

**TUGAS AKHIR – TL184834**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI HOLDING TIME DAN  
METODE UP/STEP QUENCHING PADA SOLUTION  
TREATMENT TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN  
KEKERASAN PADA CU-15,9ZN-6,89AL ALLOY**

**Taufiq Ramadhan**  
NRP. 0251184000089

Dosen Pembimbing  
**Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.**  
NIP. 198805012019031008  
**Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.**  
NIP. 195809101986031002

Program Studi Teknik Material  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022





**TUGAS AKHIR – TL184834**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI HOLDING TIME DAN  
METODE UP/STEP QUENCHING PADA SOLUTION  
TREATMENT TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN  
KEKERASAN PADA CU-15,9ZN-6,89AL ALLOY**

**TAUFIQ RAMADHAN**  
NRP. 0251184000089

Dosen Pembimbing  
**Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.**  
NIP. 198805012019031008  
**Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.**  
NIP. 195809101986031002

**Program Studi Teknik Material**  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT – TL184834**

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF SOLUTION TREATMENT  
HOLDING TIME VARIATIONS AND UP/STEP QUENCHING  
METHOD ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF CU-  
15,9Zn-6,89Al Alloy**

**TAUFIQ RAMADHAN**  
NRP. 02511840000089

Advisor  
**Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.**  
NIP. 198805012019031008  
**Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng.**  
NIP. 195809101986031002

**Study Program of Materials Engineering**  
Departement of Materials and Metallurgical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022

*(This page is intentionally blank)*

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* DAN METODE *UP/STEP QUENCHING* PADA *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PADA *CU-15,9ZN-6,89AL ALLOY*

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Teknik Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **TAUFIQ RAMADHAN**  
NRP. 0251184000089

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

2. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng

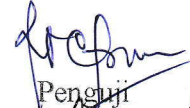
3. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

4. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc

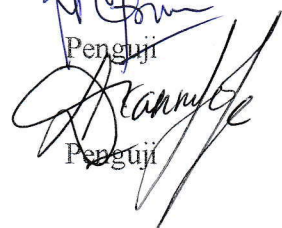


Pembimbing

Ko-Pembimbing



Penguji



Penguji



**SURABAYA**  
Juli 2022

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## APPROVAL SHEET

### ANALYSIS OF THE EFFECT OF SOLUTION TREATMENT HOLDING TIME VARIATIONS AND UP/STEP QUENCHING METHOD ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF CU-15,9Zn-6,89Al ALLOY

#### FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree of bachelor of engineering at  
Undergraduate Study Program of Materials Engineering  
Departement of Materials and Metallurgical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **TAUFIQ RAMADHAN**  
NRP. 0251184000089

Approved by Final Project Examiner Team :


1. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

2. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng

3. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

4. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.

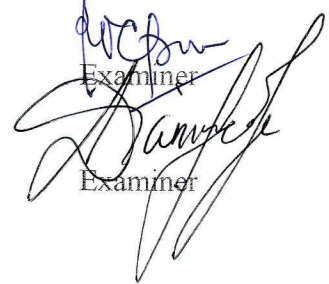


  
Advisor



Co-Advisor

  
Examiner

  
Examiner

**SURABAYA**  
July 2022

*(This page is intentionally blank)*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Taufiq Ramadhan / 02511840000089  
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi  
Dosen Pembimbing/NIP : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. / 198805012019031008

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi  *Holding Time*  dan Metode  *Up/Step Quenching*  pada  *Solution Treatment*  Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan dan Cu-15,9Zn-6,89Al Alloy” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui  
Dosen Pembimbing

(Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.)  
NIP. 198805012019031008

Surabaya, 13 Juli 2022

Mahasiswa

(Taufiq Ramadhan)  
NRP. 02511840000089

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## STATEMENT OF ORIGINALITY


The undersigned below:

Name of student/NRP : Taufiq Ramadhan / 02511840000089  
Departement : Material and Metallurgical Engineering  
Advisor/NIP : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. / 198805012019031008

Hereby declare that the Final Project with the title of “Analysis of the Effect of Solution Treatment Holding Time Variations and Up/Step Quenching Method on Microstructure and Hardness of Cu-15,9Zn-6,89Al Alloy” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.


If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Acknowledged  
Advisor

  
(Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.)  
NIP. 198805012019031008

Surabaya, July 13<sup>th</sup> 2022

Student

  
(Taufiq Ramadhan)  
NRP. 02511840000089

*(This page is intentionally blank)*

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* DAN METODE *UP/STEP QUENCHING* PADA *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PADA CU-15,9ZN-6,89AL ALLOY**

**Nama Mahasiswa / NRP** : Taufiq Ramadhan / 02511840000089  
**Departemen** : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.  
**Dosen Ko-Pembimbing** : Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.

**Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi *holding time* dan metode perlakuan panas *up quenching* dan *step quenching* saat proses *solution treatment* paduan Cu-15,9Zn-6,89Al alloy terhadap struktur mikro dan kekerasannya. Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al didapatkan melalui proses pengecoran dan diberikan perlakuan panas berupa *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment* pada temperatur 850°C selama 10,30, dan 50 menit dan didinginkan cepat melalui proses *up quenching* dan *step quenching*. Dari hasil pengujian, didapatkan struktur mikro dari paduan membentuk fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  tanpa fasa martensit ( $\beta'$ ). Fasa martensit tidak terbentuk akibat rendahnya temperatur mulai terbentuknya martensit ( $M_s$ ) yang jauh dibawah temperatur ruang. Ditemukan juga adanya perbedaan jumlah fasa  $\alpha$  akibat perbedaan laju pendinginan, dimana metode *up quenching* dengan media air di temperatur kamar menghasilkan laju pendinginan yang lebih cepat apabila dibandingkan dengan metode *step quenching* dengan media oli di temperatur 100°C. Besar butir yang dihasilkan juga memiliki perbedaan dimana seiring meningkatnya waktu tahan menyebabkan penambahan ukuran butir sedangkan laju pendinginan yang lebih cepat mengurangi ukuran butir. Perbedaan jumlah fasa  $\alpha$  dan ukuran butir akibat variasi metode *quenching* dan waktu tahan pada proses *solution treatment* menghasilkan perbedaan dari nilai kekerasan paduan. Secara keseluruhan, ukuran butir yang kecil akibat waktu tahan yang singkat seperti spesimen dengan waktu tahan selama 10 menit menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan waktu tahan selama 50 menit. Lalu, perbedaan metode *quenching*, mempengaruhi ukuran butir yang terbentuk dimana spesimen dengan metode *up quenching* yang memiliki besar butir yang lebih kecil dibandingkan spesimen dengan metode *step quenching* memiliki kekerasan yang lebih rendah akibat lebih banyaknya fasa  $\alpha$  lunak yang terbentuk. Sehingga secara keseluruhan, kekerasan tertinggi terlihat pada spesimen *as cast* (290,67±2,08 HV) diikuti oleh spesimen SQ10 (275,33±2,52 HV) dan kekerasan terendah terlihat pada spesimen UQ50 (240±2,65 HV).

**Kata Kunci:** *Cu-Zn-Al Alloy, Holding Time, Up Quenching, Solution Treatment, Step Quenching*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**ANALYSIS OF THE EFFECT OF SOLUTION TREATMENT HOLDING TIME  
VARIATIONS AND UP/STEP QUENCHING METHOD ON MICROSTRUCTURE  
AND HARDNESS OF CU-15,9Zn-6,89Al ALLOY**

**Student Name / NRP** : Taufiq Ramadhan / 0251184000089  
**Departement** : Materials and Metallurgical Engineering ITS  
**Advisor** : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.  
**Co-advisor** : Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.

**Abstract**

The purpose of this research is to analyze the variation in holding time and up quenching and step quenching heat treatment of Cu-15,9Zn-6,89Al Alloy to its microstructure and hardness. Cu-15,9Zn-6,89 alloy is made by casting and heat treated with homogenizing, annealing, and solution treatment at 850°C for 10, 30, and 50 minutes then rapidly cooled with up quenching and step quenching. From metallography testing result, it is shown that there are  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$  phases without signs of martensite ( $\beta'$ ) phases. The martensite phases couldn't form because of the temperature in which martensite starts to form ( $M_s$ ) is much lower than room temperature. It is also found that there is a difference in the amount of  $\alpha$  phases caused by the difference in cooling rate, where up quenching in water at room temperature would cause a higher cooling rate in contrast to step quenching in oil at 100°C. The resulting grain size would also differ as the holding time increases causing a growth in grain size, but a faster cooling rate would inhibit the growth of grain. The difference in grain size caused by the variation in quenching method and holding time of solution treatment result in the difference in hardness value between specimens. Overall, a small grain size caused by a brief amount of holding time like specimen with a holding time of 10 minutes yield a higher hardness value of alloy compared to specimen with a holding time of 50 minutes. The difference in quenching method would affect the amount of  $\alpha$  phases and the resulting grain size where up quenched specimens which has a lower grain size compared to step quenched specimens would have a lower hardness value because of its higher amount of soft  $\alpha$  in its microstructure. So overall, the highest hardness value is seen in *as cast* specimen ( $290,67 \pm 2,08$  HV) followed by SQ10 specimen ( $275,33 \pm 2,52$  HV) and the lowest hardness value is seen in UQ50 specimen ( $240 \pm 2,65$  HV). Sehingga secara keseluruhan, kekerasan tertinggi terlihat pada spesimen *as cast* diikuti oleh spesimen SQ10 ( $275,33 \pm 2,52$  HV) dan kekerasan terendah terlihat pada spesimen UQ50 ( $240 \pm 2,65$  HV).

