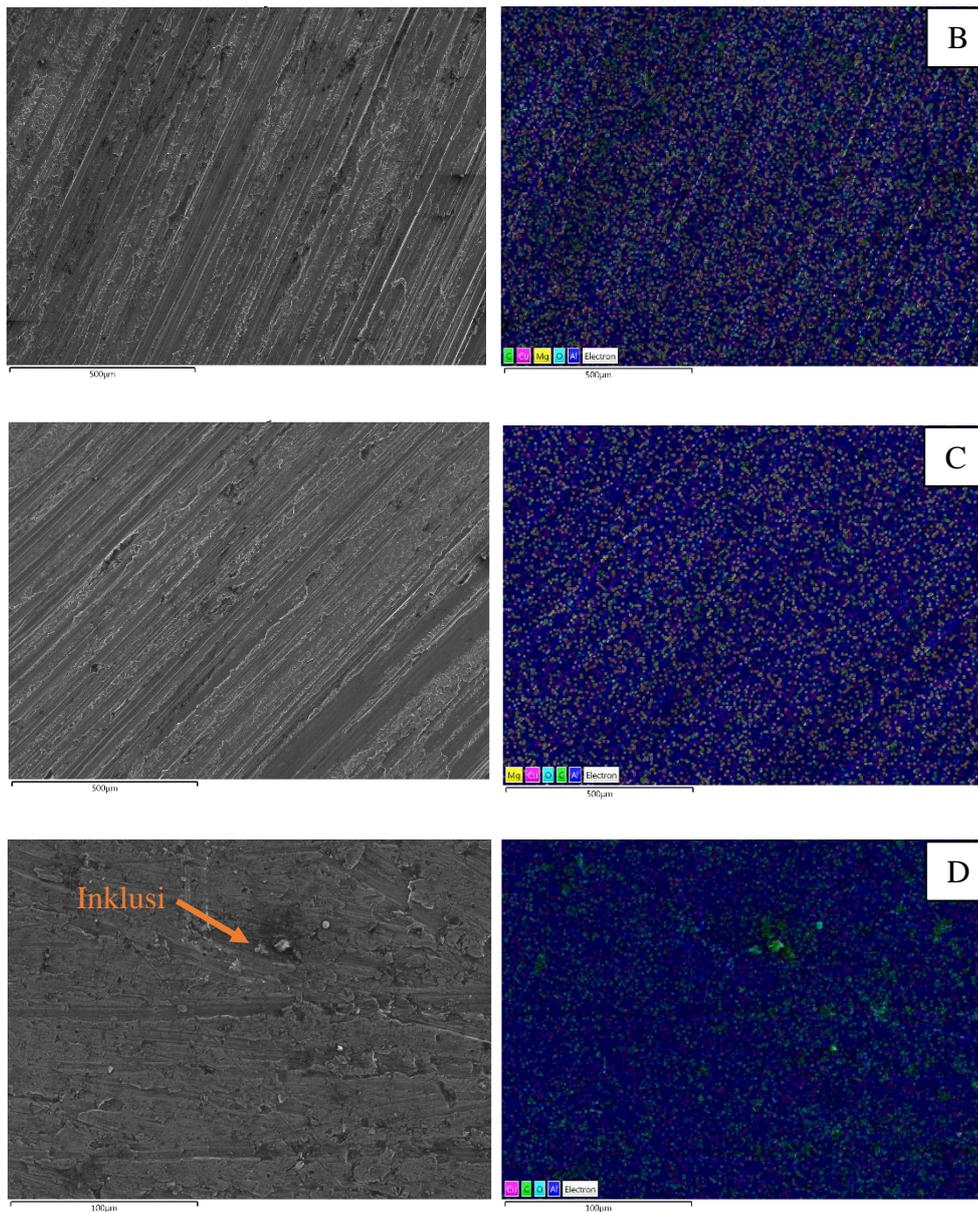
dibandingkan dengan *base material*. Untuk struktur mikro sampel yang dilakukan 30% reduksi pengerolan dapat dilihat pada Gambar 4.5



**Gambar 4.5** Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 30% Reduksi (B) 1 % Cu – 30% Reduksi (C) 2 % Cu – 30% Reduksi

Pada Gambar 4.5 menyajikan gambar struktur mikro dari sampel yang telah dilakukan penambahan persen tembaga pada 30% reduksi pengerolan dingin pada perbesaran 50x, 200x, 500x. Pada gambar A, B, dan C juga terdapat komponen berupa fasa *solid solution*  $\alpha$  – Al, dan presipitat. Pada gambar A, B dan C terlihat struktur yang terlihat memipih. Pada gambar A nampak terlihat adanya porositas. Pada gambar A, B, & C secara kasat mata dapat dilihat bahwa bintik-bintik hitam yang merupakan presipitat berukuran cukup besar yang disebabkan oleh proses *natural aging* yang cukup lama. Pada ketiga gambar memiliki morfologi mikrostruktur yang memipih akibat proses pengerolan dingin sebesar 30% reduksi. Adanya porositas pada gambar A disebabkan juga oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Porositas pada gambar A dapat menyebabkan sifat mekanik yang dihasilkan oleh sampel yang terbuat menjadi fluktuatif dan lebih rendah jika dibandingkan dengan *base material*. Perlu dilakukan analisa SEM-EDS untuk mengetahui jenis fasa pada mikrostruktur dan segregasi pada sampel. Untuk hasil Analisa SEM-EDS pada sampel dan tabel analisa persebaran unsur dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan Tabel 4.4



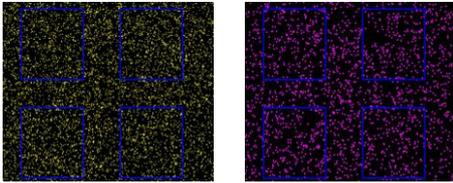
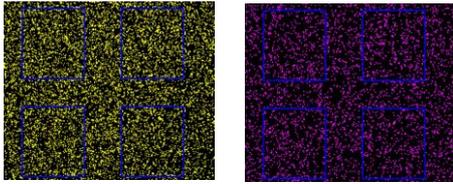
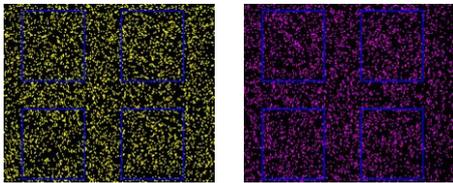
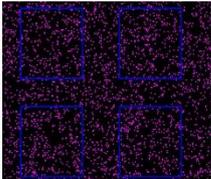


**Gambar 4.6** Hasil SEM Perbesaran x100 Pada Sampel (A) 0,5Cu 0% Reduksi (B) 1Cu 0% Reduksi (C) 2Cu 0% Reduksi (D) 0,5Cu 10% Reduksi.

Pada gambar 4.6 menyajikan hasil SEM berupa gambar elektron dan gambar EDS pada 3 sampel yang belum dilakukan homogenisasi dan pengerolan di gambar A, B, C serta 1 sampel yang memiliki sifat mekanik terbaik pada gambar D. Pada

gambar D dapat terlihat mikrostruktur yang terdeformasi akibat pengerolan jika dibandingkan dengan gambar A, B, C. Pada setiap gambar menyajikan gambar elektron dan gambar EDS berupa data sebaran elektron logam (*mapping*) pada mikrostruktur sampel. Dari gambar EDS yang disajikan, setiap jenis elektron logam memiliki warna yang berbeda-beda. Pada masing-masing elektron unsur aluminium memiliki warna biru, unsur tembaga memiliki warna ungu, dan unsur magnesium memiliki warna kuning. Pada gambar EDS juga dapat dilihat unsur inklusi yang berupa karbon dan oksigen yang ditandai dengan warna hijau dan cyan. Digambar A dan D juga dapat dilihat pada gambar elektron bahwa terdapat titik-titik berwarna putih yang jika dilihat pada gambar EDS terdapat unsur karbon dan oksigen yang merupakan kumpulan inklusi. Keberadaan inklusi pada sampel dapat menyebabkan sifat mekanik yang dihasilkan oleh sampel yang terbuat menjadi fluktuatif dan lebih rendah jika dibandingkan dengan *base material*. Pada gambar elektron, untuk fasa presipitat pada sampel nampak terlihat kurang jelas yang disebabkan sampel yang diuji SEM-EDS tidak dilakukan proses *grinding*, *polishing*, dan *etching* sehingga fasa presipitat tidak dapat diamati dengan jelas. Dari gambar EDS bisa dilakukan analisa persebaran unsur Cu dan Mg pada setiap sampel dengan membuat 4 ofset pada *software imageJ* dan mengkalkulasi persentase unsur di setiap ofset. Untuk Analisa persebaran unsur dapat dilihat Tabel 4.4

**Tabel 4.4** Analisa Persebaran Unsur EDS

Gambar <i>Mapping</i> dengan 4 Ofset (Mg = Kuning, Cu = ungu)	Kode Sampel	Ofset	Unsur Mg (%)	Unsur Cu (%)
	0,5%Cu - 0% reduksi	1	13,01	15,907
		2	14,216	15,085
		3	14,544	17,301
		4	12,866	15,813
	1%Cu - 0% reduksi	1	24,306	25,384
		2	23,517	25,226
		3	21,998	25,157
		4	19,787	22,733
	2%Cu - 0% reduksi	1	16,534	28,717
		2	16,677	27,68
		3	15,414	28,443
		4	15,101	26,525
	0,5%Cu - 10% reduksi	1	-	17,682
		2	-	18,117
		3	-	18,405
		4	-	18,016

Pada Tabel 4.4 merupakan data persebaran unsur pada 4 sampel yang dilakukan pengujian SEM-EDS. Dari data tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa persebaran unsur Cu dan Mg tidak merata. Terlihat perbedaan persentase unsur pada setiap ofset yang sebesar 1% - 3% yang menandakan adanya segregasi pada semua sampel. Segregasi juga disebabkan juga oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Adanya segregasi dapat menyebabkan sifat mekanik dan

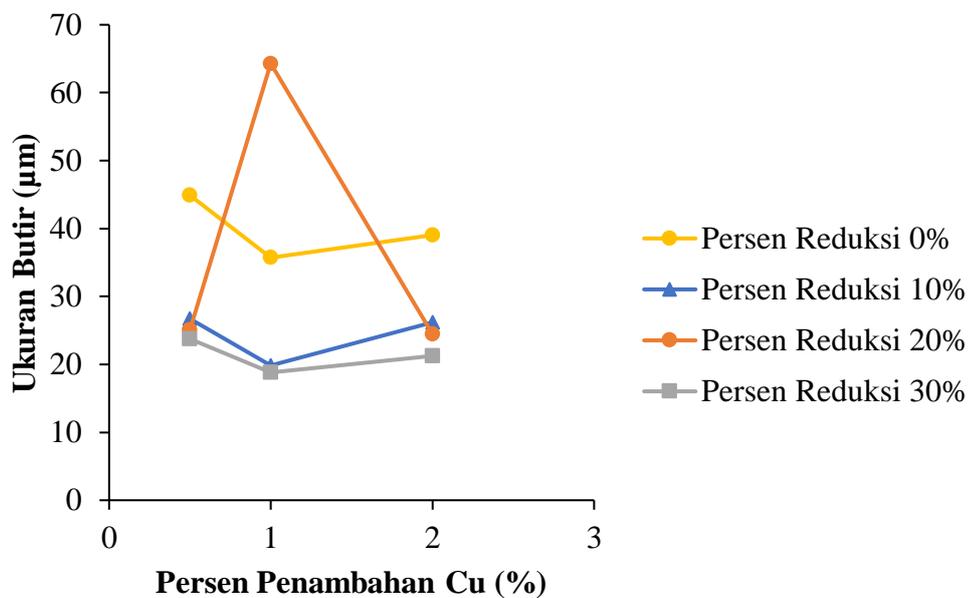
ukuran butir yang dihasilkan oleh sampel yang terbuat menjadi fluktuatif dan lebih rendah jika dibandingkan dengan *base material*. Dari hasil pengujian mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dapat ditentukan nilai rata-rata ukuran butir menggunakan *software imageJ* dengan metode *jeffries planimetric*. Untuk hasil pengukuran butir dapat dilihat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Rata-Rata Ukuran Butir

Sampel	Penambahan Tembaga (%)	Persen Reduksi Pengerolan dingin (%)	Rata-rata ukuran butir ( $\mu\text{m}$ )
1		0	44,89
2	0,5	10	26,71
3		20	25,12
4		30	23,75
5		0	35,71
6	1	10	19,84
7		20	64,3
8		30	18,81
9		0	39,02
10	2	10	26,19
11		20	24,48
12		30	21,25

Pada Tabel 4.5 merupakan data rata-rata ukuran butir yang diukur menggunakan *software imageJ* pada setiap sampel. Pengukuran ukuran rata-rata butir bertujuan untuk mengetahui pengaruh ukuran butir terhadap sifat mekanik yang dihasilkan. Perhitungan ukuran butir dilakukan dengan metode *jeffries planimetric* di perbesaran 50x. Dari data rata-rata ukuran butir yang diperoleh dapat

dilakukan analisa dengan membuat grafik pengaruh penambahan berat tembaga terhadap ukuran butir pada setiap sampel dan grafik pengaruh peningkatan persen reduksi pengerolan dingin terhadap ukuran butir. Penambahan berat tembaga dan peningkatan persen reduksi bertujuan untuk membuat ukuran butir menjadi lebih kecil sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik pada sampel. Berikut merupakan grafik pengaruh persen penambahan berat Cu terhadap ukuran butir disajikan pada Gambar 4.7



