

## **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)

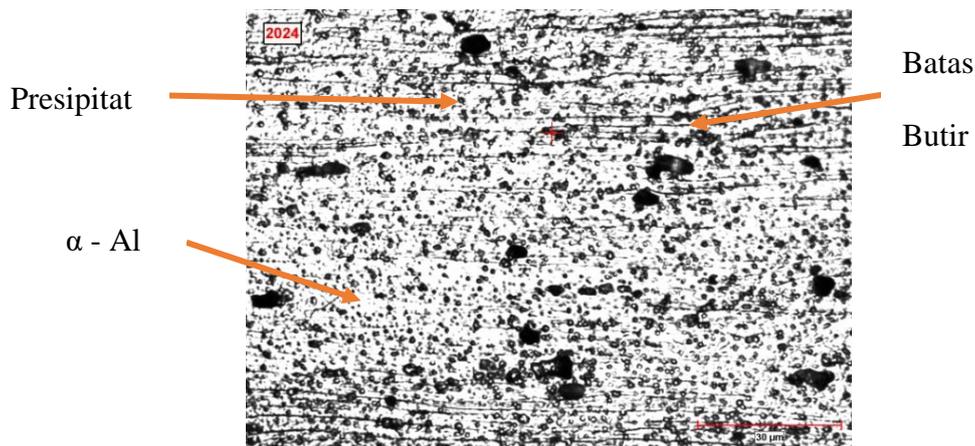
Sampel	Penambahan Berat Cu (%)	Unsur				
		Al	Cu	Mg	C	O
2	1	91,68	1,49	1,98	3,23	1,62
3	2	92,46	3,07	1,72	1,64	1,10

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

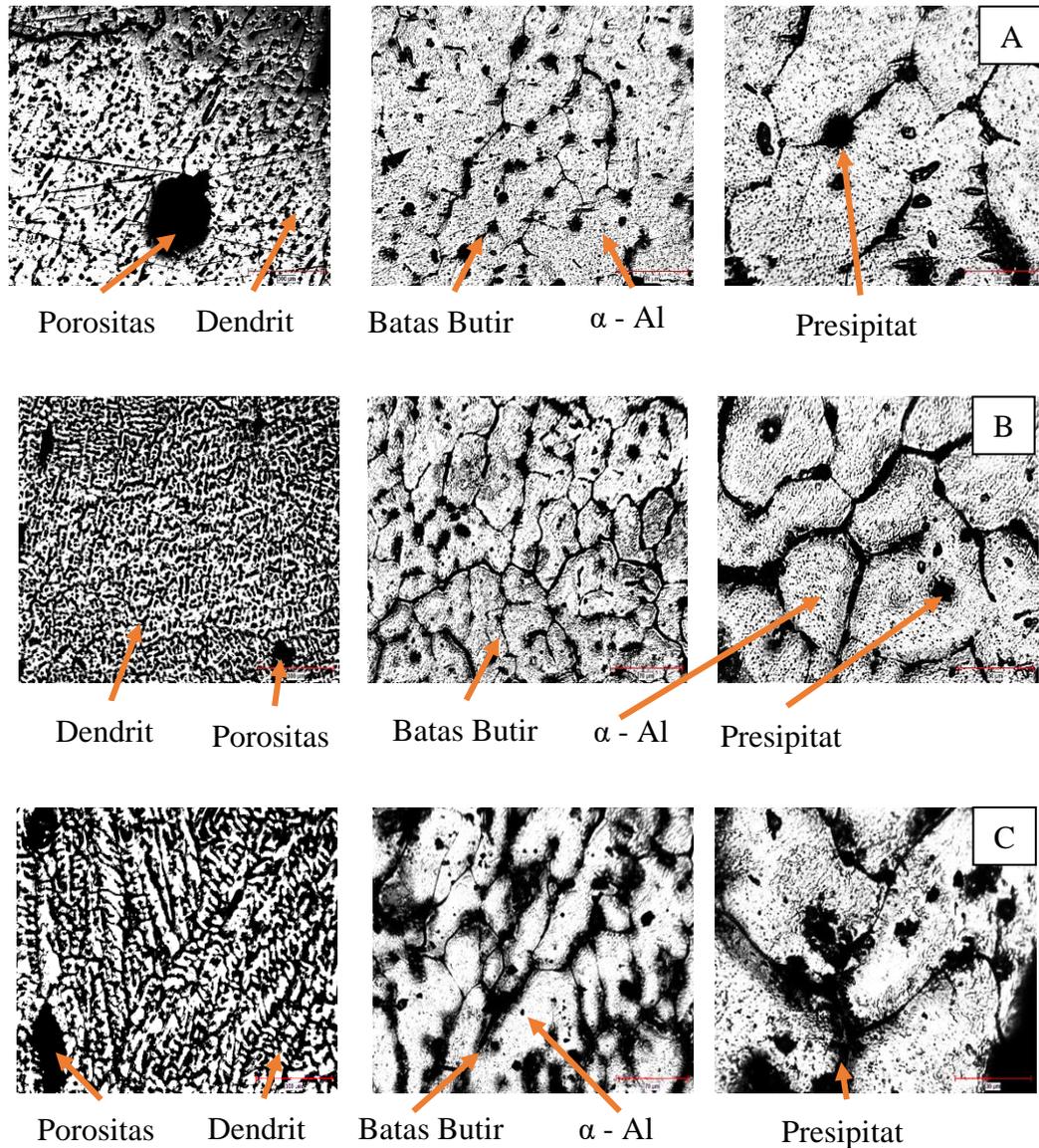
struktur yang didapat dapat diketahui komponen fasa yang terdapat pada sampel dan rata-rata ukuran butir pada setiap sampel dengan mengukurnya menggunakan *software ImageJ*. Rata-rata ukuran butir pada sampel dan komponen fasa yang terbentuk dapat mempengaruhi sifat mekanik dari setiap sampel. Analisa 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*