**Keywords:** *Cu-Zn-Al, Holding Time, Up Quenching, Shape Memory Alloy (SMA), Step Quenching*

*(This page is intentionally blank)*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Mahakuasa karena kasih dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul “**Analisis Pengaruh Variasi  *Holding Time*  dan Metode  *Up/Step Quenching*  pada  *Solution Treatment*  terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan pada Cu-15,9Zn-6,89Al**” untuk memenuhi Mata Kuliah Tugas Akhir sebagai salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama proses penelitian, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis, diantaranya adalah:

1. Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing pertama yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir sekaligus sebagai dosen wali penulis.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
3. Kepala Departemen DTMM FTIRS ITS, Bapak Sigit Tri Wicaksono S.Si., M.Si., Ph.D. yang telah membantu proses Tugas Akhir sampai selesai.
4. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc., selaku dosen wali penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak saran baik akademik maupun non akademik kepada penulis.

Penulis berharap penelitian tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak. Penulis juga menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan ini. Untuk itu, kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak sangat diharapkan.

Surabaya, 13 Juli 2022  
Penulis

Taufiq Ramadhan

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xxi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	1
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Pengecoran.....	3
2.1.1 <i>Permanent Mold Casting</i> .....	3
2.1.2 Fluks .....	3
2.2 Paduan Cu-Zn-Al.....	4
2.2.1 Diagram Fasa Cu-Zn-Al .....	5
2.3 <i>Shape Memory Alloy</i> (SMA) .....	6
2.3.1 Transformasi Fasa pada <i>Shape Memory Alloy</i> .....	7
2.4 Perlakuan Panas .....	8
2.4.1 <i>Homogenizing</i> .....	8
2.4.2 <i>Annealing</i> .....	9
2.4.3 <i>Solution Treatment</i> .....	9
2.4.4 <i>Quenching</i> .....	10
2.5 Pengujian .....	11
2.5.1 Pengujian <i>Optical Emission Spectroscopy</i> (OES).....	11
2.5.2 Pengujian Metalografi .....	12
2.5.3 Pengujian Kekerasan .....	12
2.5.4 Pengujian XRD.....	13
2.5.5 Pengujian DSC .....	13
2.6 Penelitian Sebelumnya .....	14
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>19</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	19
3.2 Alat Penelitian .....	20
3.3 Bahan Penelitian .....	22
3.4 Kurva Perlakuan Panas .....	22
3.5 Prosedur Penelitian .....	23
3.5.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Homogenizing</i> .....	23
3.5.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Annealing</i> .....	23
3.5.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Solution Treatment</i> .....	23
3.6 Proses Analisa .....	24
3.6.1 Analisa Komposisi Kimia.....	24
3.6.2 Analisa <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	24
3.6.3 Analisa Metalografi .....	24
3.6.4 Analisa Kekerasan .....	24
3.6.5 Analisa <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC) .....	24

3.7 Rancangan Penelitian.....	24
<b>BAB IV Analisis data dan pembahasan.....</b>	<b>27</b>
4.1 Analisa Komposisi Kimia .....	27
4.2 Hasil Analisa <i>X-Ray Diffraction</i> Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al.....	27
4.3 Hasil Analisa Metalografi Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al.....	30
4.4 Hasil Analisa Kekerasan Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al.....	34
4.5 Hasil Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al .....	35
<b>BAB V Kesimpulan dan saran.....</b>	<b>39</b>
5.1 Kesimpulan .....	39
5.2 Saran.....	39
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>41</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>45</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>63</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>65</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1. 1</b>	Katup regulator gas berbasis <i>shape memory alloy</i> .....	1
<b>Gambar 2. 1</b>	Diagram fasa terner Cu-Zn-Al .....	5
<b>Gambar 2. 2</b>	Diagram fasa biner Cu-Zn dengan (a) penambahan 0% alumunium dan (b) penambahan 6% alumunium .....	6
<b>Gambar 2. 3</b>	Transformasi fasa pada <i>shape memory alloy</i> .....	7
<b>Gambar 2. 4</b>	Proses <i>detwinning</i> pada <i>shape memory alloy</i> akibat pemberian beban .....	8
<b>Gambar 2. 5</b>	Proses <i>reverse transformation</i> dari <i>detwinned martensite</i> menjadi austenit.....	8
<b>Gambar 2. 6</b>	Pengaruh waktu tahan dan temperatur <i>solution treatment</i> terhadap ukuran butir fasa induk .....	10
<b>Gambar 2. 7</b>	Skema <i>direct quench</i> (DQ), <i>up quench</i> (UQ), dan <i>step quench</i> (SQOB,SQWB) serta efek waktu tahan penuaan terhadap <i>shape recovery</i> SMA Cu-Zn-Al.....	11
<b>Gambar 2. 8</b>	Ilustrasi <i>spark OES</i> .....	12
<b>Gambar 2. 9</b>	Indentor pengujian kekerasan Vickers .....	13
<b>Gambar 2. 10</b>	Difraksi sinar-X pada kisi kristal dengan jarak antar atom $d$ dan sinar datang $\theta$ .....	13
<b>Gambar 2. 11</b>	Temperatur transformasi yang ditunjukkan dari pengujian DSC .....	14
<b>Gambar 2. 12</b>	Mikrostruktur paduan Cu-26,1Zn-4,8Al.....	15
<b>Gambar 2. 13</b>	Mikrostruktur paduan Cu-25Zn-4Al setelah (a) <i>direct quenching</i> , (b) <i>up-quenching</i> , dan (c) <i>step-quenching</i> .....	15
<b>Gambar 2. 14</b>	Mikrostruktur paduan Cu-11,9Zn-6,72Al yang diberikan variasi waktu tahan <i>solution treatment</i> .....	16
<b>Gambar 2. 15</b>	Mikrostruktur paduan Cu-20,8Zn-5,8Al yang telah diberikan <i>direct quench</i> , <i>up quench</i> , dan <i>step quench</i> dengan media air dan oli .....	17
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian .....	20
<b>Gambar 3. 2</b>	Gerinda Tangan.....	21
<b>Gambar 3. 3</b>	<i>High Temperatur Furnace</i> .....	21
<b>Gambar 3. 4</b>	Mikroskop Optik .....	22
<b>Gambar 3. 5</b>	Paduan Cu-Zn-Al Hasil Pengecoran .....	22
<b>Gambar 3. 6</b>	Kurva perlakuan panas metode <i>up quenching</i> .....	23
<b>Gambar 3. 7</b>	Kurva perlakuan panas metode <i>step quenching</i> .....	23
<b>Gambar 4. 1</b>	Hasil pengujian XRD spesimen <i>as cast</i> dan spesimen dengan metode <i>up quenching</i> .....	28
<b>Gambar 4. 2</b>	Hasil pengujian XRD spesimen <i>as cast</i> dan spesimen dengan metode <i>step quenching</i> .....	29
<b>Gambar 4. 3</b>	Hasil pengujian metalografi spesimen <i>as cast</i> dengan perbesaran 100x .....	31
<b>Gambar 4. 4</b>	Hasil pengujian metalografi spesimen <i>up quenching</i> dengan waktu tahan selama (a) 10 menit, (b) 30 menit, dan (c) 50 menit pada perbesaran 100x.....	31
<b>Gambar 4. 5</b>	Hasil pengujian metalografi spesimen <i>up quenching</i> dengan waktu tahan selama (a) 10 menit, (b) 30 menit, dan (c) 50 menit pada perbesaran 100x.....	32
<b>Gambar 4. 6</b>	Diagram ukuran butir spesimen .....	33
<b>Gambar 4. 7</b>	Diagram kekerasan spesimen.....	34
<b>Gambar 4. 8</b>	Hasil pengujian DSC.....	36

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR TABEL

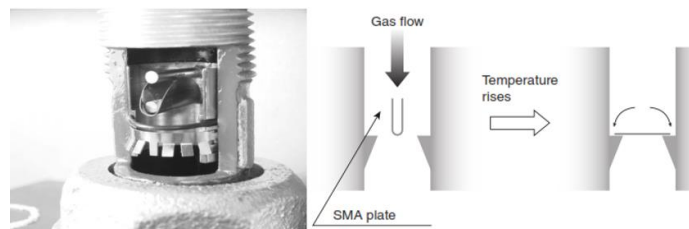
<b>Tabel 2. 1</b> Sifat paduan <i>shape memory alloy</i> Cu-Zn-Al .....	4
<b>Tabel 2. 2</b> Variasi paduan Cu-Zn dan temperatur <i>annealing</i> .....	9
<b>Tabel 3.1</b> Rancangan Penelitian.....	25
<b>Tabel 4. 1</b> Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Cu-Zn-Al .....	27
<b>Tabel 4. 2</b> Ukuran Butir Spesimen.....	33
<b>Tabel 4. 3</b> Hasil kekerasan spesimen .....	34
<b>Tabel 4. 4</b> Temperatur Transformasi Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al.....	36