**Gambar 4.7** Pengaruh Persen Penambahan berat Cu Terhadap Ukuran Butir

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat grafik pengaruh persen penambahan berat Cu terhadap ukuran butir. Grafik berwarna kuning, biru, oranye, dan abu-abu menampilkan nilai kuat tarik dengan persen reduksi pengerolan yang masing - masing sebesar 0%, 10%, 20%, 30%. Jika dilihat grafik secara keseluruhan nilai kuat tarik yang didapat memiliki nilai yang fluktuatif. Pada sampel dengan persen

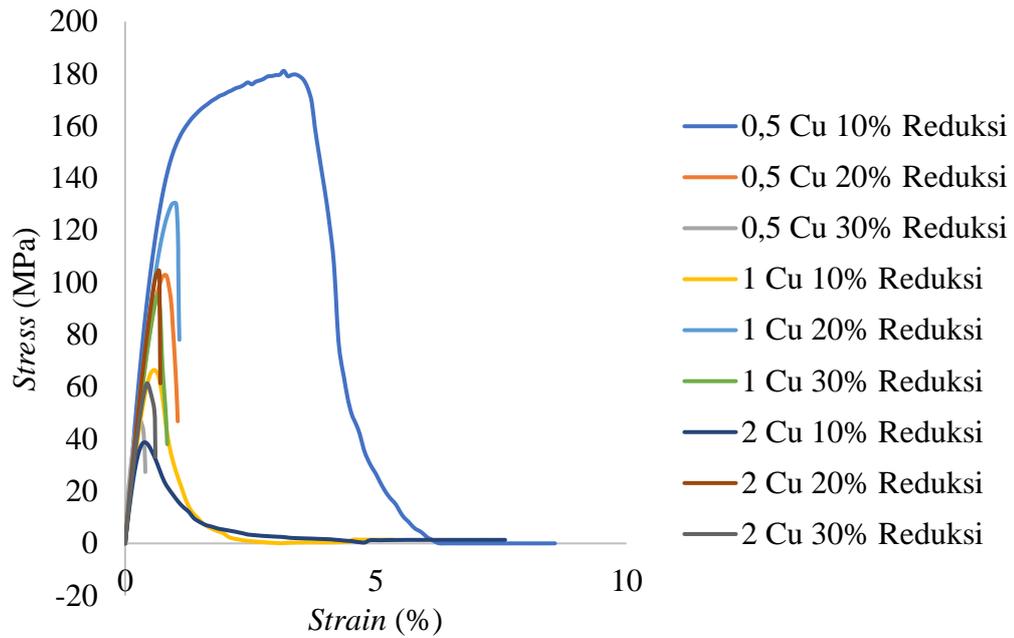
reduksi 0% terjadi penurunan dan kenaikan ukuran butir di setiap penambahan persen tembaga, dengan rata-rata ukuran butir masing-masing sebesar 44,89  $\mu\text{m}$ , 35,71  $\mu\text{m}$ , dan 39,02 $\mu\text{m}$ . Pada Sampel dengan persen reduksi 10 % terjadi penurunan dan kenaikan ukuran butir di setiap penambahan persen tembaga, dengan rata-rata ukuran butir masing-masing sebesar 26,71  $\mu\text{m}$ , 19,84  $\mu\text{m}$ , dan 26,19  $\mu\text{m}$ . Pada Sampel dengan persen reduksi 20 % terjadi penurunan dan kenaikan ukuran butir di setiap penambahan persen tembaga, dengan rata-rata ukuran butir masing-masing sebesar 25,12  $\mu\text{m}$ , 64,3  $\mu\text{m}$ , dan 24,48  $\mu\text{m}$ . dan terakhir pada 30% reduksi mengalami penurunan dan kenaikan butir yaitu masing-masing sebesar 23,75  $\mu\text{m}$ , 64,3  $\mu\text{m}$ , dan 24,48  $\mu\text{m}$ . Kemudian jika keempat grafik diurutkan dari yang tertinggi hingga yang terendah maka urutannya adalah oranye, kuning, biru, dan abu-abu.

Menurut penelitian Olaf Engler dkk, telah terbukti bahwa penambahan tembaga pada paduan aluminium seri 5 dapat memperkecil ukuran butir atau memperhalus butir pada paduan. Unsur tembaga memiliki kemampuan untuk memperhalus ukuran butir dengan mempercepat pertumbuhan butir ketika solidifikasi pada paduan aluminium seri 5. Untuk penguatan berdasarkan persen reduksi pengerolan dingin disebabkan oleh adanya penghalusan butir yang disebabkan oleh perubahan morfologi mikrostruktur menjadi memipih akibat deformasi dari pengerolan dingin. Struktur yang memipih memiliki ukuran butir yang lebih kecil secara keseluruhan jika dibandingkan dengan ukuran butir yang tanpa pengerolan dingin [17].

Dari hasil analisa ini dapat disimpulkan hasil yang didapat tidak sesuai teori yang dapat dilihat pada grafik terdapat beberapa anomali. Anomali pertama dapat dilihat pada sampel 1% Cu – 20% reduksi memiliki ukuran butir yang paling besar. Anomali kedua dapat dilihat pada 3 sampel pada penambahan 2% tembaga yang seharusnya pada grafik memiliki nilai yang lebih rendah namun memiliki nilai yang lebih tinggi. Semua anomali ini disebabkan oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Hal tersebut menyebabkan ditemukannya inklusi, porositas, segregasi, dan struktur dendrit pada mikrostruktur sampel dan terjadinya retak pada bagian sisi sampel ketika dilakukan pengerolan dingin.

#### **4.4 Analisa Pengujian Tarik**

Pengujian tarik merupakan pengujian pada material dengan melakukan penarikan hingga material tersebut patah. Pengujian tarik dilakukan untuk memperoleh nilai sifat-sifat mekanik seperti kekuatan, elongasi, dan nilai kekakuan (modulus elastisitas) yang dimiliki pada 9 sampel kemudian membandingkannya nilainya pada setiap sampel dan *base material* yang digunakan. Hasil dari pengujian tarik didapatkan nilai berupa kuat tarik dan elongasi dari kurva uji tarik yang terbentuk. Berikut merupakan Tabel 4.6 dan Gambar 4.8 yang menyajikan data hasil pengujian tarik pada 9 sampel dan data *base material* yang digunakan.

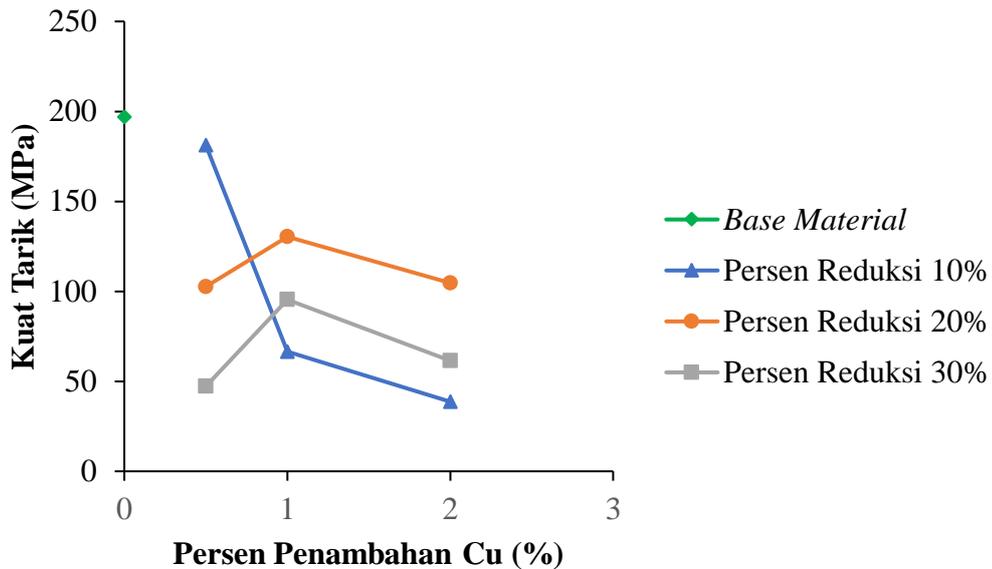


**Gambar 4.8** Kurva Uji Tarik Pada Semua Sampel

**Tabel 4.6** Data hasil pengujian tarik

Sampel	Penambahan Tembaga (%)	Persen Reduksi Pengerolan dingin (%)	Kuat Tarik (MPa)	Elongasi (%)
<i>Base Material</i>	0	12,5	197	27,3
1		10	181,32	8,56
2	0,5	20	102,64	1,04
3		30	47,21	0,4
4		10	66,50	16,44
5	1	20	130,36	0,83
6		30	95,38	1,08
7		10	38,70	15,2
8	2	20	104,54	0,68
9		30	61,54	0,6

Pada pengujian tarik dari semua sampel diperoleh kurva hubungan antara *stress* dengan *strain* yang dapat dilihat pada Gambar 4.8. Dari kurva pengujian tarik tersebut dapat diperoleh nilai kuat tarik dan elongasi pada setiap sampel yang disajikan pada Tabel 4.6. Dapat dilihat terdapat perubahan kekuatan tarik pada setiap sampel. Penambahan berat tembaga dan peningkatan persen reduksi pada penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan nilai kuat tarik pada *base material* aluminium seri 5052. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa kesembilan sampel yang telah dibuat memiliki sifat yang getas dan keras dikarenakan memiliki *strain* yang sangat kecil seperti yang terlihat pada kurva uji tarik dan nilai elongasi yang sangat kecil. Juga nilai kuat tarik dan elongasi pada setiap sampel memiliki nilai yang lebih rendah jika dibandingkan nilainya dengan *base material* yang digunakan. hal ini disebabkan karena adanya cacat pada sampel yang berupa inklusi, porositas, dan segregasi yang telah dibahas pada analisa mikrostruktur sehingga membuat sampel menjadi getas dan keras. Dari data yang disajikan pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.8 dapat dilakukan analisa dengan membuat grafik pengaruh penambahan berat tembaga terhadap nilai kuat tarik pada setiap sampel dan grafik pengaruh peningkatan persen reduksi pengerolan dingin terhadap nilai kuat tarik. Berikut merupakan grafik hubungan antara penambahan berat tembaga dengan nilai kuat tarik yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.9.



**Gambar 4.9** Pengaruh Persen penambahan Cu Terhadap Kuat Tarik

Pada Gambar 4.9 menunjukkan grafik hubungan antara pengaruh persen penambahan Cu terhadap nilai kuat tarik dengan berbagai macam persen reduksi pengerolan dingin. Grafik berwarna hijau menampilkan nilai kuat tarik dari *base material* sedangkan grafik berwarna biru, oranye, dan abu-abu menampilkan nilai kuat tarik dengan persen reduksi pengerolan yang masing-masing sebesar 10%, 20%, 30%. Jika dilihat grafik secara keseluruhan nilai kuat tarik yang didapat memiliki nilai yang fluktuatif. Pada sampel dengan persen reduksi 10% terjadi penurunan nilai kuat tarik di setiap penambahan persen tembaga, dengan nilai kuat tarik masing-masing sebesar 181,32 MPa, 66,50 MPa, dan 38,70 MPa. Pada sampel dengan persen reduksi 20 % didapat nilai kuat tarik naik turun di setiap penambahan persen tembaga, dengan nilai kuat tarik masing-masing sebesar 102,64 MPa, 130,36 MPa, dan 104,54 MPa. Pada sampel dengan persen reduksi 30% juga terdapat nilai

kuat tarik yang naik turun di setiap penambahan persen tembaga, dengan nilai kuat tarik masing-masing sebesar 47,21 MPa, 95,38 MPa, dan 61,54 MPa. Diketahui nilai kuat tarik pada *base material* yang tanpa dilakukan penambahan Cu dan memiliki persen reduksi di bawah 12,5% yaitu sebesar 197 MPa. Kemudian jika keempat grafik diurutkan dari yang tertinggi hingga yang terendah maka urutannya adalah hijau, biru, oranye, dan abu-abu.

Menurut penelitian Z Zhu & M J Starink dan penelitian Bo Wang dkk, telah terbukti bahwa penambahan tembaga dan reduksi pengerolan dingin pada paduan aluminium seri 5 dapat meningkatkan kuat tarik pada paduan. Penguatan penambahan tembaga pada aluminium seri disebabkan oleh 3 hal yaitu penguatan oleh penghalusan butir, penguatan oleh larutan padat  $\alpha$  – Al dari unsur magnesium dan tembaga yang larut pada matriks, dan penguatan oleh fasa presipitat  $Al_2CuMg$  yang terbentuk oleh tembaga yang tidak larut pada matriks aluminium. Semakin tinggi persen tembaga yang ditambahkan semakin kuat paduan yang dihasilkan dikarenakan  $Al_2CuMg$  yang terbentuk lebih banyak, namun persentase yang ditambah tidak terlalu tinggi yang dapat menyebabkan paduan menjadi getas [21]. Penguatan dari persen reduksi pengerolan dingin disebabkan oleh fenomena yang disebut *strain hardening*. Pengertian *strain hardening* adalah penguatan logam yang disebabkan oleh deformasi plastis (perubahan bentuk secara permanen). Penguatan ini terjadi karena terdapat pergerakan dislokasi pada struktur kristal material yang disebabkan oleh deformasi plastis. Akibat pergeseran dislokasi ini menghasilkan peningkatan kerapatan dislokasi pada kristal material sehingga membuat ukuran butir menjadi lebih kecil dan kekuatan logam dapat meningkat.