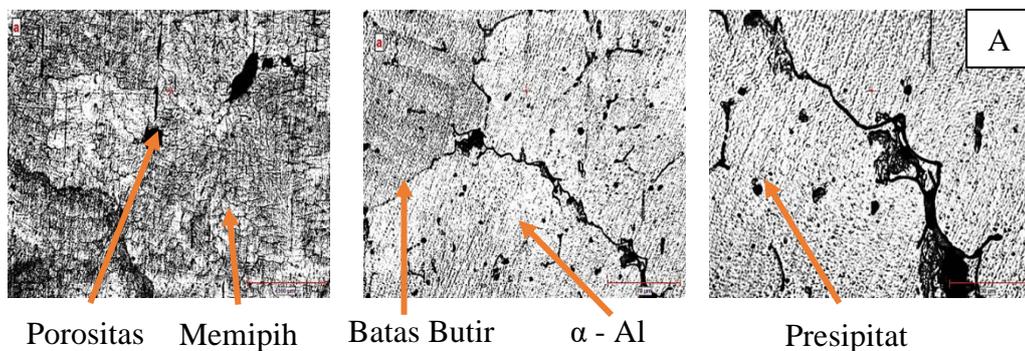
Pada Gambar 4.1 menyajikan gambar struktur mikro dari *base material* paduan aluminium 5052 menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 500x. Pada *base material* terdapat kandungan magnesium sebesar 2,411 % dan dilakukan pengerjaan dingin sebesar < 12,5%. Dapat dilihat pada Gambar 4.1 yang berwarna putih merupakan fasa  $\alpha - \text{Al}$  yang merupakan fasa aluminium yang telah tercampur dengan magnesium yang larut. Pada bagian yang berwarna hitam merupakan fasa intermetalik berupa  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$  yang terbentuk oleh magnesium yang tidak larut ke dalam matriks aluminium dan berkumpul membentuk suatu senyawa. Dapat dilihat