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan teknologi yang terjadi saat ini menuntut industri untuk menghasilkan produk yang semakin canggih dan dapat mengimbangi kebutuhan masyarakat luas. Karena adanya kebutuhan akan produk mutakhir, maka diperlukan material dengan sifat tertentu yang bisa disesuaikan dengan harapan saat diaplikasikan. Salah satu bahan yang menjadi pilihan adalah *smart materials* atau material cerdas. Material cerdas sendiri dapat didefinisikan sebagai bahan yang dapat merasakan dan bereaksi ketika ada perubahan pada lingkungan sekitar seperti pH, potensial listrik, medan magnet, kelembapan, dan panas. Dalam beberapa tahun terakhir, permintaan akan material cerdas meningkat tajam dimana pasar globalnya bernilai 44,52 milyar dolar AS dengan tingkat pertumbuhan tahunan sebesar 13,82%. Salah satu dari banyaknya aplikasi material cerdas terdapat pada komponen aktuator (Grand View Research, 2014).



**Gambar 1. 1** Katup regulator gas berbasis paduan Cu-Zn-Al (Yamauchi et al., 2011).

Shape Memory Alloy (SMA), yang merupakan salah satu contoh dari material cerdas, merupakan paduan logam dengan kemampuan unik dimana material ini dapat berubah bentuk ketika ada respon berupa perubahan panas (Adiguzel, 2007). Pada Gambar 1.1, digunakan paduan Cu-Zn-Al sebagai katup untuk menghentikan kebocoran gas ketika terjadi kebakaran. Katup SMA awalnya ditekuk pada suhu ruang dan ketika suhu lingkungan naik akibat adanya api katup menjadi datar kembali. Hal ini akan menyebabkan aliran gas tertutup dan kebocoran gas dapat dihentikan (Yamauchi et al., 2011). Paduan Cu-Zn-Al juga dapat diaplikasikan sebagai pipa kondensator khususnya pada lingkungan laut. Pipa kondensator Cu-Zn-Al memiliki ketahanan korosi akibat lingkungan laut, *dezincification*, dan *stress corrosion*. Oleh karenanya pipa Cu-Zn-Al dapat menggunakan air laut untuk media pendinginnya.

Pada tahun 2008, Cheng meneliti tentang mikrostruktur dari paduan Cu-26,1Zn-4,8Al. Pada penelitian tersebut ditemukan *quenching* dari berbagai temperatur serta proses aging sangat mempengaruhi mikrostruktur dari paduan (Cheng et al., 2008). Lalu, di tahun 2021, Asanovic menguji beberapa paduan Cu-Zn-Al dengan metode *direct*, *step*, dan *up-quench*. Ditemukan bahwa spesimen dengan metode *step* dan *up-quench* memiliki nilai *recovery* yang lebih baik dibanding *direct quench* (V. Asanovic et al., 2021). Untuk mendapatkan sifat optimal dari paduan Cu-Zn-Al, penelitian dan pengembangan lebih lanjut perlu dilakukan. Penelitian ini akan menganalisis pengaruh variasi *holding time solution treatment* serta metode *up* dan *step quenching* terhadap struktur mikro dan kekerasan dengan melakukan pengujian *optical emission spectroscopy* (OES), *x-ray diffraction* (XRD), metalografi, kekerasan, dan *differential scanning calorimetry* (DSC).

## 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi *holding time* proses *solution treatment* pada Cu-15,9Zn-6,89Al *alloy* terhadap struktur mikro dan kekerasan.
2. Bagaimana pengaruh metode perlakuan panas *up quenching* dan *step quenching* proses *solution treatment* pada Cu-15,9Zn-6,89Al *alloy* terhadap struktur mikro dan kekerasan.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi *holding time* pada proses *solution treatment* pada Cu-15,9Zn-6,89Al *alloy* terhadap struktur mikro dan kekerasan.
2. Menganalisis pengaruh metode perlakuan panas *up quenching* dan *step quenching* proses *solution treatment* pada Cu-15,9Zn-6,89Al *alloy* terhadap struktur mikro dan kekerasan.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Produk hasil pengecoran dianggap bebas cacat
2. Pengaruh lingkungan selama proses perlakuan panas diabaikan.
3. Indikator temperatur pada *furnace* dianggap sesuai.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa diperoleh dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan data pada variasi temperature *solution treatment*, *up quenching* dan *step quenching* terhadap struktur mikro dan kekerasan pada Cu-15,9Zn-6,89Al *alloy*. Harapannya hasil penelitian ini dapat diaplikasikan ke dalam bidang industri dan menjadi pengembangan penelitian untuk Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pengecoran

Pengecoran adalah salah satu metode manufaktur logam dimana logam lebur dituangkan ke cetakan dengan bantuan gaya gravitasi ataupun teknik lain sehingga dapat membentuk benda sesuai dengan rongga cetakan. Teknik dasar dari pengecoran logam terdiri dari peleburan logam, penuangan logam lebur ke cetakan, dan solidifikasi dari logam. Pengecoran memiliki beberapa kelebihan dimana variasi logam dan paduan yang dapat dimanufaktur dengan pengecoran sangat beragam, teknik yang bervariasi sehingga dapat menyesuaikan kebutuhan produk, serta cocok dilakukan untuk produk yang perlu dibuat dalam jumlah massal. Walaupun memiliki nilai ekonomis yang tinggi, sifat mekanik produk cor biasanya akan berada di bawah komponen yang diproduksi dengan cara ditempa (Stefanescu, 1992)(Francis, 2016).

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan saat pengecoran dilakukan seperti: aliran dari logam lebur ke dalam rongga cetak; perilaku logam saat mendingin dan menjadi solid dalam cetakan; dan pengaruh bahan cetakan. Tidak hanya saat pengecoran, pertimbangan penting lainnya juga perlu dilakukan terkait material logam yang dicor. Sebagai contoh ketika pengecoran dilakukan untuk paduan. Elemen dalam suatu paduan logam memiliki sifat termal yang berbeda antara satu dengan yang lainnya seperti titik lebur dan uap. Contohnya dapat ditemukan pada paduan Cu-Zn, ketika elemen Cu masih berfase cair di temperatur 1085 °C Zn telah menguap karena titik didihnya yang berada di temperatur 907 °C(Francis, 2016)(Campbell, 2015).

#### 2.1.1 *Permanent Mold Casting*

Permanent mold casting adalah salah satu jenis dari proses pengecoran dimana cetakan cor yang digunakan permanen sehingga dapat digunakan berulang. Bahan yang digunakan untuk cetakan permanen biasanya adalah logam serta material lain dengan titik didih yang sangat tinggi seperti grafit. Proses *permanent mold casting* umumnya dilakukan dengan gaya gravitasi dan dalam beberapa kasus digunakan bantuan tekanan eksternal. Dengan menggunakan cetakan permanen kekurangan utama dari *sand casting*, dimana cetakan baru perlu dibuat untuk setiap produk cor, dapat ditangani dengan menggunakan cetakan permanen. Kelebihan utama dari *permanent mold casting* terdapat pada produk cor yang memiliki butir yang halus dan mikrostruktur yang rapat apabila dibandingkan dengan sand casting sehingga sifat mekanik produk cor meningkat. Selain itu, toleransi dimensi dan hasil permukaan cor lebih baik apabila dibandingkan dengan *sand casting* (Stefanescu, 1992).

#### 2.1.2 *Fluks*

Fluks dapat didefinisikan sebagai zat ataupun campuran kimia yang digunakan sebagai aditif saat mengolah logam lebur. Senyawa ini biasanya merupakan zat anorganik dan dapat berbentuk serbuk, bulir, atau tablet yang meleleh ketika digunakan. Seringkali ketika dilakukan pelelehan logam terdapat pengotor yang dapat berupa cairan atau padatan pada leburan logam saat proses pengecoran. Inklusi ini dapat berupa oksida, pasir, padatan logam lain, dan residu dari pelumas. Sehingga proses *fluxing* perlu dilakukan untuk menghilangkan pengotor dan inklusi dengan cara membantu proses aglomerasi dan pemisahan antara logam lebur dengan material yang tidak diharapkan ada dalam leburan. Fluks juga sangat bergantung pada temperatur karena temperatur yang diperlukan harus cukup tinggi sesuai dengan spesifikasi fluks agar pemisahan ataupun reaksi dapat terjadi sesuai harapan (Stefanescu, 1992).