Pada kasus pengerolan dingin, semakin tinggi persen reduksi yang dilakukan atau deformasi plastis yang dilakukan maka kekuatan logam akan semakin tinggi namun dapat menurunkan keuletan logam tersebut [23].

Dari hasil analisa ini dapat disimpulkan hasil yang didapat tidak sesuai teori yang dapat dilihat terdapat beberapa anomali. Anomali pertama dapat dilihat pada kesembilan sampel memiliki nilai kuat tarik yang lebih kecil dari *base material*. Anomali kedua dapat dilihat pada grafik dimana pada sampel 0,5% Cu – 10% reduksi memiliki kuat tarik yang paling tinggi di antara 9 sampel yang seharusnya memiliki nilai kuat tarik yang paling rendah. Anomali ketiga dapat dilihat pada 3 sampel pada penambahan 2% tembaga dan 3 sampel pada persen reduksi 30% yang seharusnya pada grafik memiliki nilai yang lebih tinggi namun memiliki nilai yang lebih rendah. Semua anomali disebabkan oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Hal tersebut menyebabkan timbulnya inklusi, porositas, segregasi, dan struktur dendrit pada mikrostruktur sampel dan terjadinya retak pada bagian sisi sampel ketika dilakukan pengerolan dingin yang mana sangat mempengaruhi nilai kuat tarik pada setiap sampel.

#### **4.5 Analisa Pengujian Keras**

Pada 9 sampel yang memiliki perbedaan penambahan Cu dan persen reduksi pengerolan dingin dilakukan uji keras. Uji keras bertujuan untuk memperoleh data kekerasan yang kemudian data tersebut digunakan untuk membandingkan nilai kekerasan antara 9 sampel dan *base material*. Pengujian kekerasan ini

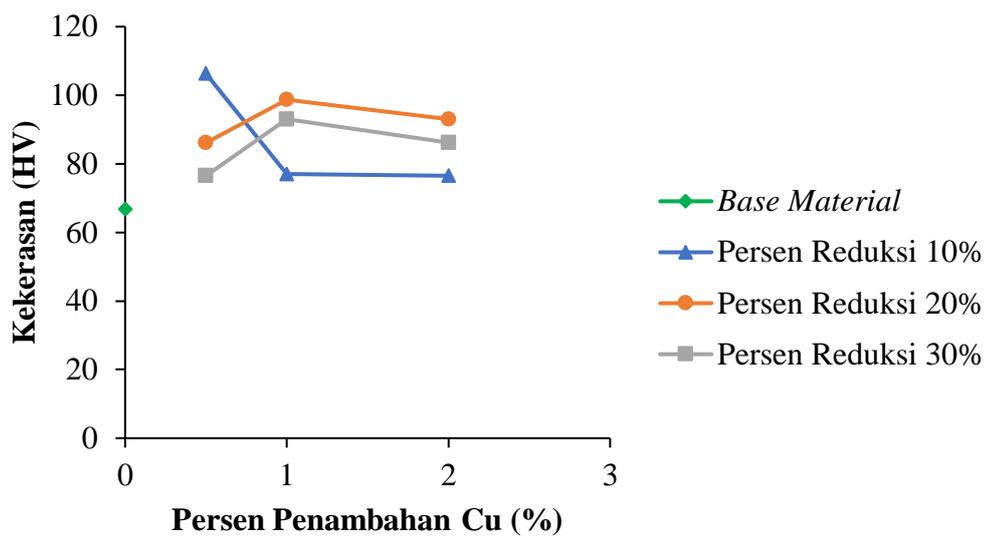
menggunakan alat *Hardness vickers* dengan analisa 5 titik. Data hasil uji kekerasan dengan variasi penambahan tembaga dan persen reduksi pengerolan dingin yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4.7 di bawah.

**Tabel 4.7** Data *Hardness Vickers*

Kode Sampel	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Rata-rata (HV)
<i>Base Material</i>	65,86	67,32	67,02	66,44	67,32	66,79
0,5Cu 10%	110,10	104,15	106,47	104,15	105,30	106,03
0,5Cu 20%	84,18	91,22	85,01	81,74	88,48	86,13
0,5Cu 30%	84,2	76,8	84,6	56,4	85,9	77,6
1Cu 10%	76,82	78,28	74,00	75,39	80,56	77,01
1Cu 20%	101,90	95,58	97,11	99,73	99,20	98,70
1Cu 30%	95,1	90,8	89,4	87,6	93,1	91,2
2Cu 10%	76,10	72,32	76,46	83,35	74,35	76,52
2Cu 20%	91,69	89,84	90,29	88,03	105,30	93,03
2Cu 30%	86,29	85,01	87,59	89,38	82,94	86,24

Dapat dilihat pada Tabel 4.7 yang merupakan hasil uji keras dengan menggunakan analisa 5 titik pada *base material* dan 9 sampel dengan variasi penambahan berat tembaga dengan variasi persen reduksi pengerolan dingin. Penambahan berat tembaga dan peningkatan persen reduksi pada penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan nilai kekerasan pada *base material* aluminium seri 5052. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa kesembilan sampel yang telah dibuat terdapat kenaikan nilai kekerasan jika dibandingkan nilainya dengan *base material* yang digunakan. Dari data yang disajikan pada Tabel 4.7 dapat dilakukan

analisa dengan membuat grafik pengaruh penambahan berat tembaga terhadap nilai kekerasan pada setiap sampel dan grafik pengaruh peningkatan persen reduksi pengerolan dingin terhadap nilai kekerasan. Berikut merupakan grafik hubungan antara penambahan berat tembaga dengan nilai kuat tarik yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.10



**Gambar 4.10** Pengaruh Persen Penambahan berat Cu Terhadap Kekerasan

Pada Gambar 4.10 menunjukkan grafik hubungan antara pengaruh persen penambahan Cu terhadap nilai kekerasan dengan berbagai macam persen reduksi pengerolan dingin. Grafik berwarna hijau menampilkan nilai kekerasan dari *base material* sedangkan grafik berwarna biru, oranye, dan abu-abu menampilkan nilai kekerasan dengan persen reduksi pengerolan yang masing-masing sebesar 10%, 20%, 30%. Jika dilihat grafik secara keseluruhan nilai kuat tarik yang didapat memiliki nilai yang fluktuatif. Pada sampel dengan persen reduksi 10% terjadi

penurunan nilai kekerasan di setiap penambahan persen tembaga, dengan nilai kekerasan masing-masing sebesar 106,03 HV, 77,01 HV, dan 76,52 HV. Pada sampel dengan persen reduksi 20 % didapat nilai kekerasan yang didapat memiliki nilai yang fluktuatif setiap penambahan persen tembaga dengan nilai kekerasan masing-masing sebesar 86,13 HV, 98,07 HV, dan 93,03 HV. Pada sampel dengan persen reduksi 30% juga memiliki nilai yang fluktuatif pada setiap penambahan persen tembaga, dengan nilai kekerasan masing-masing sebesar 76,52 HV, 93,03 HV, 86,24 HV. Diketahui nilai kekerasan pada *base material* yang tanpa dilakukan penambahan Cu dan memiliki persen reduksi di bawah 12,5% yaitu sebesar 66,79 HV. Kemudian jika keempat grafik diurutkan dari yang tertinggi hingga yang terendah maka urutannya adalah abu-abu, biru, oranye, dan. hijau

Menurut penelitian Bingbing Zhang dkk dan penelitian Bo Wang dkk, telah terbukti penambahan tembaga dan reduksi pengerolan dingin pada paduan aluminium seri 5 dapat meningkatkan kekerasan pada paduan. Peningkatan nilai kekerasan ini disebabkan karena penambahan tembaga dapat memperhalus ukuran butir dan membentuk fasa *solid solution* berupa  $\alpha$  - Al oleh tembaga yang larut pada matriks aluminium. Selain itu peningkatan kekerasan juga disebabkan oleh fasa presipitat yang terbentuk seperti fasa  $Al_2CuMg$  yang terbentuk oleh tembaga yang tidak larut pada matriks aluminium. Semakin tinggi persen tembaga yang ditambahkan maka semakin keras paduan yang dihasilkan dikarenakan fasa  $Al_2CuMg$  yang terbentuk lebih banyak [19]. Peningkatan nilai kekerasan dari persen reduksi pengerolan dingin disebabkan oleh fenomena yang disebut *strain hardening*. Pengertian *strain hardening* adalah penguatan logam yang disebabkan

oleh deformasi plastis (perubahan bentuk secara permanen). Penguatan ini terjadi karena terdapat pergerakan dislokasi pada struktur kristal material yang disebabkan oleh deformasi plastis. Akibat pergeseran dislokasi ini menghasilkan peningkatan kerapatan dislokasi pada kristal material sehingga membuat material sulit mengalami deformasi lokal. Pada proses pengerolan dingin, semakin tinggi persen reduksi yang dilakukan atau deformasi plastis yang dilakukan maka kekerasan logam akan semakin tinggi [23].

Dari hasil analisa ini dapat disimpulkan hasil yang didapat tidak sesuai teori yang dapat dilihat terdapat beberapa anomali. Anomali pertama dapat Pada grafik dimana pada sampel 0,5% Cu – 10% reduksi yang seharusnya memiliki kekerasan paling rendah namun memiliki kekerasan yang paling tinggi di antara 9 sampel. Anomali kedua dapat dilihat pada 3 sampel pada penambahan 2% tembaga dan 3 sampel pada persen reduksi 30% yang seharusnya pada grafik memiliki kekerasan yang lebih tinggi namun memiliki kekerasan yang lebih rendah. Semua anomali disebabkan oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Hal tersebut menyebabkan timbulnya inklusi, porositas, segregasi, dan struktur dendrit pada mikrostruktur sampel dan terjadinya retak pada bagian sisi sampel ketika dilakukan pengerolan dingin yang mana sangat mempengaruhi nilai kekerasan pada setiap sampel.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tentang pengaruh penambahan unsur Cu dan persen reduksi pengerolan dingin terhadap sifat mekanik dan struktur mikro paduan Al-Mg yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Penambahan persentase Cu pada paduan Al-Mg dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada paduan serta dapat memperkecil ukuran butir dan membentuk presipitat berupa  $Al_2CuMg$  pada mikrostruktur paduan. Namun pada penelitian ini nilai kekuatan, kekerasan, dan ukuran butir yang didapat memiliki nilai yang fluktuatif yang disebabkan oleh penggunaan desain cetakan yang kurang baik serta proses pengadukan dan homogenisasi yang kurang baik selama proses pengecoran. Hal tersebut menyebabkan timbulnya inklusi, porositas, segregasi, dan struktur dendrit pada mikrostruktur sampel dan terjadinya retak pada bagian sisi sampel ketika dilakukan pengerolan dingin yang mana sangat mempengaruhi nilai kekerasan & kekuatan pada setiap sampel.
2. Peningkatan persen reduksi pengerolan dingin pada paduan Al-Mg dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada paduan serta dapat memperkecil dan memipihkan butir pada paduan. Namun pada penelitian ini data yang didapat juga memiliki nilai yang fluktuatif yang disebabkan oleh alasan yang sama.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat disampaikan penulis agar dapat membantu penelitian yang akan dilakukan selanjutnya yaitu :

1. Menggunakan cetakan dengan tipe *closed die* pada proses pengecoran sehingga dapat mencegah inklusi dan segregasi.
2. Menggunakan metode *stir casting* sehingga dapat mengurangi segregasi pada sampel.
3. Menggunakan penambahan unsur yang berbeda seperti unsur silikon yang juga dapat memperkuat sifat mekanik pada paduan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. N. Lumley, *Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications*. 2010.
- [2] T. Surdia and S. Saito, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Edisi 2. Jakarta: Pradnya Paramita, 1985.
- [3] F. Mazzolani, *Aluminium Alloy Structures*. London: E & FN Spon, 1994.
- [4] J. Dwight, *Aluminium Design and Construction*. Canada: E & FN Spon, 1999.
- [5] J. R. Davis, *Alloying: understanding the basics*. ASM International: ASM International, 2002.
- [6] A. A. Aziz, "Skripsi: Analisa Kekuatan Tarik, Kekuatan Tekuk, Komposisi dan Cacat Pengecoran Paduan Aluminium Flat Bar dan Limbah Kampas Rem dengan Menggunakan Cetakan Pasir dan Cetakan Hidrolik sebagai Bahan Komponen Jendela Kapal Afif," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 1, pp. 97–103, 2017.
- [7] Y. S. Irawan, *Material Teknik*. Malang: Universitas Brawijaya, 2012.
- [8] A. Norman, "Skripsi: Pengendalian Struktur Austenit Terhadap Nukleasi Ferit Pada Proses Canai Panas Baja C-Mn," FT UI, 2010.
- [9] S. Aldiansyah, Anam, "Skripsi: Pengaruh Kuat Arus, Logam Pengisi, dan Artificial Aging terhadap Sifat Mekanik Hasil Pengelasan TIG Paduan Aluminium 6061," 2022.
- [10] Kalpakjian and Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Sixth. New York: Pentice Hall, 2009.
- [11] P. Rahayu, "Skripsi: Pengaruh Temperatur Preheating Cetakan Permanen Terhadap Porositas dan Mikrostruktur Coran Paduan Aluminium," FT Universitas Brawijaya, 2018.
- [12] M. A. Fallah, "Skripsi: Studi pengaruh kombinasi komposisi 0,02 wt. % Sr dan 0,063, 0,083 dan 0,108 wt. % Ti terhadap karakteristik paduan aluminium AC4B hasil proses low pressure die casting (LPDC)," FT UI, 2009.
- [13] J. Campbell, *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*, First. Oxford: Elsevier Ltd, 2015.