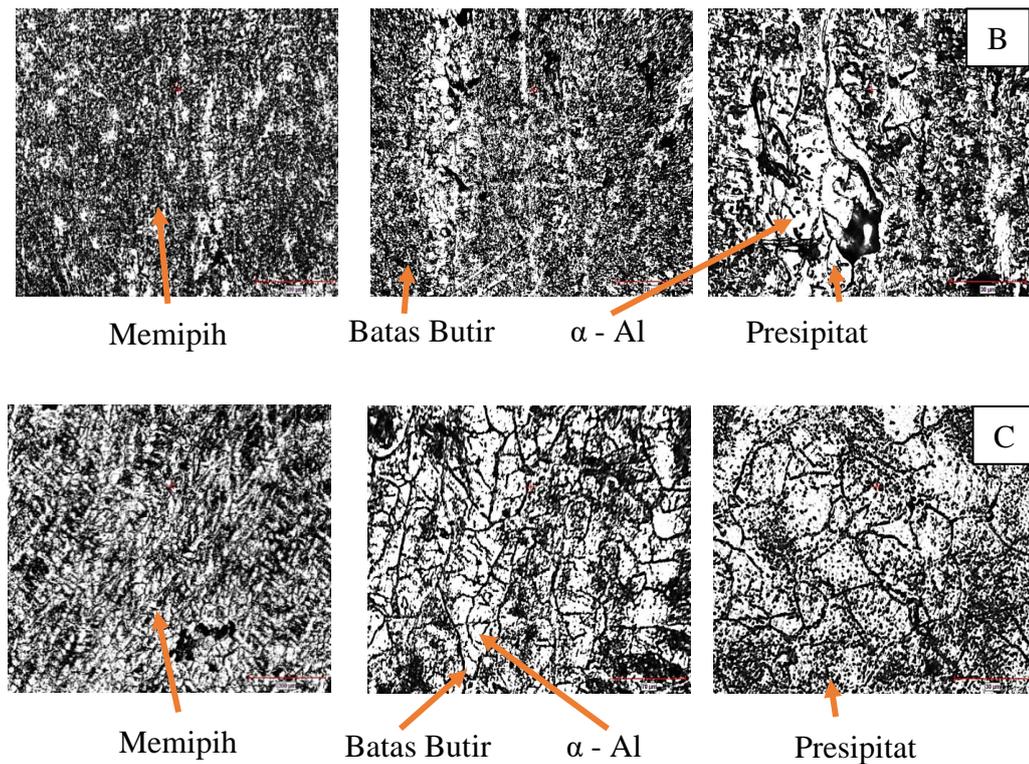
pada mikrostruktur secara keseluruhan bahwa butir yang terlihat memiliki bentuk yang memipih dan halus yang disebabkan oleh proses pengerjaan dingin yang baik. Untuk struktur mikro sampel yang belum dilakukan pengerolan dan homogenisasi dapat dilihat pada Gambar 4.2