Dalam proses pengecoran logam tembaga, fluks umumnya digunakan untuk: menghilangkan atau mencegah absorpsi gas ke dalam leburan; mengurangi hilangnya logam;

menghilangkan pengotor dan inklusi yang spesifik; memurnikan paduan; dan melumasi cetakan. Dalam pengecoran kuningan (Cu-Zn), diperlukan fluks yang dapat mengurangi hilangnya logam Zn dari Cu. Hal ini dikarenakan rendahnya titik didih Zn (900 C) dibandingkan dengan temperatur umum proses pengecoran paduan kuningan (1080 C). Salah satu fluks yang dapat digunakan adalah CUPRIT 49. Fluks ini memiliki komposisi yaitu kalsium fluorida; boraks; dan natrium karbonat. Boraks yang berfasa cair pada temperatur 740 C dapat membentuk lapisan fluida untuk mengurangi hilangnya seng dari leburan. Lalu, fluks yang mengandung fluorida dapat melepas lapisan oksida dari paduan tembaga sehingga logam yang terperangkap dalam oksida dapat kembali ke dalam leburan (Davis, 2001).

## 2.2 Paduan Cu-Zn-Al

Paduan Cu-Zn-Al yang digunakan sebagai *shape memory alloy* (SMA) memiliki rentang komposisi seng (Zn) antara 10 hingga 30%, alumunium (Al) antara 5 hingga 10%, dan tembaga (Cu). Paduan Cu-Zn-Al dapat dipadukan dengan mangan untuk menurunkan temperatur transformasi dan menaikkan keuletan dari paduan. Elemen paduan lain seperti boron, cerium, kobalt, besi, titanium, vanadium, dan zirkonium juga dapat digunakan dalam jumlah kecil untuk memperhalus besar butir paduan. Sifat-sifat dari paduan Cu-Zn-Al dapat ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1** Sifat paduan *shape memory alloy* Cu-Zn-Al (Davis, 2001)

Sifat	Nilai
Temperatur Leleh (°C)	950-1020
Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	7,64
Resistivitas (μΩ.cm)	8,5-9,7
Konduktivitas panas (W/m°C)	120
Kapasitas panas (J/kg)	400
Modulus elastisitas (GPa)	72 (fasa β), 70 (martensit)
Kekuatan Luluh (MPa)	350 (fasa β), 80 (martensit)
Kekuatan tarik maksimum (Mpa)	600
Temperatur transformasi (°C)	<120
Regangan yang dapat dibalikan (%)	4
Histeresis (Δ°C)	15-25

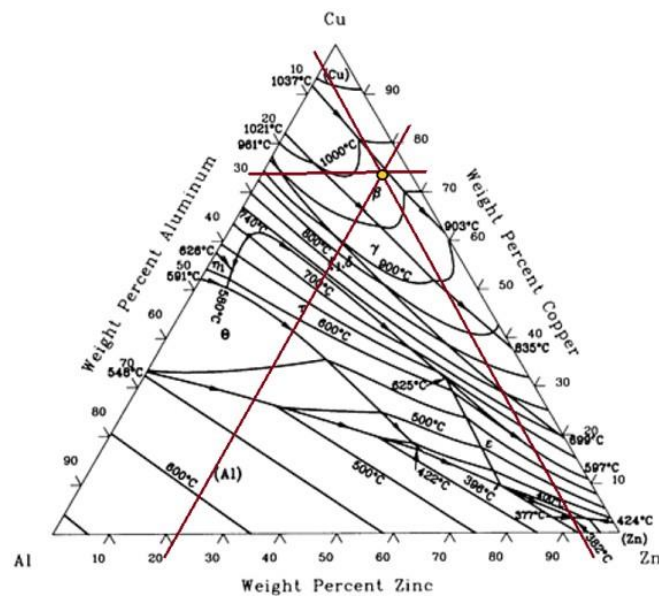
Proses peleburan dari paduan SMA dengan basis tembaga seperti Cu-Zn-Al mirip seperti perunggu alumunium. Sebagian besar paduan dilebur dengan menggunakan tanur induksi. Saat proses penuangan, diperlukan fluks dan gas inert seperti nitrogen dan argon agar penguapan seng dan oksidasi alumunium dapat diminimalisir. Proses powder metallurgy (PM) dan pendinginan cepat dapat dilakukan untuk mendapatkan paduan dengan butir yang halus tanpa menggunakan aditif. Agar sifat SME yang didapatkan dari fasa β dapat bertahan, perlakuan panas berupa *solution treatment* dilakukan pada fasa β dan dilanjutkan dengan pendinginan cepat. Hal ini dilakukan karena fasa β pada SMA berbasis tembaga bersifat metastabil. Proses *solution treatment* perlu dilakukan secukupnya untuk menghindari penguapan seng dan pertumbuhan butir.

Proses pendinginan cepat dari paduan Cu-Zn-Al biasanya digunakan media pendingin air dan untuk paduan Cu-Zn-Al dengan kandungan alumunium yang tinggi dapat digunakan

pendinginan dengan media udara. Temperatur transformasi pada paduan SMA berbasis tembaga yang hanya didinginkan cepat (*as-quenched*) biasanya memiliki temperatur transformasi yang tidak stabil sehingga diperlukan proses *aging* dimana paduan tersebut dipanaskan di atas temperatur  $A_f$  untuk menstabilkan temperatur transformasinya. Paduan Cu-Zn-Al rentan mengalami stabilisasi martensit ketika didinginkan dengan cepat menjadi fasa martensit. Hal ini dapat menyebabkan temperatur transformasi balik (menjadi fasa martensit) bergeser ke temperatur yang lebih tinggi dan mengurangi sifat *shape memory* dari paduan (Davis, 2001).

### 2.2.1 Diagram Fasa Cu-Zn-Al

Secara keseluruhan, diagram fasa yang dimiliki oleh paduan Cu-Zn-Al dapat ditunjukkan dengan diagram fasa *ternary* seperti pada Gambar 2.5 berikut.

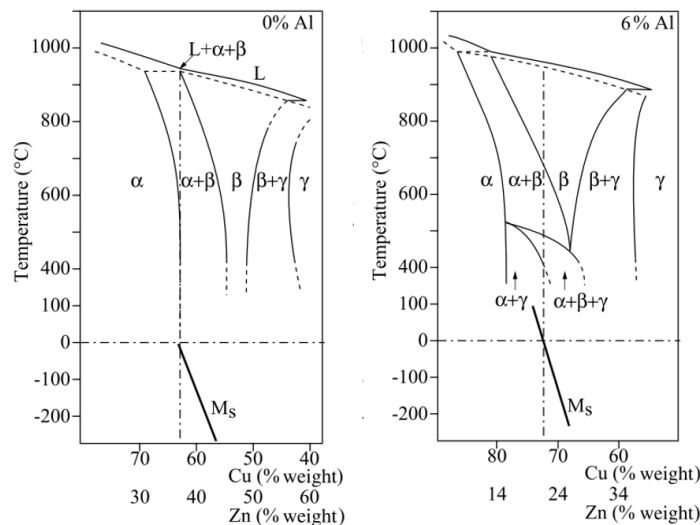


**Gambar 2. 1** Diagram fasa terner Cu-Zn-Al (ASM International, 1992b).

Terdapat tiga persentasi unsur yaitu persentasi Cu pada sumbu kanan, persentasi Al pada sumbu kiri dan persentasi Zn pada sumbu bawah. Titik komposisi dari sebuah paduan Cu-Zn-Al dapat ditentukan dengan menarik garis dari suatu sudut ke sumbu yang tegak lurus dengan sudut tersebut. Sebagai contoh, untuk menentukan komposisi Cu, tarik garis dari sudut Cu tegak lurus ke sumbu Zn lalu buat garis tegak lurus dari suatu titik pada sumbu persentase Cu yang sesuai dengan komposisinya. Dalam penggunaannya sebagai SMA, paduan Cu-Zn-Al biasanya memiliki rentang komposisi Zn sebesar 10-30%, Al 5-10%, dan selebihnya Cu (Davis, 2001).

Dalam rentang komposisi tersebut ada tiga fasa yang dapat terbentuk yaitu  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ . Dalam pembuatan SMA fasa yang menjadi fokus adalah fasa  $\beta$  karena hanya fasa  $\beta$  yang dapat menunjukkan sifat *shape memory effect*. Fasa  $\beta$  memiliki bentuk mikrostruktur yang tidak beraturan (*disordered*) pada temperatur tinggi dan memiliki sistem kristal kubik BCC. Pada temperatur rendah, fasa induk  $\beta$  dapat membentuk dua struktur yaitu  $\beta_2$  dan  $\beta_3$ . Fasa austenit  $\beta_2$  dan  $\beta_3$  dapat berubah menjadi fasa martensit  $\beta_2'$  dan  $\beta_3'$  dengan perlakuan panas ataupun mekanik (Srinivasaiah et al., 2014)(Otsuka & Wayman, 1998).