- [14] A. Ludwig, M. Wu, and A. Kharicha, "On Macrosegregation," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 11, pp. 4854–4867, 2015.
- [15] F. Abdillah, "Tesis: Perlakuan Panas Paduan Al-Si Pada Prototipe Piston Berbasis Material Piston Bekas," Universitas Diponegoro, 2010.
- [16] W. F. . Smith, J. Hashemi, and F. Presuel-Moreno, *Foundations of Materials Science and Engineering, Sixth Edition*. Toronto: Mc Graw Hill, 2019.
- [17] O. Engler, C. D. Marioara, T. Hentschel, and H. J. Brinkman, "Influence of copper additions on materials properties and corrosion behavior of al mg alloy sheet.pdf," *J. Alloys Compd.*, vol. 710, pp. 650–662, 2017.
- [18] H. Watanabe, K. Ohori, and Y. Takeuchi, "Superplastic Behavior Of Al-Mg-Cu Alloys," *Trans. Iron Steel Inst. Japan*, vol. 27, no. 9, pp. 730–733, 1987.
- [19] B. Zhang, P. K. Liaw, J. Brechtel, J. Ren, X. Guo, and Y. Zhang, "Effects of Cu and Zn on microstructures and mechanical behavior of the medium-entropy aluminum alloy," *J. Alloys Compd.*, vol. 820, p. 153092, 2020.
- [20] P. I. Gouma, D. J. Lloyd, and M. J. Mills, "Precipitation processes in Al-Mg-Cu alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 319–321, pp. 439–442, 2001.
- [21] Z. Zhu and M. J. Starink, "Solution strengthening and age hardening capability of Al-Mg-Mn alloys with small additions of Cu," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 488, no. 1–2, pp. 125–133, 2008.
- [22] Z. Jin and P. K. Mallick, "Effect of cold work on the tensile and fatigue performance of aluminum alloy 5754," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 15, no. 5, pp. 540–548, 2006.
- [23] B. Wang, X. H. Chen, F. S. Pan, J. J. Mao, and Y. Fang, "Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 25, no. 8, pp. 2481–2489, 2015.
- [24] ASM International, *ASM Metal Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, vol. 2. USA: ASM International, 1990.

**LAMPIRAN A**  
**CONTOH PERHITUNGAN**

## Lampiran A. Contoh Perhitungan

### B.1 Perhitungan kebutuhan sampel

Rumus persentase kebutuhan cor untuk 2 unsur paduan :

$$BU = \frac{K_3 - K_2}{K_1 - K_2} \times 100\%$$

$$BT = 100\% - BU$$

Keterangan:

BU = persentase bahan utama

BT = persentase bahan tambahan

$K_1$  = kandungan unsur bahan utama

$K_2$  = kandungan unsur bahan tambahan

$K_3$  = kandungan unsur yang ingin dicapai

Sampel 0,5% wt tembaga

$$\text{Berat aluminium 5052} = \left( \frac{3,15 - 0,5}{3,15 - 0,01} \times 100\% \right) \times 200 \text{ gram} = 170 \text{ gram}$$

$$\text{Berat aluminium 2024} = 200 \text{ gram} - 170 \text{ gram} = 30 \text{ gram}$$

Sampel 1% wt tembaga

$$\text{Berat aluminium 5052} = \left( \frac{3,15 - 1}{3,15 - 0,01} \times 100\% \right) \times 200 \text{ gram} = 135 \text{ gram}$$

$$\text{Berat aluminium 2024} = 200 \text{ gram} - 135 \text{ gram} = 65 \text{ gram}$$

Sampel 2% wt tembaga

$$\text{Berat aluminium 5052} = \left( \frac{3,15 - 2}{3,15 - 0,01} \times 100\% \right) \times 200 \text{ gram} = 75 \text{ gram}$$

$$\text{Berat aluminium 2024} = 200 \text{ gram} - 75 \text{ gram} = 125 \text{ gram}$$

## B.2 Perhitungan elongasi uji tarik

Rumus persen elongasi

$$E = \frac{p - P_0}{P_0} \times 100\%$$

Keterangan :

p = panjang akhir

P<sub>0</sub> = panjang awal

Data Sampel 0,5Cu 10% reduksi

$$E = \frac{28,24 - 26}{26} \times 100\% = 8,6\%$$

Data Sampel 0,5Cu 20% reduksi

$$E = \frac{25,26 - 25}{25} \times 100\% = 1,04\%$$

Data Sampel 0,5Cu 30% reduksi

$$E = \frac{24,097 - 25}{24} \times 100\% = 0,4\%$$

Data Sampel 1Cu 10% reduksi

$$E = \frac{29,108 - 25}{25} \times 100\% = 16,44\%$$

Data Sampel 1Cu 20% reduksi

$$E = \frac{25,17 - 25}{25} \times 100\% = 0,83\%$$

Data Sampel 1Cu 30% reduksi

$$E = \frac{25,26 - 25}{25} \times 100\% = 1,08 \%$$

Data Sampel 2Cu 10% reduksi

$$E = \frac{28,79 - 25}{25} \times 100\% = 15,2 \%$$

Data Sampel 2Cu 20% reduksi

$$E = \frac{25,17 - 25}{25} \times 100\% = 0,68 \%$$

Data Sampel 2Cu 30% reduksi

$$E = \frac{25,15 - 25}{25} \times 100\% = 0,6 \%$$

### **B.3 Perhitungan rata-rata ukuran butir**

Rumus rata-rata ukuran butir metode *jeffries planimetric*

$$f = \frac{M^2}{a}$$

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

$$A = \frac{1}{N_A}$$

$$d = (A)^{1/2}$$

Keterangan:

f = jeffries faktor

M = Perbesaran Mikroskop

a = Luas area lingkaran pada 1x (mm<sup>2</sup>)

N<sub>A</sub> = Jumlah butir per luas area lingkaran (mm<sup>-2</sup>)

n<sub>1</sub> = rata-rata butir yang terhitung di dalam lingkaran

$n_2$  = rata-rata butir terhitung yang bersinggungan dengan lingkaran

A = Rata-rata luas butir ( $\mu\text{m}^2$ )

d = Rata-rata ukuran butir ( $\mu\text{m}$ )

Data Sampel 0,5Cu 0% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 30,67 + \left( \frac{18}{2} \right) \right] = 496,31 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{496,31} = 2014,863 \mu\text{m}^2$$

$$d = (2014,863)^{1/2} = 44,89 \mu\text{m}$$

Data Sampel 0,5Cu 10% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 102,33 + \left( \frac{19,33}{2} \right) \right] = 1401,351 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{1401,351} = 713,6 \mu\text{m}^2$$

$$d = (713,6)^{1/2} = 26,71 \mu\text{m}$$

Data Sampel 0,5Cu 20% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 113 + \left( \frac{27,33}{2} \right) \right] = 1584,86 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{1584,86} = 630,97 \mu\text{m}^2$$

$$d = (630,97)^{1/2} = 25,12 \mu\text{m}$$

Data Sampel 0,5Cu 30% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 125,67 + \left( \frac{32}{2} \right) \right] = 1772,542 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{1772,542} = 564,16 \mu\text{m}^2$$

$$d = (564,16)^{1/2} = 23,75 \mu\text{m}$$

Data Sampel 1Cu 0% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 52,67 + \left( \frac{20}{2} \right) \right] = 784,9 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{784,9} = 1275,37 \mu\text{m}^2$$

$$d = (1275,37)^{1/2} = 35,71 \mu\text{m}$$

Data Sampel 1Cu 10% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 188 + \left( \frac{30}{2} \right) \right] = 2539,95 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{2539,95} = 393,71 \mu\text{m}^2$$

$$d = (393,71)^{1/2} = 19,84 \mu\text{m}$$

Data Sampel 1Cu 20% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 15,67 + \left( \frac{7,33}{2} \right) \right] = 241,9 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{241,9} = 4133,94 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$d = (4133,94)^{1/2} = 64,3 \text{ } \mu\text{m}$$

Data Sampel 1Cu 30% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 210,33 + \left( \frac{31}{2} \right) \right] = 2825,64 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{2825,64} = 353,9 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$d = (353,9)^{1/2} = 18,81 \text{ } \mu\text{m}$$

Data Sampel 2Cu 0% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 45,33 + \left( \frac{14,33}{2} \right) \right] = 656,88 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{656,88} = 1522,34 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$d = (1522,34)^{1/2} = 39,02 \text{ } \mu\text{m}$$

Data Sampel 2Cu 10% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 103,67 + \left( \frac{14,33}{2} \right) \right] = 1457,66 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{1457,66} = 686,03 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$d = (686,03)^{1/2} = 26,19 \text{ } \mu\text{m}$$

Data Sampel 2Cu 20% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 117,67 + \left( \frac{31,33}{2} \right) \right] = 1668,274 \text{ mm}^{-2}$$

$$A = \frac{10^6}{1668,274} = 599,42 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$d = (599,42)^{1/2} = 24,48 \text{ } \mu\text{m}$$

Data Sampel 2Cu 30% reduksi

$$f = \frac{M^2}{a} = \frac{50^2}{199,8} = 12,5 \text{ mm}^{-2}$$

$$N_A = f \left[ n_1 + \left( \frac{n_2}{2} \right) \right] = 12,5 \left[ 159,67 + \left( \frac{34,67}{2} \right) \right] = 2214,63 \text{ mm}^{-2}$$

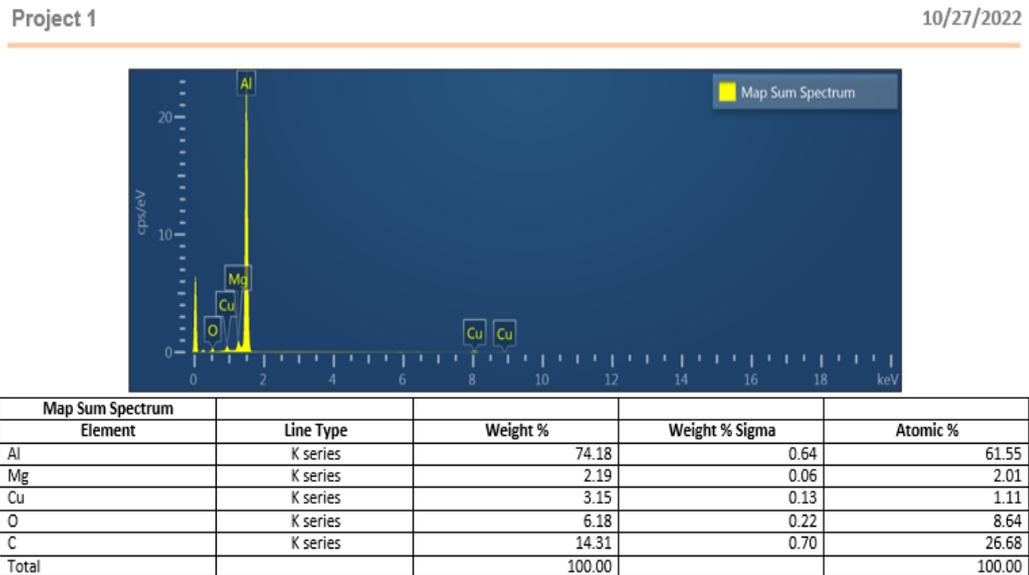
$$A = \frac{10^6}{2214,63} = 451,54 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$d = (451,54)^{1/2} = 21,25 \text{ } \mu\text{m}$$