**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

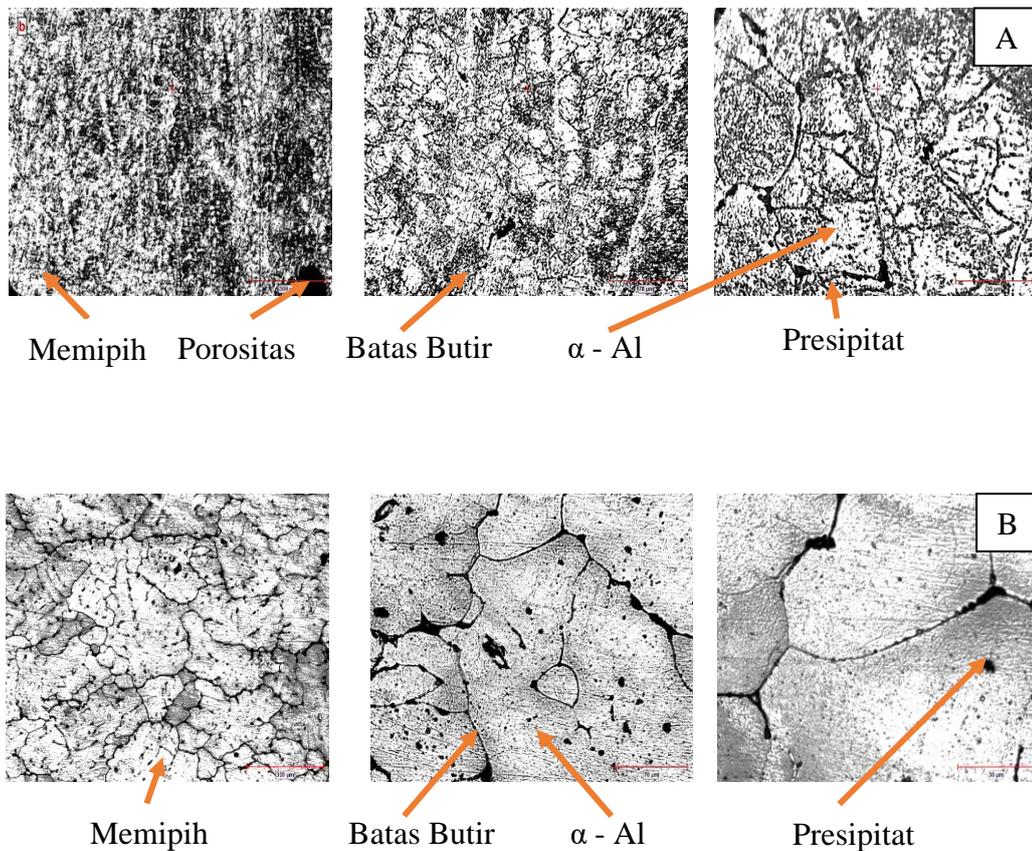


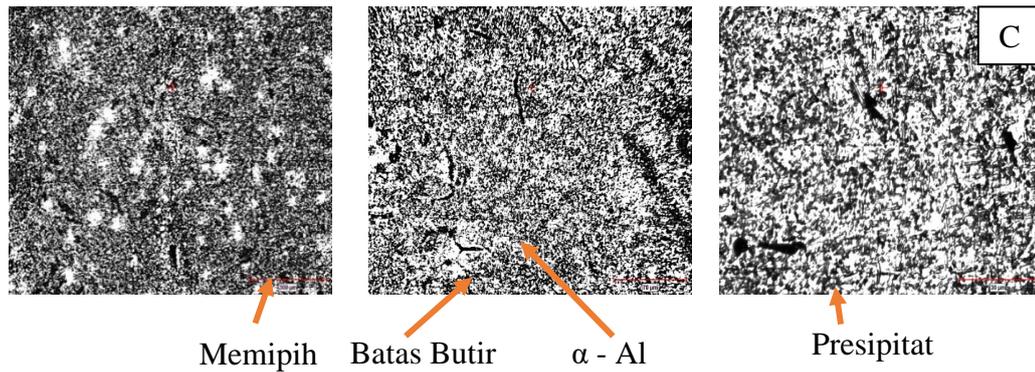


**Gambar 4.3** Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 10% Reduksi (B) 1 % Cu – 10% Reduksi (C) 2 % Cu – 10% Reduksi