Temperatur transformasi pembentukan martensit ( $M_s$ ) juga dapat ditunjukkan sebagai fungsi komposisi dari paduan seperti pada Gambar 2.6.



**Gambar 2. 2** Diagram fasa biner Cu-Zn dengan (a) penambahan 0% aluminium dan (b) penambahan 6% aluminium (Lexcelent, 2013).

Pada diagram fasa Cu-Zn tanpa Al (0% Al), temperatur  $M_s$  tertinggi bernilai  $0^\circ\text{C}$  yang berada pada konsentrasi 38,5% Zn. Namun, pada konsentrasi ini sangat sulit untuk mendapat fasa  $\beta$  pada temperatur atmosfer karena proses homogenisasi yang dilakukan perlu sangat presisi dan *quenching* perlu dilakukan sangat cepat untuk menghindari reaksi difusi dari fasa  $\beta$ . Diagram fasa lain menunjukkan bahwa penambahan aluminium dapat menggeser area fasa  $\beta$  dalam diagram fasa serta temperatur  $M_s$  dari paduan. Pada diagram fasa dengan 6% Al, paduan dapat memiliki temperatur  $M_s$  yang nilainya sama dengan temperatur atmosfer pada konsentrasi 22% Zn. Pada konsentrasi ini rentang temperatur fasa  $\beta$  yang stabil cukup luas (sekitar  $690\text{--}950^\circ\text{C}$ ). Hal ini dapat memudahkan proses homogenisasi maupun proses *quenching* (Lexcelent, 2013). Temperatur  $M_s$  dapat diperkirakan melalui beberapa persamaan. Menurut *ASM Metal Handbook Vol. 2* dan *Engineering Aspects of Shape Memory Alloy*, temperatur  $M_s$  dari paduan Cu-Zn-Al dapat dihitung melalui persamaan 2.1 dan 2.2:

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66,9 (\text{at\% Zn}) - 90,65 (\text{at\% Al}) \dots\dots\dots (2.1)$$

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66,9 [1,355 (\text{at\% Al}) + (\text{at\% Zn})] \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana, at%Zn adalah fraksi atom Zn dalam paduan Cu-Zn-Al dan at%Al adalah fraksi atom Al dalam paduan Cu-Zn-Al. Oleh karena itu fraksi massa (wt%) perlu dikonversikan menjadi fraksi atom. (ASM International, 1992a; Duerig et al., 1990)

### 2.3 Shape Memory Alloy (SMA)

Shape memory alloy adalah salah satu jenis material cerdas dimana ia dapat kembali ke bentuk semula setelah mengalami sejumlah deformasi saat diberikan panas pada temperatur tertentu. SMA dapat mengakomodasi deformasi reversibel yang sangat signifikan. Pada paduan SMA NiTi, sampel dapat kembali ke bentuk semula walaupun telah diregangkan sekitar 7%. Sebagai perbandingan paduan logam pada umumnya hanya memiliki daerah batas elastis pada besar regangan 0,2%. SMA dapat terdiri dari dua, tiga, ataupun empat elemen paduan dengan fraksi komposisi tertentu sehingga dapat menunjukkan shape memory effect (SME). SME dapat dikatakan terjadi ketika suatu material logam yang terdeformasi dipanaskan sehingga fasanya berubah menjadi austenit dan regangan pada material tersebut dapat dihilangkan menjadi bentuk semula (Lexcelent, 2013).

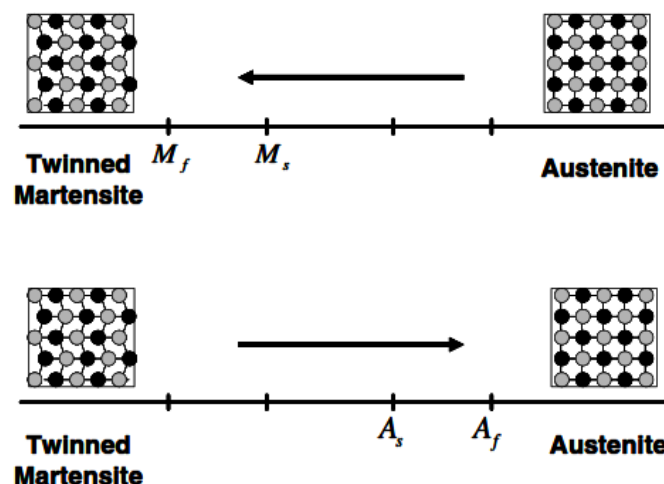


SMA memiliki dua keadaan yang “diingat”, yaitu bentuk pada temperatur rendah dan bentuk pada temperatur tinggi. Ingatan akan bentuk ini terletak pada transformasi fasa antara fasa awal yang berbentuk austenit dan fasa produk yang berbentuk martensit. Ketika terjadi perubahan kisi kristal antara fasa austenit dan martensit, perubahan ini disebut sebagai transformasi martensit.

Ada dua kelompok paduan utama dari SMA yaitu SMA dengan paduan dasar tembaga (Cu) dan nikel-titanium (Ni-Ti). Masing-masing paduan SMA tersebut dapat diaplikasikan di berbagai bidang seperti aktuasi, struktur, aeronautika, maupun medis. Saat ini paduan SMA berbasis Ni-Ti menjadi paduan SMA yang paling banyak digunakan. Meskipun begitu paduan SMA berbasis tembaga mulai menjadi alternatif karena harganya yang jauh di bawah paduan Ni-Ti (V. Asanovic et al., 2021).

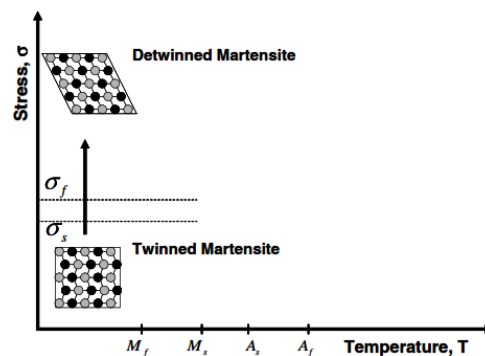
### 2.3.1 Transformasi Fasa pada *Shape Memory Alloy*

Dalam *shape memory alloy* fasa utamanya adalah martensit dan austenit. Fasa austenit terdapat pada temperatur material yang tinggi dan fasa martensit terdapat pada temperatur material yang rendah. Austenit memiliki struktur kristal yang berbeda dengan martensit. Pada umumnya struktur kristal austenit berbentuk kubik sedangkan struktur kristal martensit dapat berbentuk tetragonal, ortorombik, ataupun monoklinik. Transformasi yang terjadi dari satu struktur ke struktur lainnya tidak terjadi dengan cara difusi atom melainkan dengan pergeseran kisi kristal. Transformasi ini dapat disebut sebagai transformasi martensitik (Lagoudas, 2008).



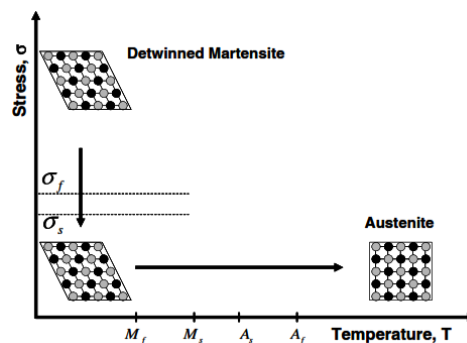
Gambar 2. 3 Transformasi fasa pada *shape memory alloy* (Lexcelent, 2013).

Skema struktur kristal dan transformasi dari *twinned martensite* dan austenit sebuah SMA dapat ditunjukkan melalui Gambar 2.1. Ada empat temperatur yang berkaitan dengan transformasi fasa pada SMA. Saat terjadi *forward transformation*, austenit (yang didinginkan dalam keadaan tanpa beban) mulai berubah menjadi austenit pada temperatur  $M_s$  atau *martensite start* dan diakhiri ketika seluruh austenit telah berubah menjadi martensit pada temperatur  $M_f$  atau *martensite finish*. Sedangkan pada *reverse transformation*, martensit (yang dipanaskan dalam keadaan tanpa beban) mulai berubah menjadi austenit pada temperatur  $A_s$  atau *austenite start* dan diakhiri ketika seluruh martensit telah berubah menjadi austenit pada temperatur  $A_f$  atau *austenite finish*.



**Gambar 2. 4** Proses *detwinning* pada *shape memory alloy* akibat pemberian beban (Lexcelent, 2013).

*Twinned martensite* yang diberikan sejumlah beban pada temperatur rendah akan menghasilkan *detwinned martensite*. Pada Gambar 2.2, ditunjukkan skema *detwinning* yang mengubah orientasi kristal dari varian-varian pada *twinned martensite* serta menghasilkan perubahan bentuk yang dapat terlihat secara makroskopis. *Detwinned martensite* yang terbentuk dapat kembali lagi menjadi austenit dengan pemberian panas hingga temperturnya berada di atas  $A_f$  seperti pada Gambar 2.3. Perlakuan ini memungkinkan terjadinya *reverse transformation* dan *recovery* dari perubahan bentuk yang telah terjadi akibat proses *detwinning* (Lexcelent, 2013).