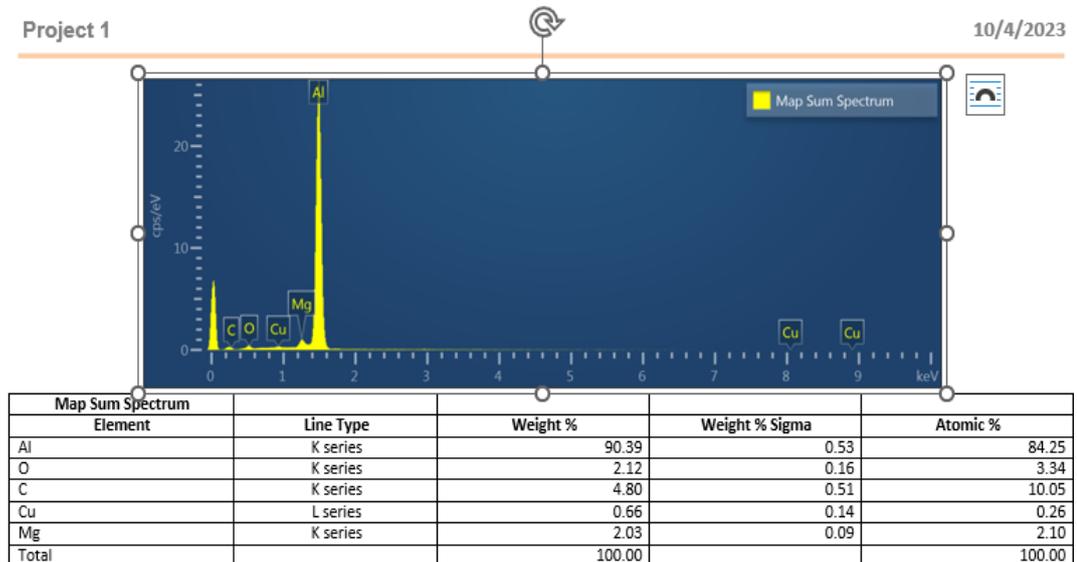
**LAMPIRAN B**  
**DATA HASIL PENELITIAN**

## Lampiran B. Data Hasil Penelitian

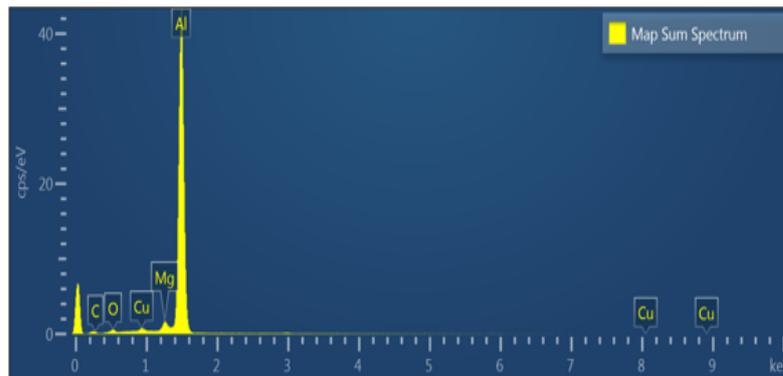
### B.1 Data Hasil Pengujian SEM-EDS



Gambar B.1 Hasil uji komposisi EDS *Masteralloy* aluminium 2024



Gambar B.2 Hasil uji komposisi EDS penambahan Cu 0,5 %



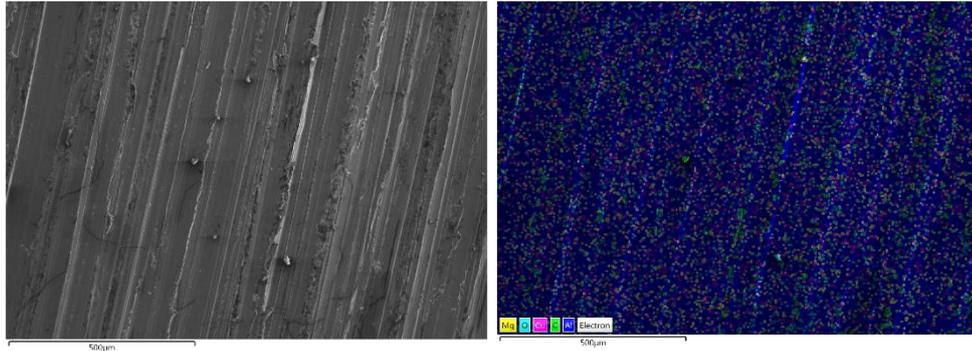
Map Sum Spectrum				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	91.68	0.40	87.73
Mg	K series	1.98	0.07	2.10
O	K series	1.62	0.12	2.62
Cu	L series	1.49	0.12	0.61
C	K series	3.23	0.38	6.94
Total		100.00		100.00

**Gambar B.3** Hasil uji komposisi EDS penambahan Cu 1 %

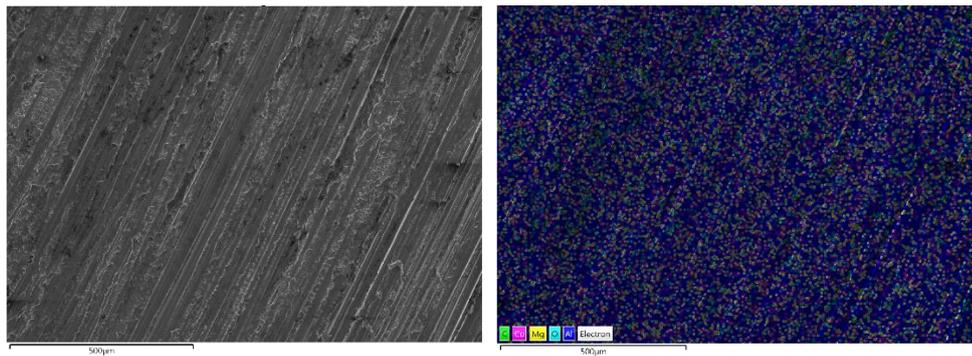


Map Sum Spectrum				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K series	92.46	0.47	91.34
O	K series	1.10	0.15	1.83
C	K series	1.64	0.43	3.64
Cu	L series	3.07	0.17	1.29
Mg	K series	1.72	0.09	1.89
Total		100.00		100.00

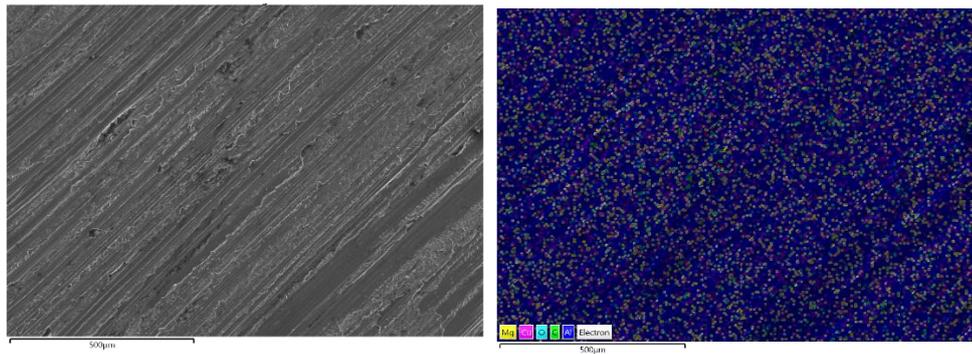
**Gambar B.4** Hasil uji komposisi EDS penambahan Cu 2 %



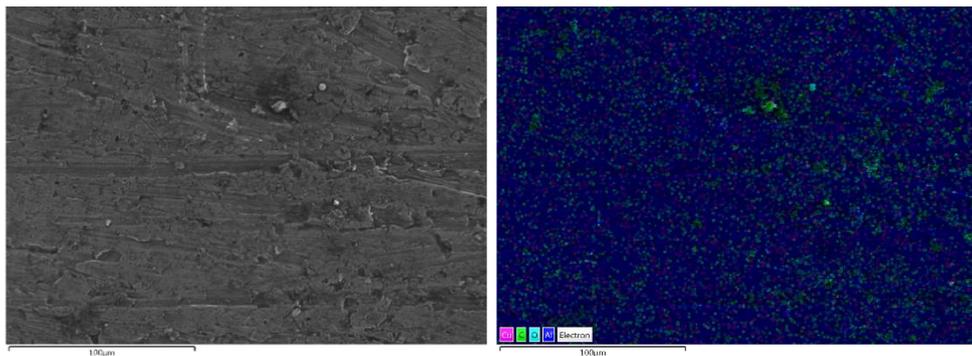
**Gambar B.5** Gambar SEM Sampel 0,5Cu 0% Reduksi



**Gambar B.6** Gambar EDS Sampel 1Cu 0% Reduksi



**Gambar B.7** Gambar EDS Sampel 2Cu 0% Reduksi



**Gambar B.8** Gambar EDS Sampel 0,5Cu 10% Reduksi

## B.2 Data Hasil Pengujian Tarik

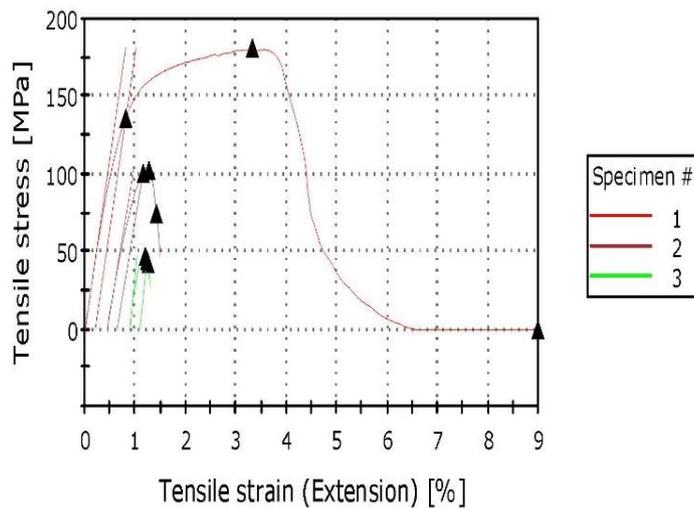


### TEST RESULT

Report No	061/EXT/UNT/09/23
Material	Aluminium
Test Method	ASTM E8
Test Machine	INSTRON 5982
Extensometer	Clip On GL 50 mm
Operator Name	AF
Room Temp.	27
%Humidity	70
Rate 1	0.005 mm/mm/min
Rate 2	0.05 mm/mm/min

Graph 1

Specimen 1 to 3



	Width [mm]	Thickness [mm]	Maximum Load [kN]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) [MPa]	Tensile strain (Extension) at Maximum Load [%]	Break Location	Modulus-1 [ Gpa ]	Code
1	5.49	4.74	4.71	181.32	135.76	3.324	A (Inside GL)	5.454	0.5 Cu 10%
2	6.04	4.32	2.68	102.64	100.36	0.827	A (Inside GL)	12.416	0.5 Cu 20%
3	6.00	3.98	1.13	47.21	44.73	0.304	A (Inside GL)	15.539	0.5 Cu 20%

Note: The result just for this test

**Gambar B.9** Data pengujian tarik sampel 10% reduksi

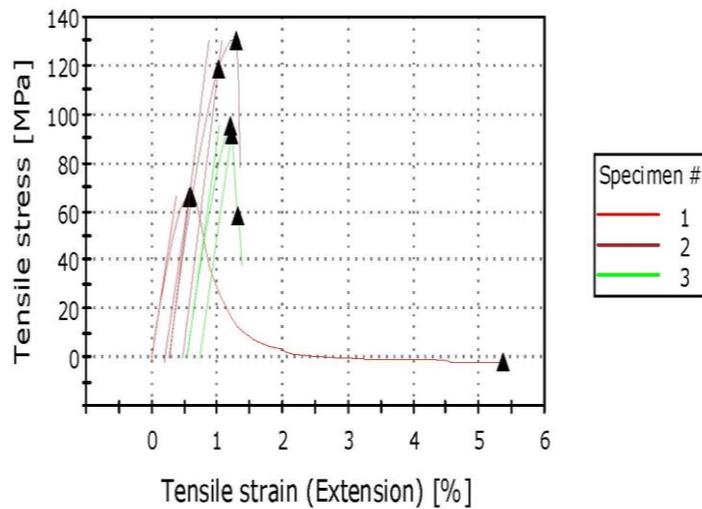


TEST RESULT

Report No	062/EXT/UNT/09/23
Material	Aluminium
Test Method	ASTM E8
Test Machine	INSTRON 5982
Extensometer	Clip On GL 50 mm
Operator Name	AF
Room Temp.	27
%Humidity	70
Rate 1	0.005 mm/mm/min
Rate 2	0.05 mm/mm/min

Graph 1

Specimen 1 to 3



	Width [mm]	Thickness [mm]	Maximum Load [kN]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) [MPa]	Tensile strain (Extension) at Maximum Load [%]	Break Location	Modulus-1 [ Gpa ]	Code
1	5.74	4.92	1.88	66.50	66.24	0.591	A (Inside GL)	11.250	1 Cu 10%
2	5.88	4.12	3.16	130.36	118.71	1.017	A (Inside GL)	12.813	1 Cu 10%
3	6.47	4.30	2.65	95.38	91.88	0.664	A (Inside GL)	14.374	1 Cu 10%