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

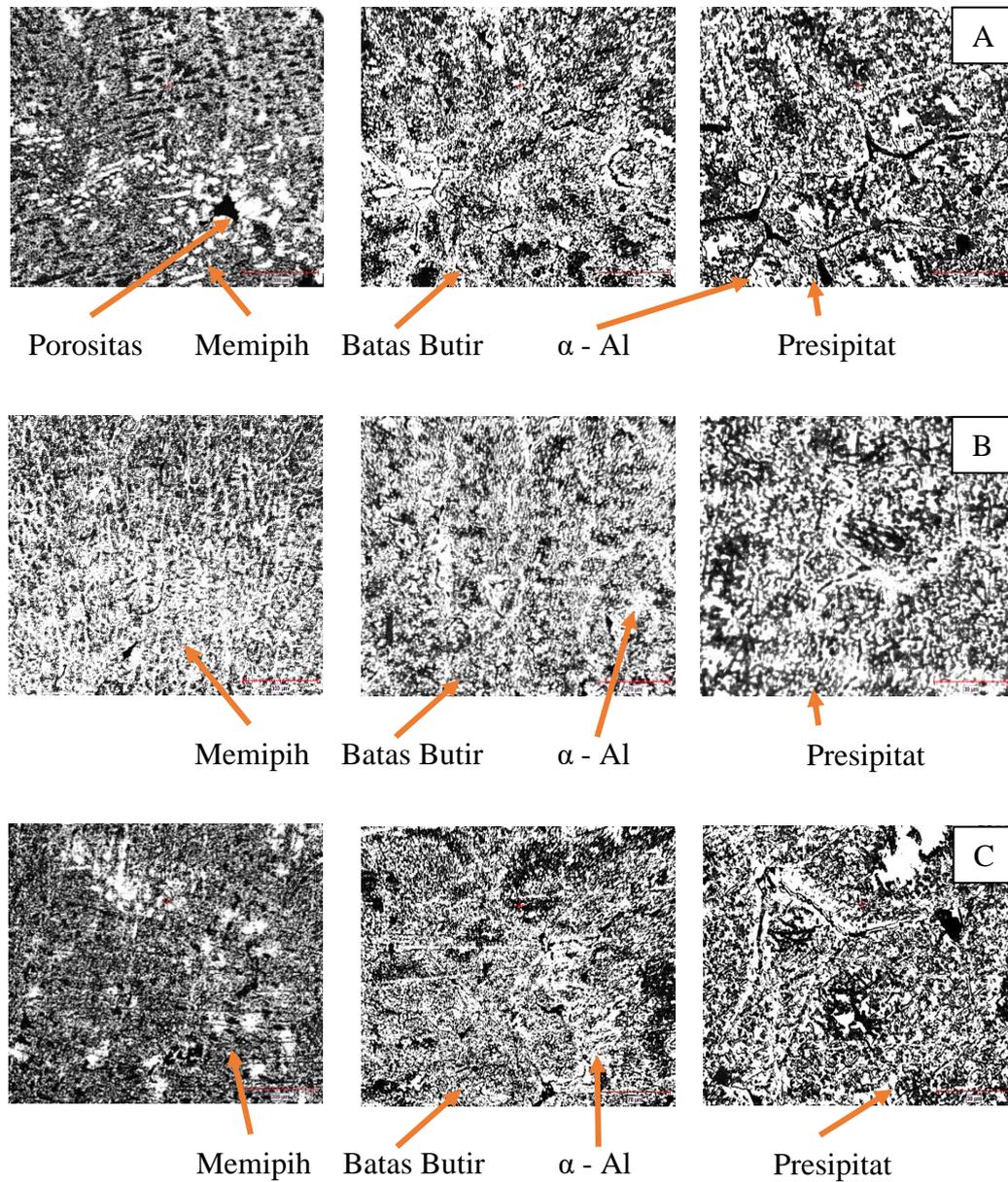




**Gambar 4.4** Struktur Mikro Perbesaran 50x, 200x, 500x Pada Sampel (A) 0,5 % Cu – 20% Reduksi (B) 1 % Cu – 20% Reduksi (C) 2 % Cu – 20% Reduksi

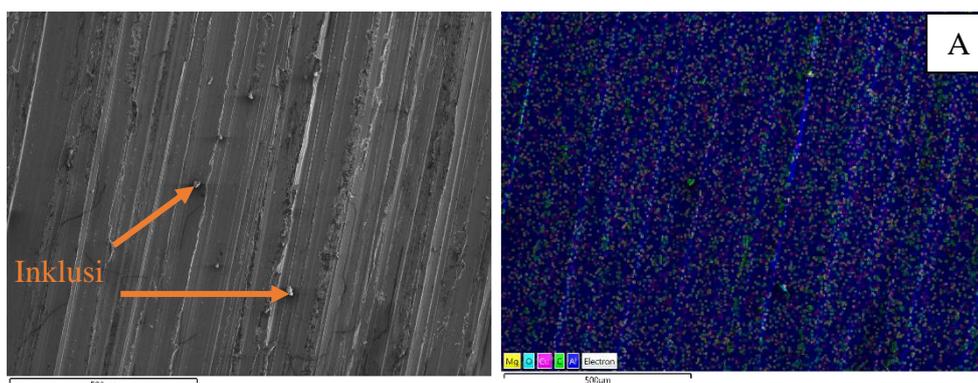
Pada Gambar 4.4 menyajikan gambar struktur mikro dari sampel yang telah dilakukan penambahan persen tembaga pada 20% reduksi pengerolan dingin pada perbesaran 50x, 200x, 500x. Pada gambar A, B, dan C juga terdapat komponen berupa fasa *solid solution*  $\alpha - Al$ , dan presipitat. Pada gambar A di 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