**Gambar 2. 5** Proses *reverse transformation* dari *detwinned martensite* menjadi austenit (Lexcelent, 2013).

## 2.4 Perlakuan Panas

Sifat-sifat dari logam dan paduan berhubungan erat dengan struktur atom, struktur kristal, dan mikrostrukturnya. Sifat mekanik sendiri adalah sifat yang bergantung pada struktur dan besarnya dipengaruhi oleh besar, bentuk, dan distribusi dari mikrokonstituen. Perubahan struktur ini dapat dicapai dengan melakukan perlakuan panas. Perlakuan panas dapat didefinisikan sebagai proses pemanasan dan pendinginan yang dilakukan sedemikian rupa sehingga logam atau paduan dapat memiliki sifat tertentu. Proses ini meliputi pemanasan logam sampai temperatur tertentu, penahanan panas dengan waktu tertentu, dan pendinginan dari temperatur tersebut. Operasi-operasi ini dilakukan dalam keadaan logam yang masih berbentuk solid (ASM International, 1991).

Dalam penelitian ini perlakuan panas yang akan digunakan adalah *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment*.

### 2.4.1 Homogenizing

*Homogenizing* merupakan perlakuan panas dimana logam dipanaskan hingga temperatur tertentu dan ditahan dengan rentang waktu tertentu sehingga fasa logam homogen pada

temperatur tersebut. *Homogenizing* dapat mengurangi segregasi kimia maupun metalurgi sehingga *coring* pada paduan dapat dihindari. Pada paduan tembaga, *homogenizing* dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik yang lebih baik pada logam hasil pengecoran. *Homogenizing* perlu dilakukan pada paduan dengan rentang temperatur yang luas seperti kuningan dan perunggu nikel. *Homogenizing* dilakukan antara temperatur 700-1000 C atau 50 C di atas garis solvus (ASM International, 1991).

#### 2.4.2 Annealing

*Annealing* merupakan perlakuan panas dimana logam dipanaskan hingga temperatur tertentu, ditahan dengan rentang waktu tertentu, lalu didinginkan dengan secara perlahan. Tujuannya dari *annealing* adalah untuk mengurangi kekerasan pada material yang rapuh, meningkatkan keuletan, memperbaiki struktur mikro logam, meningkatkan kemampuan *machinability*, dan menghilangkan tegangan sisa akibat proses atau perlakuan yang diberikan pada logam. *Annealing* dari hasil pengecoran dengan cetakan permanen perlu dilakukan untuk menghindari kekerasan yang terlalu tinggi akibat pendinginan yang cepat.

Variasi temperatur *annealing* bergantung pada komposisi dan temperatur rekristalisasinya. Dengan memanaskan logam di atas temperatur rekristalisasi, pertumbuhan butir logam dapat diinisiasikan. Temperatur *annealing* yang biasa digunakan pada kuningan (Cu-Zn) dapat dilihat pada Tabel 2.2 (ASM International, 1991).

**Tabel 2. 2** Variasi paduan Cu-Zn dan temperatur *annealing* (ASM International, 1991).

Nomor Paduan	Nama Paduan	Temperatur (°C)
C23000	<i>Red brass</i>	425-725
C24000	<i>Low brass</i>	425-700
C26000	<i>Cartridge brass</i>	425-750
C26800	<i>Yellow brass</i>	
C27000		425-700
C27400		

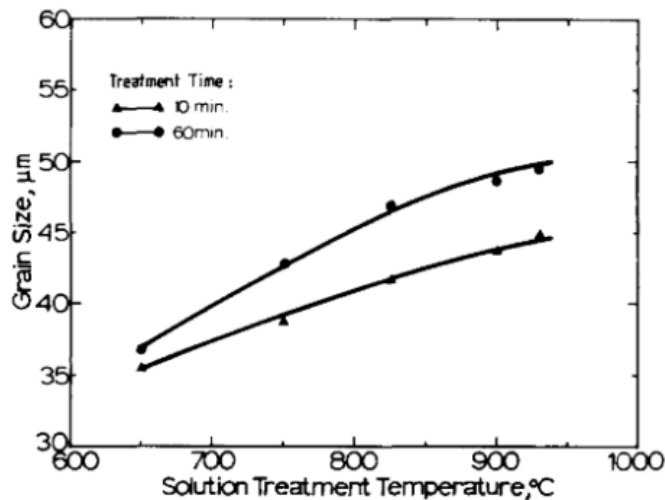
#### 2.4.3 Solution Treatment

*Solution treatment* merupakan perlakuan panas dimana paduan dipanaskan hingga temperatur tertentu, ditahan sampai fasanya berubah menjadi *solid solution*, lalu didinginkan cepat sehingga fasa dapat tertahan dalam temperatur rendah. Dalam perlakuan panas dari paduan Cu-Zn-Al, *solution treatment* perlu dilakukan dengan cukup cepat sehingga elemen Zn dalam paduan tidak menguap. Namun, perlu diingat *solution treatment* yang terlalu singkat akan menyebabkan fasa tidak terbentuk menyeluruh. Temperatur *solution treatment* pada pembuatan paduan SMA Cu-Zn-Al dilakukan di atas garis solvus dan dilakukan *quenching* sehingga fasa dapat ditahan (ASM International, 1991).

Proses *solution treatment* paduan SMA Cu-Zn-Al digunakan agar fasa  $\beta'$  atau martensit pada temperatur ruang. Untuk mendapatkan fasa  $\beta'$ , paduan Cu-Zn-Al dipanaskan dari temperatur ruang sampai di atas garis solvus (garis kelarutan) dan ditahan selama beberapa waktu sehingga seluruh fasa berbentuk  $\beta$ . Ketika didinginkan dengan cepat, fasa  $\alpha$  yang seharusnya muncul dalam pendinginan lambat akan terhambat kristalisasinya dan didapatkan fasa  $\beta'$  martensit (Davis, 2001).

Untuk mendapatkan sifat *shape memory effect* yang baik diperlukan pemilihan temperatur dan waktu tahan yang sesuai saat proses *solution treatment*. Hal ini dilakukan sehingga proses *solution treatment* dapat memberikan kelarutan fasa yang baik serta besar butir yang sesuai dengan harapan. Proses *quenching* setelah *solution treatment* paduan Cu-Zn-Al perlu dilakukan

dengan cepat agar fasa  $\beta$  yang metastabil pada temperatur rendah tidak terdekomposisi menjadi  $\alpha$  dan  $\gamma$  saat pendinginan.



**Gambar 2. 6** Pengaruh waktu tahan dan temperatur *solution treatment* terhadap ukuran butir fasa induk (Adnyana, 1986).

Gambar 2.7 menunjukkan pengaruh waktu tahan serta temperatur *solution treatment* pada besar butir paduan Cu-Zn-Al. Terlihat bahwa semakin tinggi temperatur maka ukuran butir fasa induk yang dihasilkan juga semakin besar. Sama halnya dengan waktu tahan *solution treatment* dimana semakin lama waktu tahan, semakin besar butir yang dihasilkan (Adnyana, 1986).

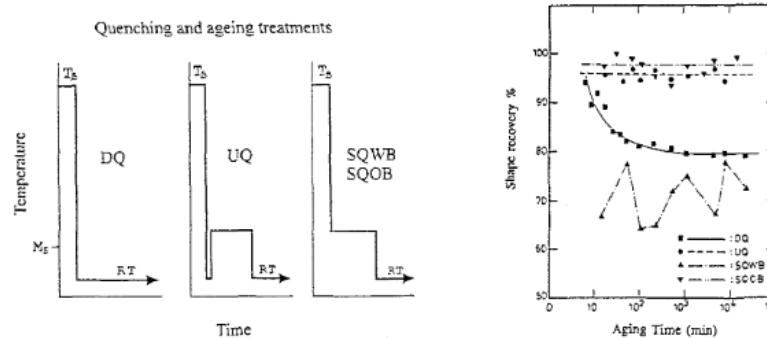
#### 2.4.4 Quenching

*Quenching* merupakan proses pendinginan cepat dari material yang telah diberikan suatu perlakuan panas. Dalam paduan SMA berbasis tembaga seperti Cu-Zn-Al, proses *solution treatment* yang diikuti dengan *quenching* dapat digunakan untuk menghasilkan struktur martensit (ASM vol 4). Transformasi martensitik dari paduan SMA berbasis tembaga sangat sensitif terhadap perlakuan panas. *Quenching* yang dilakukan dari temperatur fasa  $\beta$  stabil dapat mempengaruhi temperatur transformasi paduan SMA. Pendinginan cepat ini dilakukan untuk menghindari presipitasi fasa ekuilibrium ( $\alpha$ ) (Obradó et al., 1999).