Note: The result just for this test

**Gambar B.10** Data pengujian tarik sampel 20% reduksi

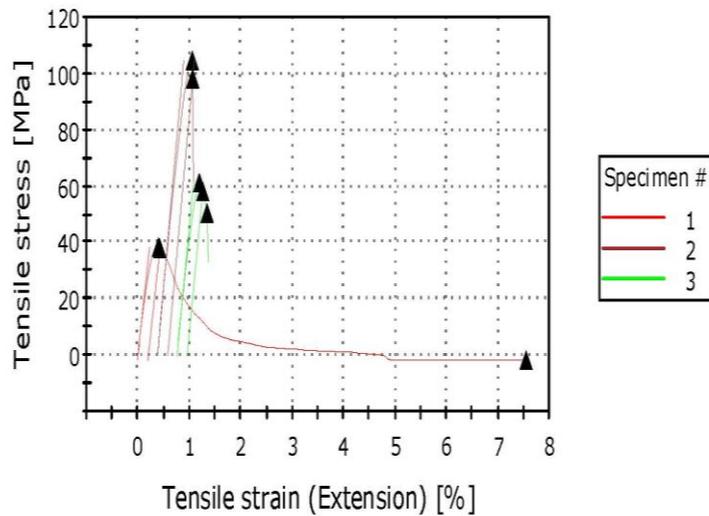


TEST RESULT

Report No	063/EXT/UNT/09/23
Material	Aluminium
Test Method	ASTM E8
Test Machine	INSTRON 5982
Extensometer	Clip On GL 50 mm
Operator Name	AF
Room Temp.	27
%Humidity	70
Rate 1	0.005 mm/mm/min
Rate 2	0.05 mm/mm/min

Graph 1

Specimen 1 to 3



	Width [mm]	Thickness [mm]	Maximum Load [kN]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) [MPa]	Tensile strain (Extension) at Maximum Load [%]	Break Location	Modulus-1 [Gpa]	Code
1	5.88	4.69	1.07	38.70	38.28	0.403	A (Inside GL)	9.604	2 Cu 10%
2	6.04	4.39	2.77	104.54	98.12	0.679	A (Inside GL)	15.398	2 Cu 20%
3	6.02	4.17	1.54	61.45	58.15	0.439	A (Inside GL)	13.995	2 Cu 30%

Note: The result just for this test

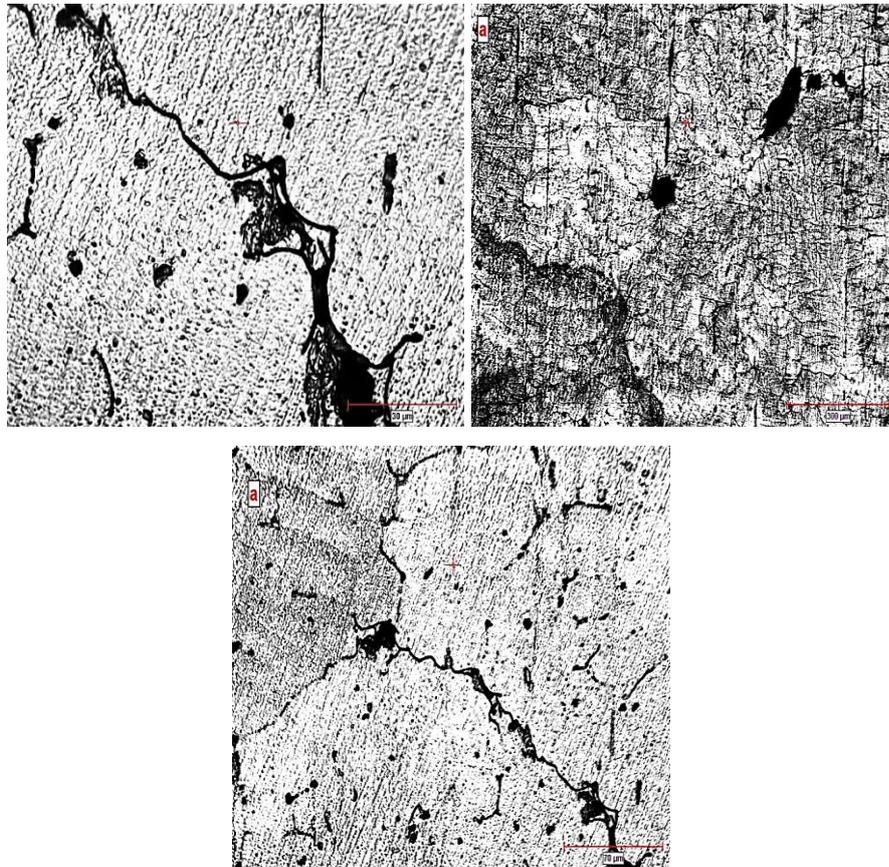
**Gambar B.11** Data pengujian tarik sampel 30% reduksi

### B.3 Data Hasil Pengujian Metalografi & Kekerasan

Sample Name : 0.5 Cu 10%  
Free Text :  
Calibration : 0.465909  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
Magnification : 20x  
Force : 100 gf  
Dwell Time : 10 sec .

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	40.7	41.4	110.10
2	44.2	40.2	104.15
3	43.2	40.2	106.47
4	43.2	41.2	104.15
5	41.8	42.1	105.30

50x, 200x, 500x

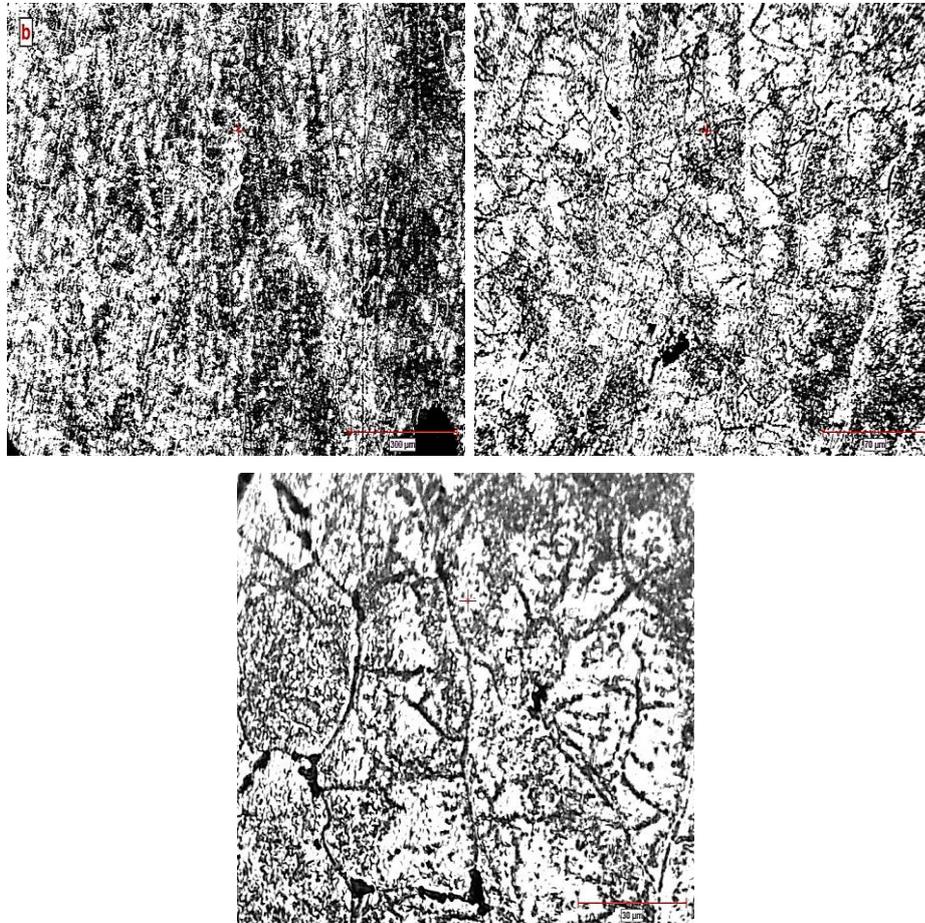


**Gambar B.12** Data pengujian metalografi dan kekerasan 0,5Cu 10% reduksi

Sample Name : 0.5 Cu 20%  
 Free Text :  
 Calibration : 0.465909  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
 Magnification : 20x  
 Force : 100 gf  
 Dwell Time : 10 sec.

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	47.2	46.7	84.18
2	44.2	46.0	91.22
3	46.5	46.9	85.01
4	48.1	47.2	81.74
5	45.5	46.0	88.48

50x, 200x, 500x

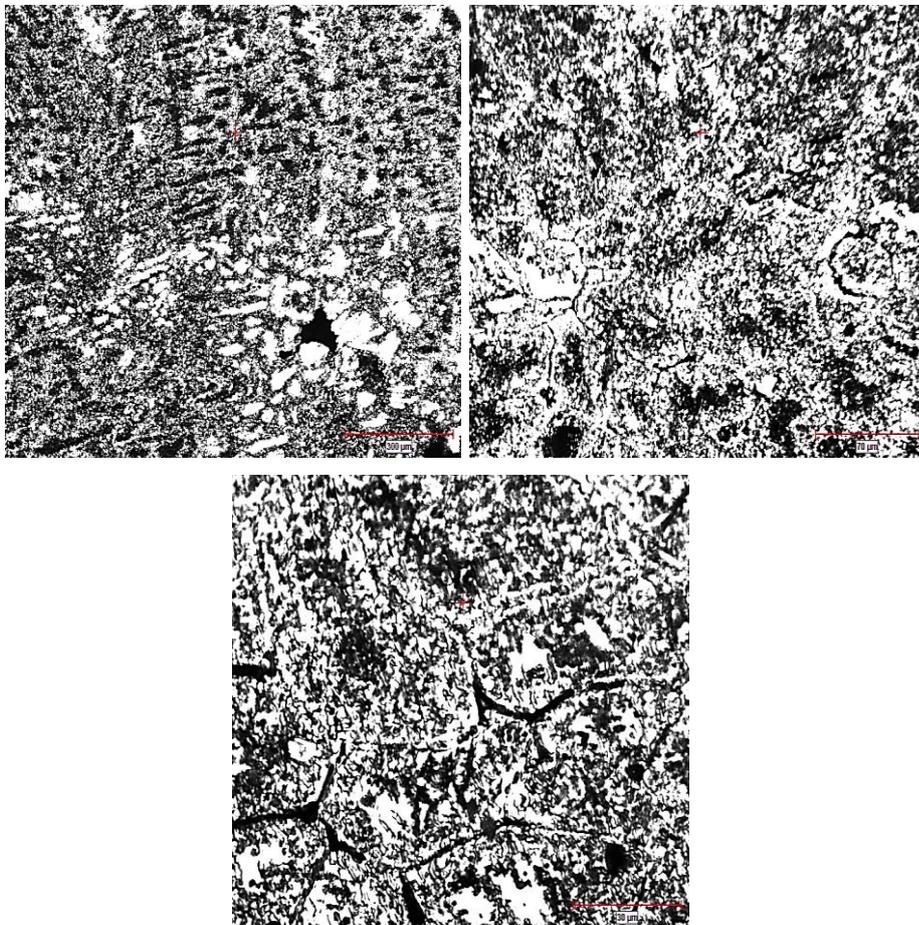


**Gambar B.13** Data pengujian metalografi dan kekerasan 0,5Cu 20% reduksi

Sample Name : 0.5 Cu 30%  
 Free Text :  
 Calibration : 0.4659  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
 Magnification : 20x  
 Force : 100 gf  
 Dwell Time : 10 sec

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	46.7	47.2	84.2
2	48.3	49.9	76.8
3	47.4	46.2	84.6
4	56.4	58.3	56.4
5	46.9	46.0	85.9

50x, 200x, 500x

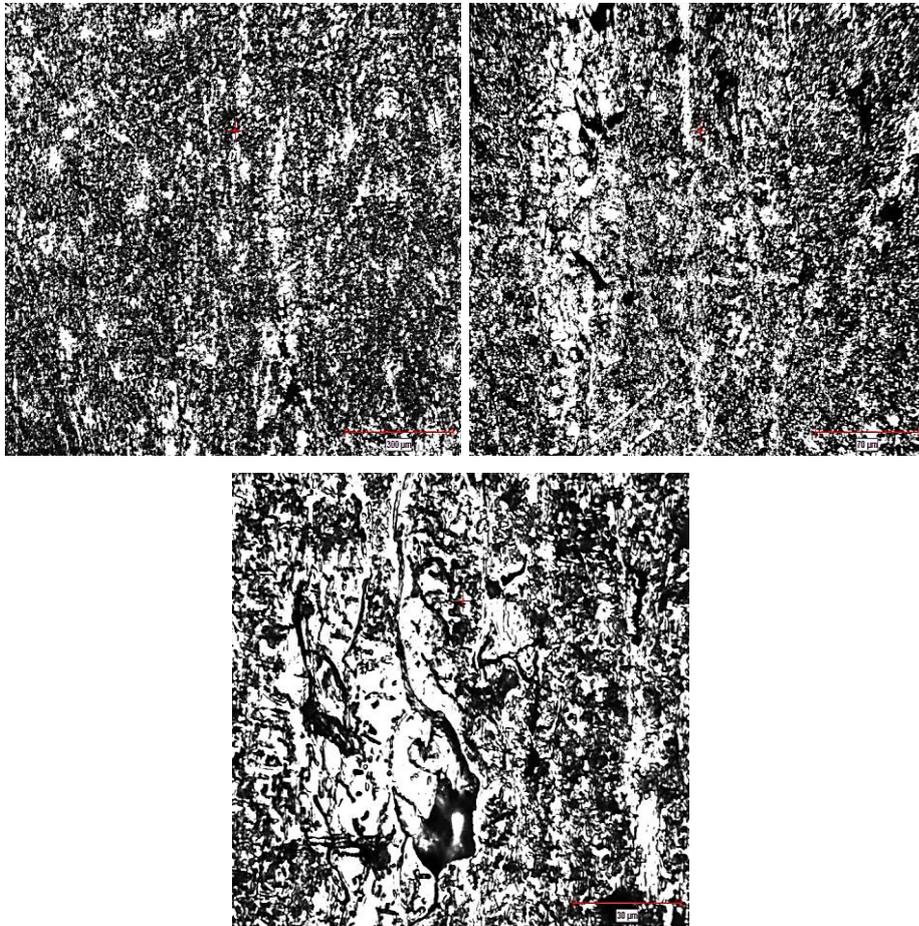


**Gambar B.14** Data pengujian metalografi dan kekerasan 0,5Cu 30% reduksi

Sample Name : 1 Cu 10%  
 Free Text :  
 Calibration : 0.4659  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
 Magnification : 20x  
 Force : 100 gf  
 Dwell Time : 10 sec.