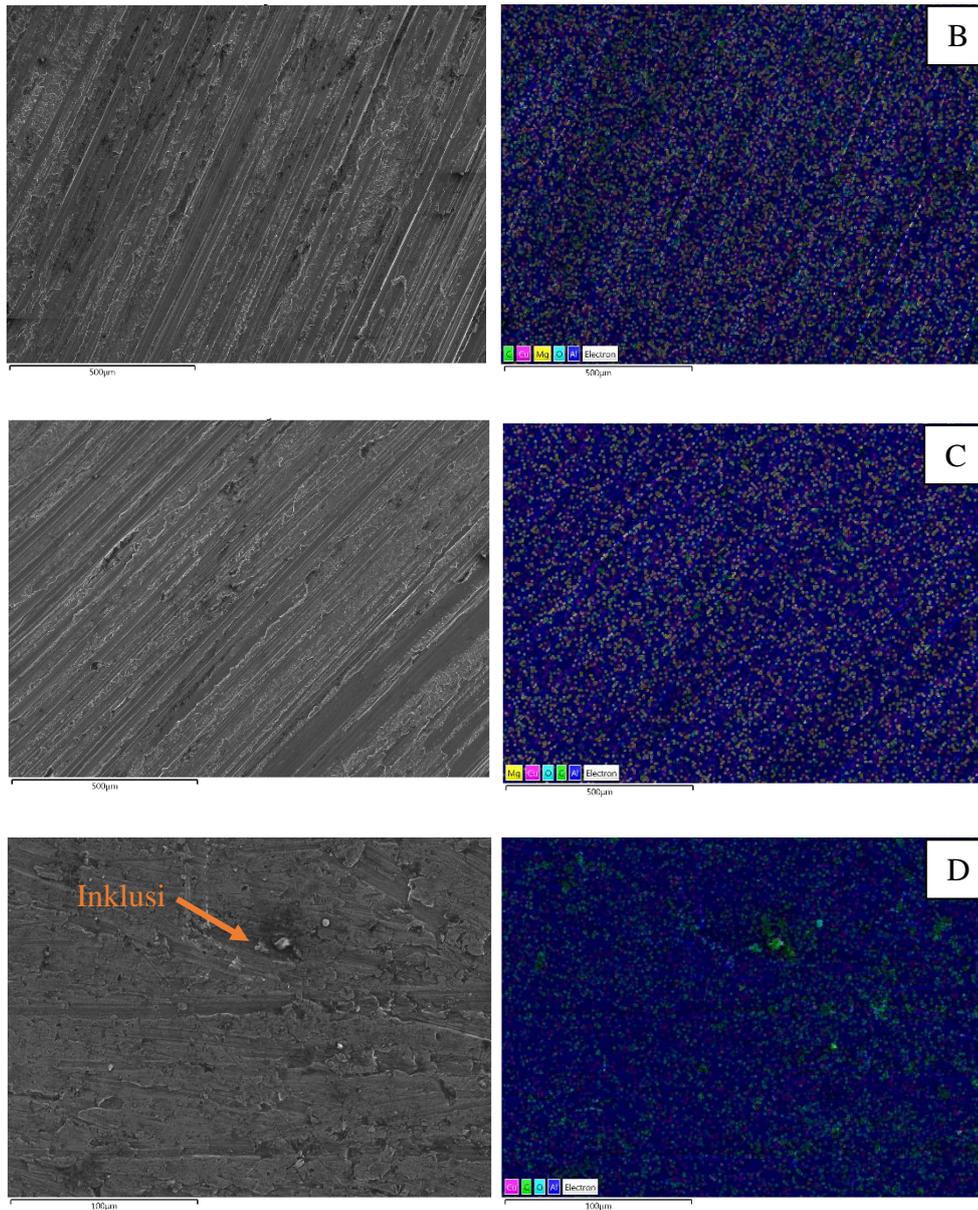
dibandingkan dengan *base material*. Untuk struktur mikro sampel yang dilakukan 30% reduksi pengerolan dapat dilihat pada Gambar 4.5



**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



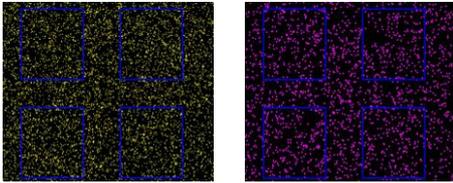
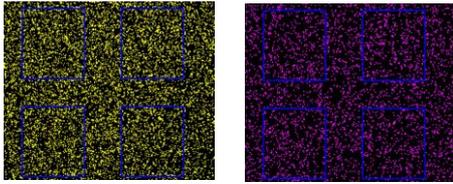
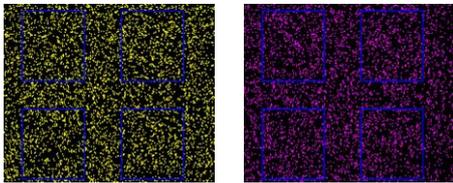
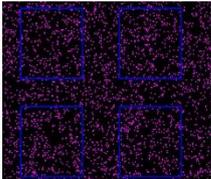


**Gambar 4.6** Hasil SEM Perbesaran x100 Pada Sampel (A) 0,5Cu 0% Reduksi (B) 1Cu 0% Reduksi (C) 2Cu 0% Reduksi (D) 0,5Cu 10% Reduksi.