Selain pendinginan yang lambat presipitasi fasa  $\alpha$  dapat disebabkan oleh *aging*. *Aging* atau penuaan adalah perlakuan panas yang dilakukan dengan menahan logam pada suatu temperatur dengan rentang tertentu. Ketika fasa  $\alpha$  terpresipitasi, temperatur transformasi martensit akan meningkat sesuai dengan jumlah fasa  $\alpha$  yang terbentuk. Hal ini dikarenakan fenomena inhibisi transformasi martensit kembali ke fasa austenit yang biasa disebut stabilisasi martensit. Stabilisasi martensit merupakan sifat yang diakibatkan oleh perlakuan panas. Tingkat stabilisasi dipengaruhi oleh adanya defek berupa kekosongan atom (*vacancy*) pada martensit sebelum dilakukan penuaan. Selain meningkatkan temperatur transformasi, stabilisasi martensit juga dapat mengurangi hingga menghilangkan sifat *shape memory effect* paduan SMA (Chandrasekaran et al., 1995). Metode *quenching* seperti *step quenching* dapat mengurangi fenomena stabilisasi martensit dan *up quenching* dapat menjadi solusi untuk masalah penuaan pada paduan SMA yang memiliki temperatur transformasi austenit ( $A_s$ ) di temperatur ruang (Leu & Hu, 1991).

Proses *step quenching* dilakukan dengan mendinginkan material dalam media pendingin dengan temperatur tertentu (di atas temperatur ruang) lalu ditahan pada temperatur tersebut dengan durasi yang telah ditentukan. Proses *up quenching* dilakukan dengan mendinginkan material dalam media pendingin dengan temperatur ruang lalu dipanaskan kembali pada temperatur tertentu dengan durasi yang telah ditentukan. Skema metode *direct*, *step*, dan *up*

*quenching* serta pengaruh penuaan terhadap *shape recovery* material SMA Cu-Zn-Al dari variasi metode *quench* dapat dilihat pada Gambar 2.8. Terlihat bahwa material SMA yang didinginkan dengan *direct quench* sangat rentan mengalami stabilisasi martensit akibat penuaan yang diindikasikan oleh menurunnya *shape recovery* seiring bertambahnya durasi penuaan. Namun, pada material yang diberikan metode *up* (UQ) dan *step quench* dengan media oli (SQOB), *shape recovery* yang dimiliki tetap terjaga setelah diberikan penuaan.



**Gambar 2. 7** Skema *direct quench* (DQ), *up quench* (UQ), dan *step quench* (SQOB,SQWB) serta efek waktu tahan penuaan terhadap *shape recovery* SMA Cu-Zn-Al (Chandrasekaran et al., 1995).

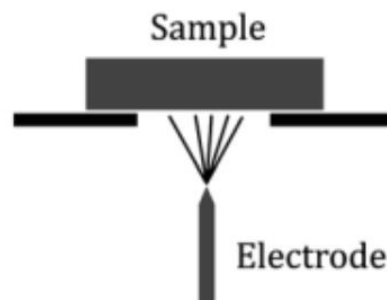
## 2.5 Pengujian

Pengujian yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES), pengujian metalografi, pengujian kekerasan, pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), *differential scanning Calorimetry* (DSC), dan pengujian *Shape Memory Effect* (SME).

### 2.5.1 Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

*Optical Emission Spectroscopy* (OES) atau analisa OES adalah salah satu metode untuk menentukan komposisi dari berbagai macam logam dan paduan dengan cepat. OES digunakan untuk menentukan jumlah kuantitatif dari elemen penyusun pada suatu sampel baik dalam jumlah besar maupun kecil. Prinsip dasar dari OES adalah spektrum karakteristik yang diproduksi oleh atom dapat menunjukkan struktur elektron dari atom tersebut. Ketika ada perubahan dari energi valensi atau gugusan elektron terluar akan menyebabkan perubahan garis emisi atom yang digunakan dalam OES. Apabila atom tereksitasi yang telah menyerap energi dari lingkungannya kembali ke keadaan stabil, atom perlu mengeluarkan energinya dalam bentuk emisi. Intensitas emisi lalu diukur dan digunakan sebagai parameter penentuan unsur dari sampel. Dua jenis OES yang biasa digunakan adalah *inductively coupled plasma* (ICP)-OES dan *spark* OES. Perbedaan dari kedua tipe OES ini terletak pada sumber panasnya. ICP-OES menggunakan plasma untuk mengeksitasi atom sedangkan *spark* OES menggunakan *electric discharge*.

Dalam analisa komposisi dari logam ataupun paduan, *spark* OES menjadi pilihan yang biasa digunakan oleh industri logam. *Spark* OES dipilih karena metodenya yang paling cepat ketika logam perlu dianalisa komposisinya. *Electric discharge* yang digunakan oleh *spark* OES dihasilkan karena perbedaan potensial yang cukup tinggi antara elektroda dengan spesimen. Saat *electric discharge* terbentuk, sejumlah atom pada spesimen menjadi tereksitasi dan mengeluarkan garis emisi yang unik sesuai dengan unsurnya. *Electric discharge* yang dikeluarkan oleh elektroda ke spesimen uji dapat diilustrasikan pada Gambar 2.9 berikut (Widyastuti et al., 2019).



Gambar 2. 8 Ilustrasi *spark OES* (Widyastuti et al., 2019).

### 2.5.2 Pengujian Metalografi

Struktur mikro yang dimiliki oleh logam dapat diamati dengan pengujian struktur mikro atau metalografi. Pada pengujian metalografi alat yang digunakan adalah mikroskop optik. Dengan mikroskop optik penentuan ukuran butir, bentuk dan distribusi fase dari logam dapat dipelajari. Pengetahuan akan mikrostruktur dari logam dapat menjadi referensi perilaku mekanik, termal, maupun sifat tertentu dari logam.

Spesimen yang akan digunakan dalam pengujian metalografi perlu di preparasi terlebih dahulu. Preparasi spesimen metalografi terdiri dari 5 tahap yaitu *cutting*, *mounting*, *grinding*, *polishing*, dan *etching*. Tahap *cutting* merupakan tahap dimana spesimen dipotong sesuai dengan kebutuhan. Tahap *mounting* merupakan tahap dimana spesimen ditempatkan dalam resin sehingga memudahkan proses selanjutnya. Tahap *grinding* merupakan tahap dimana spesimen diratakan dan dihaluskan permukaannya menggunakan amplas secara manual ataupun otomatis. Tahap *polishing* merupakan tahap dimana spesimen dipoles menggunakan alumina sehingga permukaan lebih halus dan mengkilap. Terakhir, *etching* dilakukan untuk mengkorosi permukaan benda sehingga fasa dan batas butir dari spesimen dapat terlihat jelas. Setelah proses preparasi selesai, spesimen dapat diamati mikrostrukturnya menggunakan mikroskop (Whan, 1992).

### 2.5.3 Pengujian Kekerasan

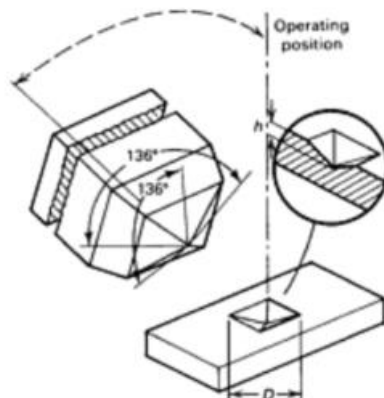
Kekerasan dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan deformasi permanen ketika diberikan suatu beban dengan *indenter*. Pada dasarnya pengujian kekerasan dilakukan dengan menekan *indenter* yang diketahui geometri serta sifat mekaniknya pada sampel. Indenter dapat berbentuk bola seperti pada pengujian Brinell, piramida seperti pada pengujian Vickers dan Knoop, atau kerucut seperti pada pengujian Rockwell. Dalam pengujian Brinell, Vicker, dan Knoop, nilai kekerasan merupakan beban dibagi dengan luas indentasi. Dalam pengujian Rockwell, nilai kekerasan didapat sesuai dengan kedalaman hasil indentasi yang mana berbanding terbalik dengan kedalamannya.

Pengujian kekerasan dapat dibilang sebagai pengujian dengan metode yang paling sederhana dan murah untuk mengkarakterisasikan sifat mekanik dari sebuah material karena tidak memerlukan preparasi spesimen yang kompleks, alat pengujian yang terjangkau, dan relatif cepat<sup>23</sup>. Penelitian ini menggunakan pengujian kekerasan Vickers untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen. Pengujian Vickers dipilih karena memiliki akurasi yang lebih baik dari pengujian Brinell dan Rockwell dan dapat digunakan pada berbagai jenis material dari yang paling lunak hingga yang paling keras (Widyastuti et al., 2019). Indentor yang digunakan dalam pengujian Vickers menggunakan indentor *diamond-pyramid* dengan sudut  $136^\circ$  seperti Gambar 2.10. Variasi beban pengujian kekerasan Vicker memiliki rentang antara 1 sampai 120 kg tergantung oleh jenis material spesimen yang digunakan. Perhitungan untuk menentukan nilai kekerasan Vickers spesimen ditunjukkan oleh persamaan 2.3 berikut:



$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (2.3)$$

Dimana, HV adalah nilai kekerasan Vickers, F adalah beban (kgf), dan d adalah diagonal indentasi yang dihasilkan (mm) (Kuhn & Medlin, 2000).