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	50.4	47.9	76.82
2	48.8	48.6	78.28
3	49.5	50.6	74.00
4	49.7	49.5	75.39
5	47.9	48.1	80.56

50x, 200x, 500x

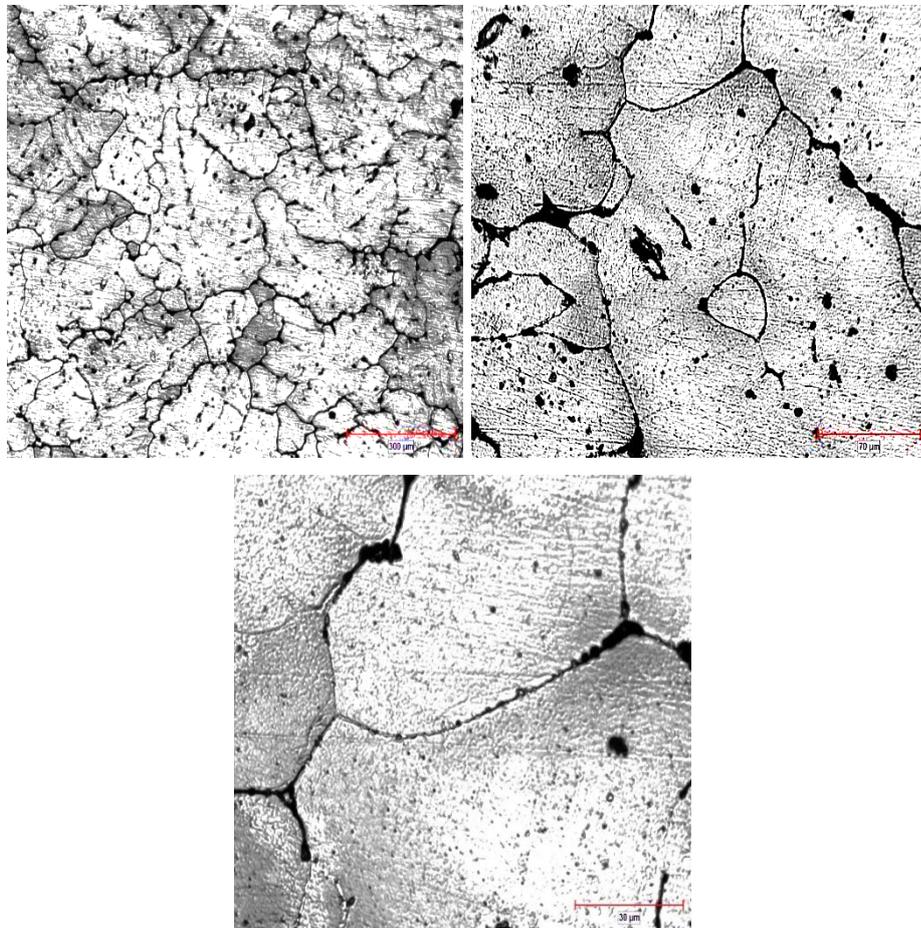


**Gambar B.15** Data pengujian metalografi dan kekerasan 1Cu 10% reduksi

Sample Name : 1 Cu 20%  
 Free Text :  
 Calibration : 0.465909  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
 Magnification : 20x  
 Force : 100 gf  
 Dwell Time : 10 sec

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	43.9	41.4	101.90
2	45.3	42.8	95.58
3	43.2	44.2	97.11
4	43.7	42.5	99.73
5	43.7	42.8	99.20

50x, 200x, 500x

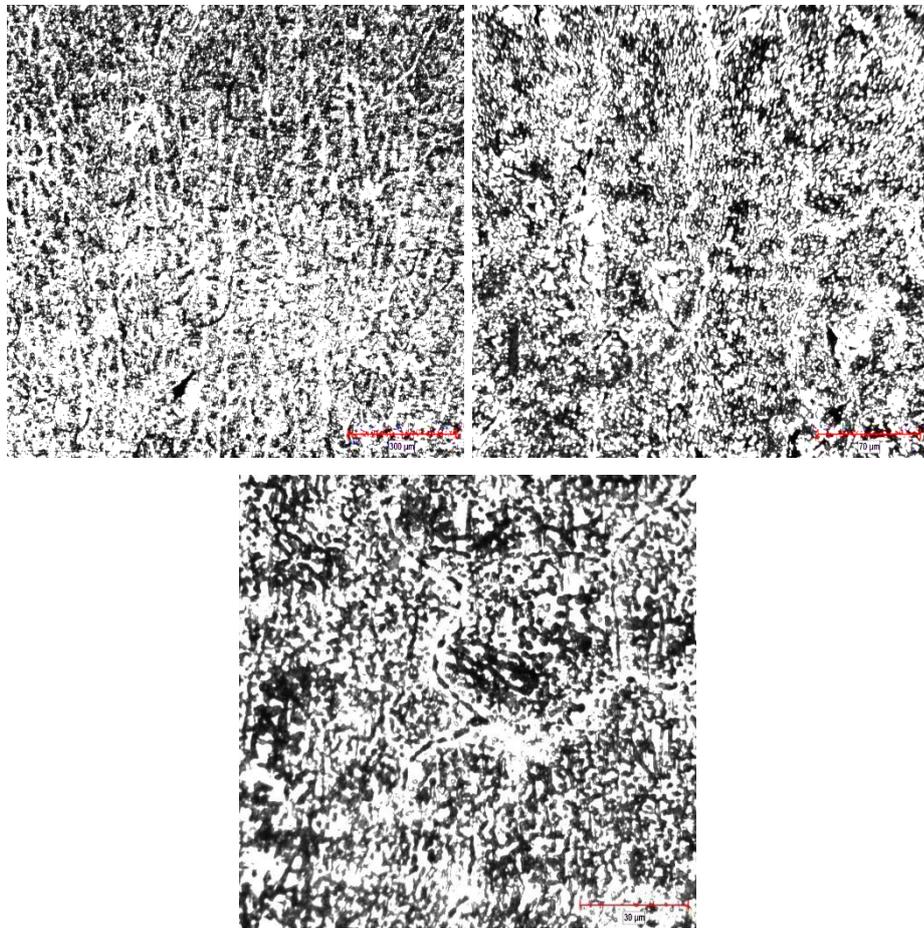


**Gambar B.16** Data pengujian metalografi dan kekerasan 1Cu 20% reduksi

Sample Name : 1 Cu 30%  
Free Text :  
Calibration : 0.465909  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
Magnification : 20x  
Force : 100 gf  
Dwell Time : 10 sec

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	43.0	45.3	95.1
2	46.9	43.5	90.8
3	46.7	44.4	89.4
4	45.3	46.7	87.6
5	45.1	44.2	93.1

50x, 200x, 500x

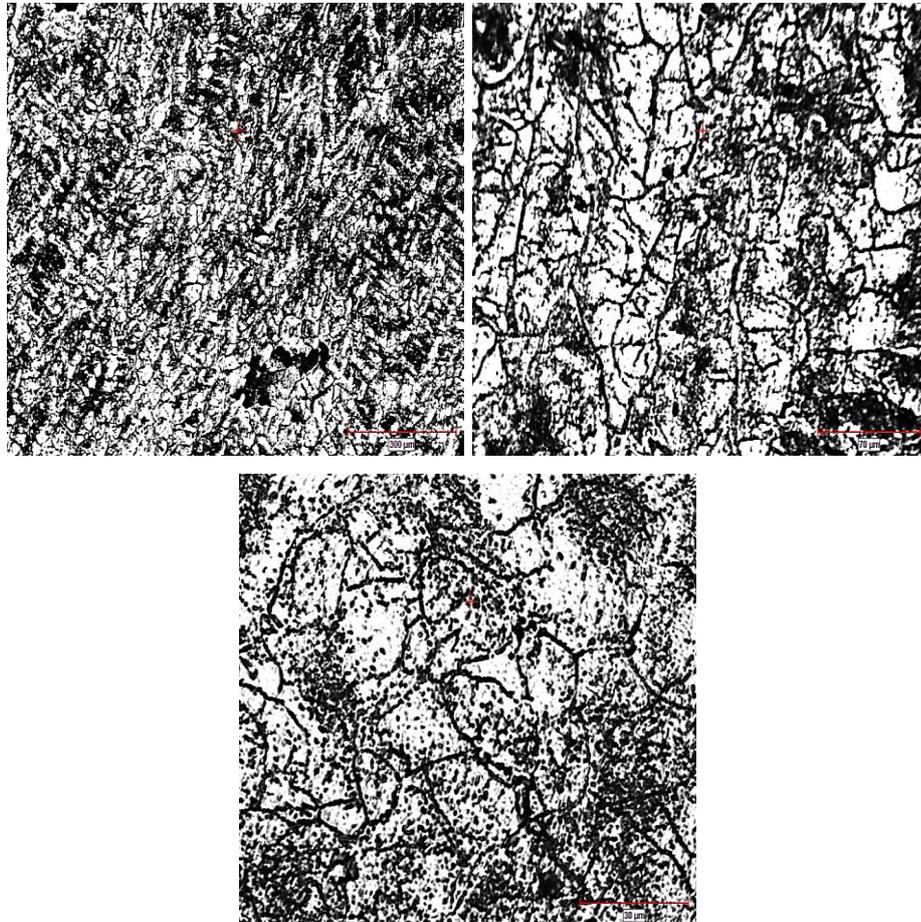


**Gambar B.17** Data pengujian metalografi dan kekerasan 1Cu 30% reduksi

Sample Name : 2 Cu 10%  
 Free Text :  
 Calibration : 0.465909  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
 Magnification : 20x  
 Force : 100 gf  
 Dwell Time : 10 sec

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	50.2	48.6	76.10
2	52.7	48.6	72.32
3	49.9	48.6	76.46
4	46.7	47.6	83.35
5	51.6	48.3	74.35

50x, 200x, 500x

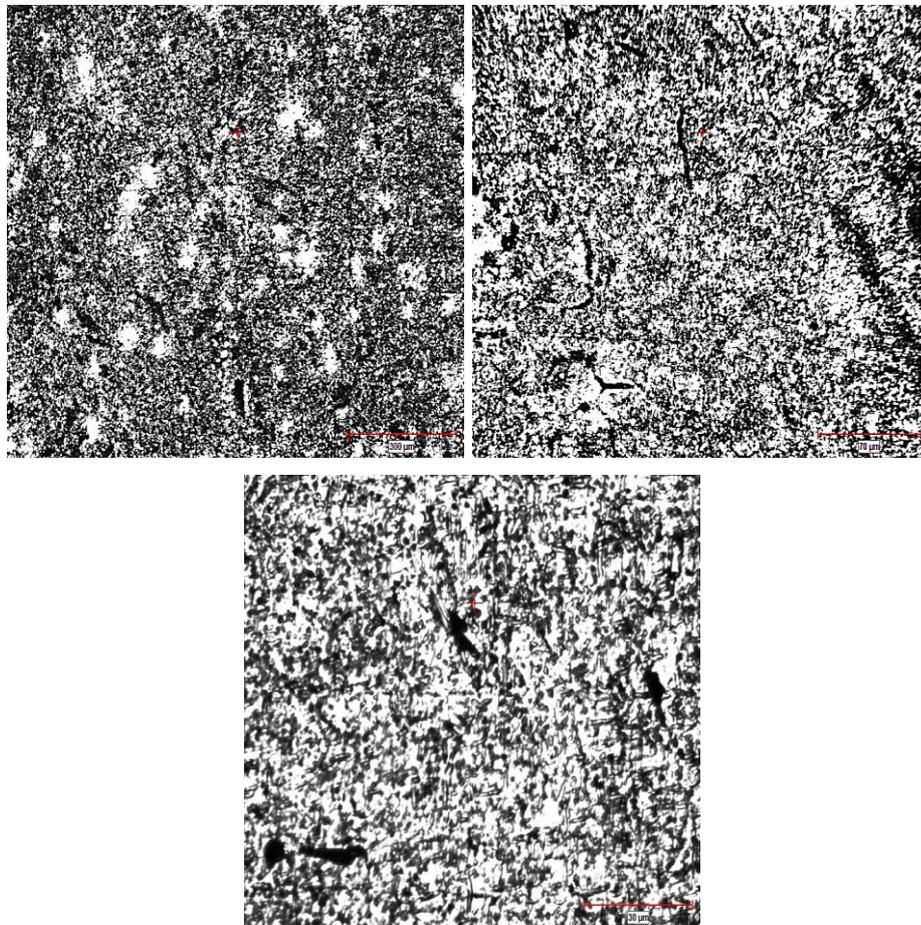


**Gambar B.18** Data pengujian metalografi dan kekerasan 2Cu 10% reduksi

Sample Name : 2 Cu 20%  
 Free Text :  
 Calibration : 0.465909  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
 Magnification : 20x  
 Force : 100 gf  
 Dwell Time : 10 sec