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

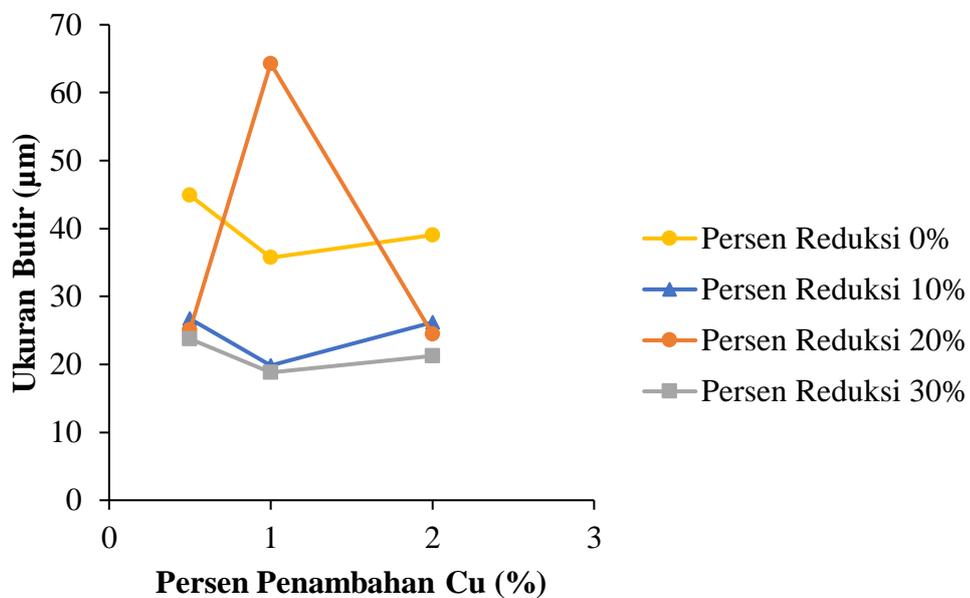
ukuran butir yang dihasilkan oleh sampel yang terbuat menjadi fluktuatif dan lebih rendah jika dibandingkan dengan *base material*. Dari hasil pengujian mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dapat ditentukan nilai rata-rata ukuran butir menggunakan *software imageJ* dengan metode *jeffries planimetric*.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

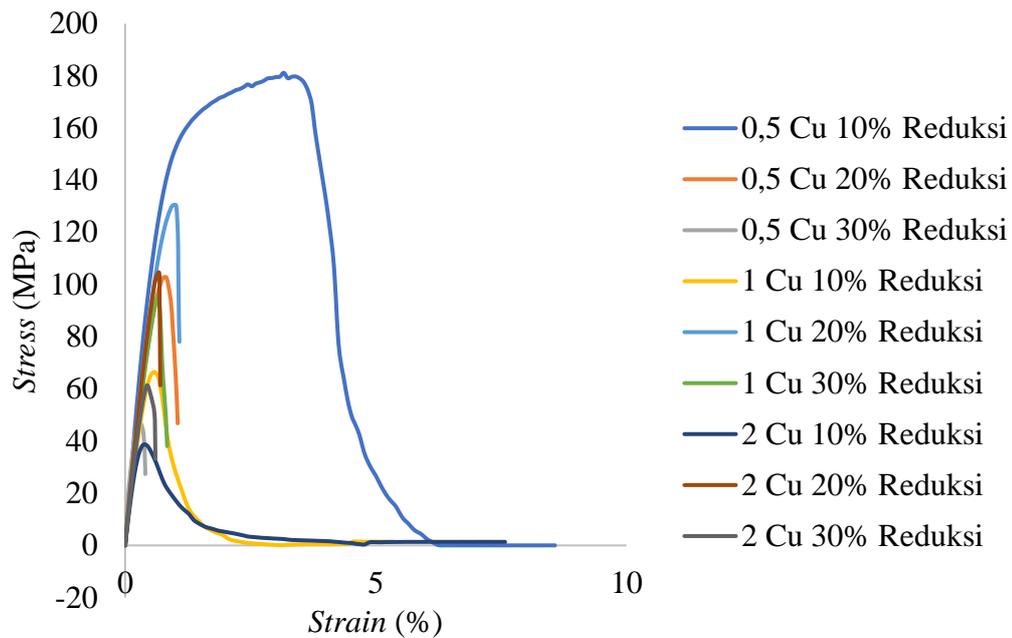
reduksi 0% terjadi penurunan dan kenaikan ukuran butir di setiap penambahan persen tembaga, dengan rata-rata ukuran butir masing-masing sebesar 44,89  $\mu\text{m}$ , 35,71  $\mu\text{m}$ , dan 39,02 $\mu\text{m}$ . Pada Sampel dengan persen reduksi 10 % terjadi penurunan dan kenaikan ukuran butir di 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.