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	45.30	44.60	91.69
2	45.30	45.50	89.84
3	45.50	45.10	90.29
4	48.30	43.50	88.03
5	41.40	42.50	105.30

50x, 200x, 500x

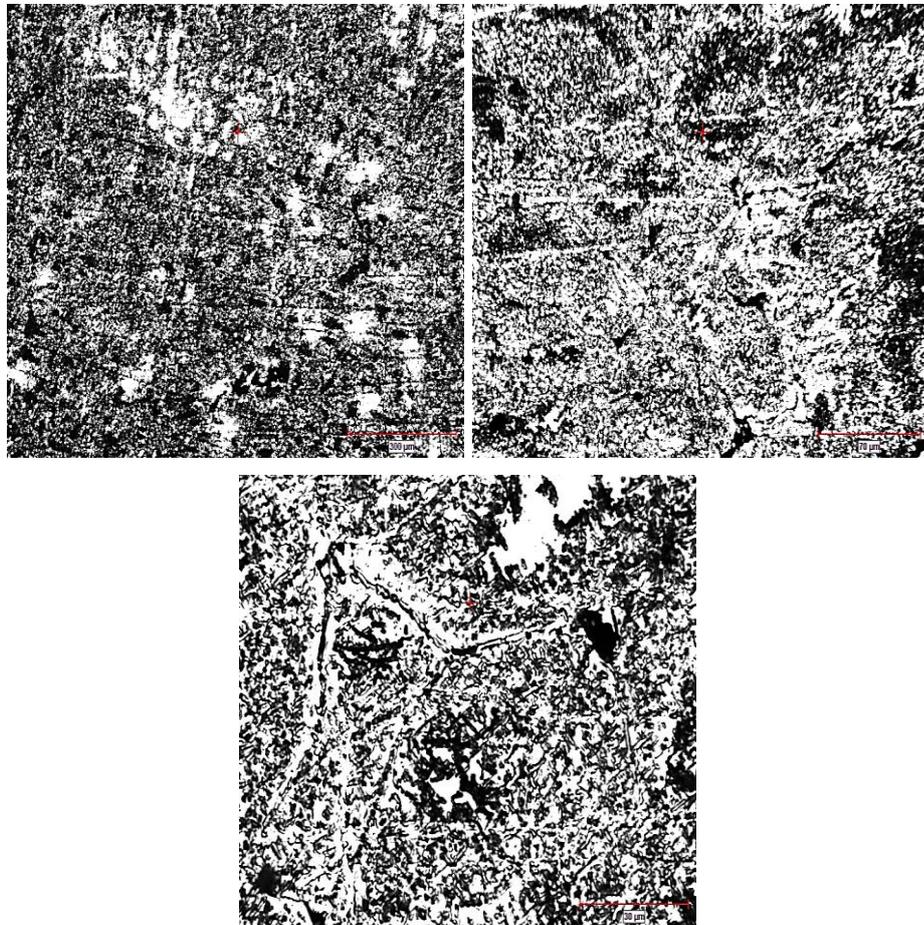


**Gambar B.19** Data pengujian metalografi dan kekerasan 2Cu 20% reduksi

Sample Name : 2 Cu 30%  
 Free Text :  
 Calibration : 0.465909  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
 Magnification : 20x  
 Force : 100 gf  
 Dwell Time : 10 sec

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	47.4	45.3	86.29
2	45.1	48.3	85.01
3	45.5	46.5	87.59
4	45.5	45.5	89.38
5	47.9	46.7	82.94

50x, 200x, 500x

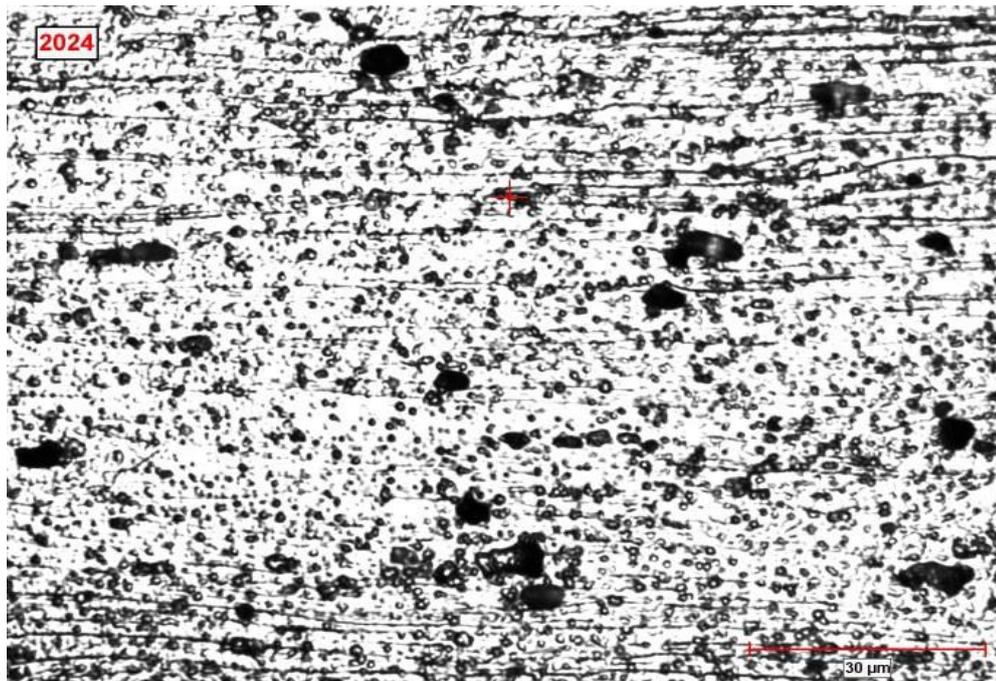


**Gambar B.20** Data pengujian metalografi dan kekerasan 2Cu 30% reduksi

Sample Name : base material  
Free Text :  
Calibration : 0.465909  $\mu\text{m}/\text{pixel}$   
Magnification : 20x  
Force : 100 gf  
Dwell Time : 10 sec

Field #	H Diag. $\mu\text{m}$	V Diag. $\mu\text{m}$	Hard. HV0.1
1	50.90	55.30	65.86
2	50.90	54.10	67.32
3	51.80	53.40	67.02
4	52.00	536.00	66.44
5	52.30	52.70	67.32

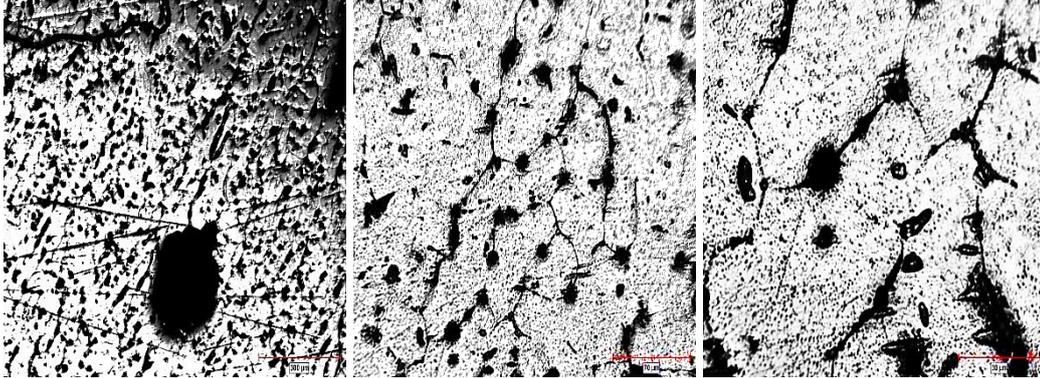
500x



**Gambar B.21** Data pengujian metalografi dan kekerasan *base material*

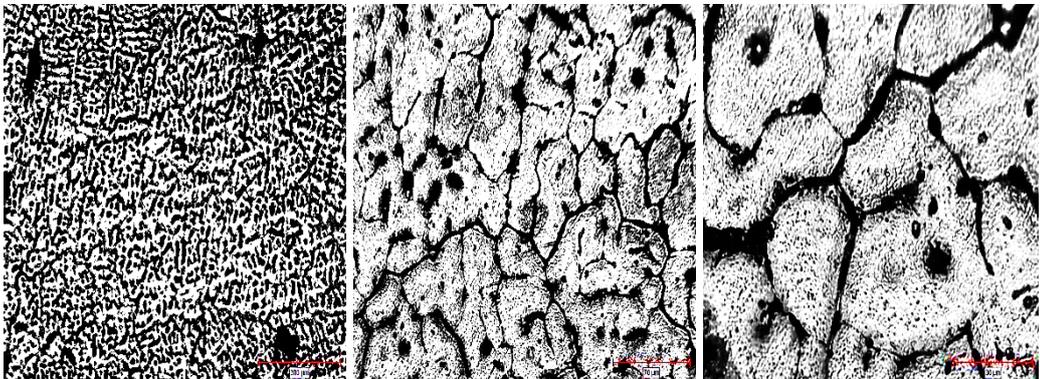
Cu 0,5%

(50x,200x,500x)



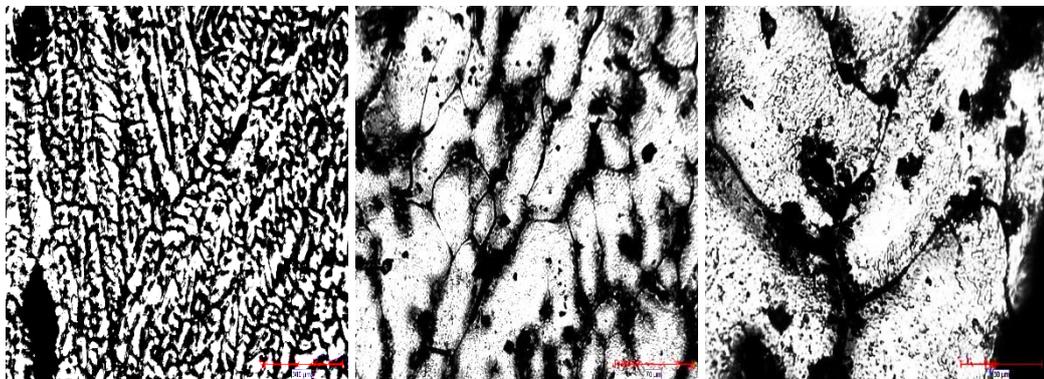
Cu 1%

(50x,200x,500x)



Cu 2%

(50x,200x,500x)



**Gambar B.22** Data pengujian metalografi sampel sebelum di rol

## B.4 Data Sertifikat Material

### CERTIFICATE OF CONFORMITY

ACTUAL MILL CHEMICAL UNIT %														
Heat No	SIZE(mm)	Alloy No	Temper	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others (single)	Others (total)	Al
STANDARD				0.25	0.4	0.1	0.1	2.2-2.8	0.15-0.35	0.1	-	0.05	0.15	REMAIN
TXG2109X50639	10*1500*3000	5052	H112	0.112	0.331	0.032	0.083	2.411	0.177	0.047	0.017	0.05	0.15	REMAIN
MECHANICAL PROPERTY TEST REPORTS														
Heat No	SIZE(mm)	Alloy No	Temper	Tensile Strength	Yield Strength	Elongation								
STANDARD				Min.178	Min.85	Min.10								
TXG2109X50639	10*1500*3000	5052	H112	197	128	28								

THE GOODS ARE IN ACCORDANCE WITH EN STANDARDS - EN-AW ASTM B209M

Gambar B.23 Sertifikat Base Material

**LAMPIRAN C**  
**GAMBAR ALAT DAN BAHAN**

**Lampiran C. Alat dan Bahan**



**Gambar C.1 Aluminium 5052**



**Gambar C.2 Aluminium 2024**



**Gambar C.3 Krusibel**



**Gambar C.4 Thermogun**



**Gambar C.5 Tabung Gas**



**Gambar C.6 Tungku Peleburan**



**Gambar C.7** Cetakan



**Gambar C.8** *Burner*



**Gambar C.9** *Alat Safety*



**Gambar C.10** *Mesin Grinding*



**Gambar C.11** *Alat Uji Tarik*



**Gambar C.12** *Mesin Mounting*



**Gambar C.13** Mikroskop Optik



**Gambar C.14** *Muffle Furnace 1*



**Gambar C.15** Alat Uji Keras



**Gambar C.16** *Muffle Furnace 2*



**Gambar C.17** Mesin Roll