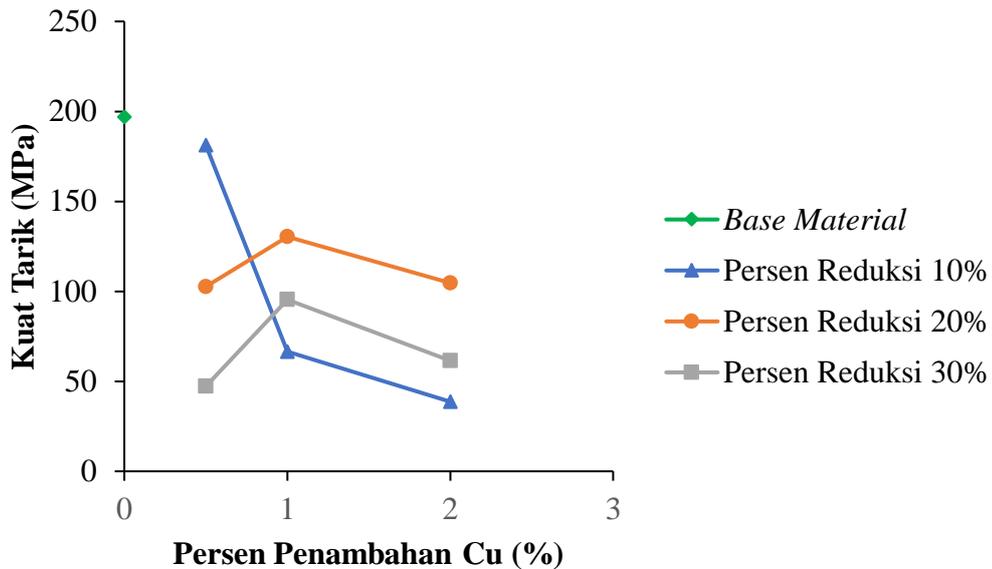


**Gambar 4.8** Kurva Uji Tarik Pada Semua Sampel

**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

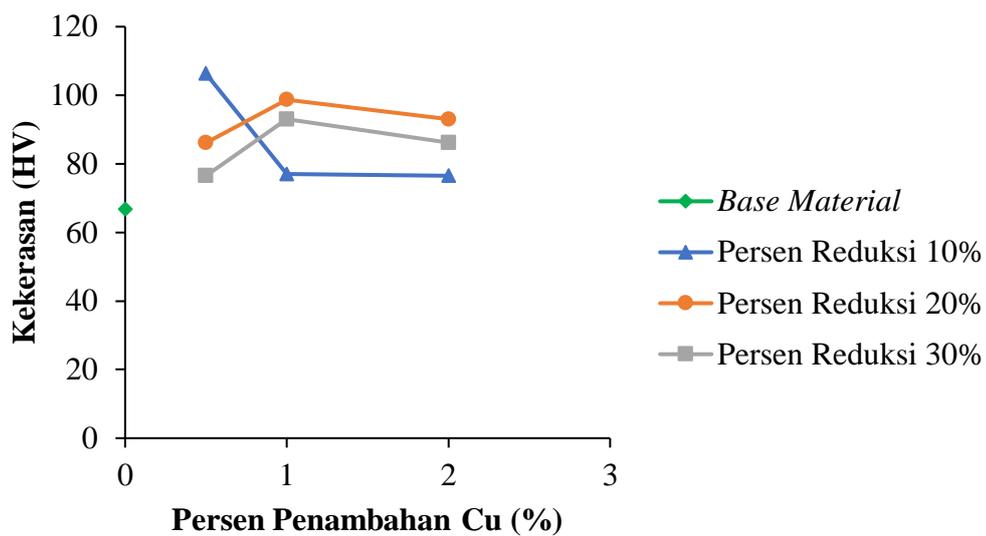
menggunakan alat *Hardness vickers* dengan analisa 5 titik. Data hasil uji kekerasan dengan variasi penambahan tembaga dan persen reduksi pengerolan dingin yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4.7 di bawah.

**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.