**Gambar 2. 9** Indentor pengujian kekerasan Vickers (Kuhn & Medlin, 2000).

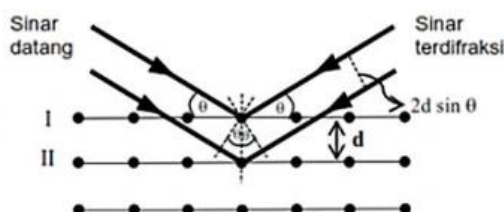
### 2.5.4 Pengujian XRD

Pengujian XRD adalah salah satu pengujian karakterisasi material yang digunakan untuk mengkarakterisasikan material berstruktur kristal seperti logam, keramik, mineral, polimer, dan senyawa organik maupun anorganik. Teknik XRD dapat digunakan untuk mengidentifikasi fasa yang terdapat dalam sampel mulai dari bahan baku hingga produk yang siap pakai. Namun pada dasarnya, pengujian XRD hanya terbatas pada material yang memiliki struktur kristal walaupun sejumlah informasi tetap dapat diperoleh dari padatan ataupun cairan yang amorf (Whan, 1992).

Dalam pengujian XRD, sampel ditembakkan dengan sinar X dengan sudut yang berubah-ubah secara terus menerus. Sinar datang dan sinar difraksi akan membentuk spektrum intensitas difraksi yang berbeda-beda pada sudut yang berbeda. Data spektrum ini kemudian dibandingkan dengan data material dengan fasa yang telah teridentifikasi. Prinsip kerja dari XRD berdasar pada hukum Bragg. Persamaan Hukum Bragg ditunjukkan pada persamaan 2.4 berikut:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.4)$$

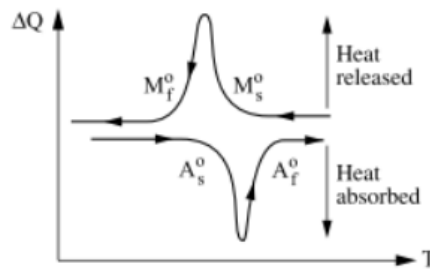
Dimana, n adalah orde difraksi,  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar X, d adalah jarak antar kisi kristal, dan  $\theta$  adalah sudut sinar datang. Prinsip kerja dari alat uji XRD dapat diilustrasikan melalui Gambar 2.11 berikut.



**Gambar 2. 10** Difraksi sinar-X pada kisi kristal dengan jarak antar atom d dan sinar datang  $\theta$  (Alfarisa et al., 2018).

### 2.5.5 Pengujian DSC

Pengujian DSC adalah pengujian yang digunakan untuk mengukur kalor diserap atau dilepas oleh suatu sampel material uji. Pengumpulan data ini didapat ketika material dipanaskan atau didinginkan sampai temperatur tertentu. Dari data perubahan kalor ini, temperatur  $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$ , dan  $A_f$  dapat diidentifikasi akibat adanya perubahan kalor ketika fasa suatu material berubah.



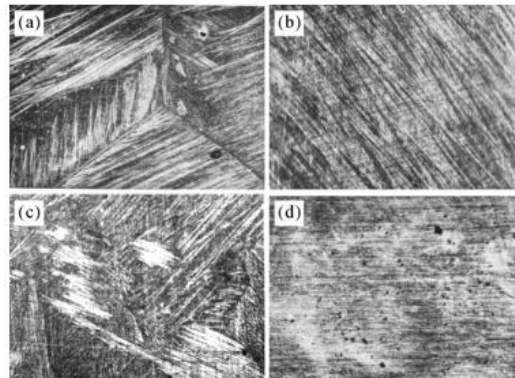
**Gambar 2. 11** Temperatur transformasi yang ditunjukkan dari pengujian DSC (Lexcelent, 2013).

Gambar 2.12 menunjukkan adanya penyerapan kalor ketika sampel dipanaskan (transformasi fasa martensit menjadi austenit) dan pelepasan kalor ketika sampel didinginkan (transformasi fasa austenit menjadi martensit) (Lexcelent, 2013). DSC bekerja dengan cara membandingkan temperatur sampel dengan pembanding secara kontinu yang mana ketika ada perubahan panas *recorder* akan mencatat dan memetakannya dalam kurva (Setiabudi et al., n.d.).

## 2.6 Penelitian Sebelumnya

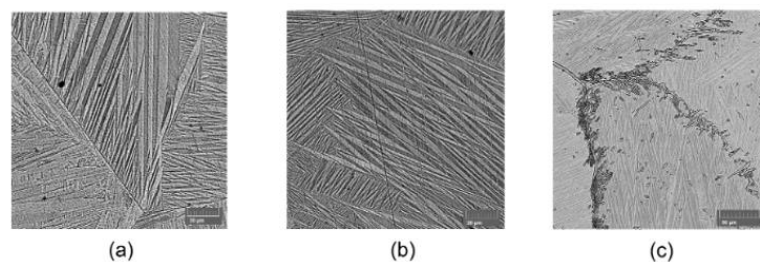
Cheng X. pada tahun 2007 melakukan penelitian tentang pengaruh perlakuan panas berupa variasi temperatur *solution treatment* dan *aging* pada mikrostruktur dan *shape memory effect* dari paduan SMA Cu-26,1Zn-4,8Al. Spesimen dipreparasi dengan cara dilebur, ditempa, dipipihkan dan dianil. Spesimen dihomogenisasi pada temperatur 850°C selama 24 jam, ingot ditempa dan dipipihkan menjadi plat tipis. Plat lalu dipanaskan sampai 850°C selama 8 jam untuk menghilangkan tegangan akibat proses tempa dan *roll*. Plat lalu dipotong menjadi lembaran dengan tebal 0,5 mm. Pengujian SME yang dilakukan menunjukkan spesimen yang di-*quench* pada temperatur 850°C dan di-*aging* pada temperatur 150°C selama 15 menit memiliki persen *recovery* yang paling baik. Pada Gambar 2.13, ditunjukkan mikrostruktur yang dihasilkan oleh (a) sampel yang di-*quench* pada temperatur 850°C tanpa *aging*, (b) sampel yang di-*quench* pada temperatur 850°C dengan *aging* pada temperatur 150°C, (c) sampel yang di-*quench* pada temperatur 850°C dengan *aging* pada temperatur 150°C dan 50°C, serta (d) sampel yang di-*quench* pada temperatur 850°C dengan *aging* pada temperatur 210°C. Setiap spesimen memiliki struktur martensit berbentuk plat atau jarum. Pada spesimen (a)-(c), sifat *shape memory effect* yang dihasilkan baik, namun ketika spesimen di-*aging* pada temperatur di atas 180°C muncul presipitat hitam yang setelah diuji XRD merupakan fasa  $\gamma$  yang dihasilkan akibat proses dekomposisi fasa  $\beta$  saat *aging*. Hal ini menunjukkan bahwa ketika martensit diberikan *aging* pada temperatur yang terlalu tinggi akan mengubah bentuk martensit dan mengurangi sifat *shape memory effect* (Cheng et al., 2008).





**Gambar 2. 12** Mikrostruktur paduan Cu-26,1Zn-4,8Al (Cheng et al., 2008)

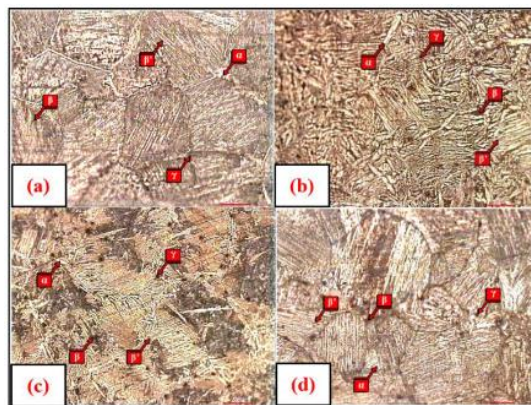
Zorica S. pada tahun 2017 melakukan penelitian tentang pengaruh variasi komposisi Zn dan metode *quenching* terhadap mikrostruktur dan temperatur transformasi dari paduan SMA Cu-25Zn-4Al dan Cu-30Zn-4Al. Dua paduan Cu-Zn-Al tersebut awalnya dipreparasi dengan cara dilebur dan dituang ke dalam cetakan berbentuk batang silinder berdiameter 1 cm dan panjang 10 cm. Ingot lalu di-*hot roll* sehingga membentuk strip dengan tebal 0,5 mm. Spesimen SMA lalu diberikan *solution treatment* pada temperatur 850°C selama 30 menit diikuti dengan *direct quench* dengan media air ke temperatur ruang, *up-quenching* dengan media air ke temperatur ruang dan *aging* selama 30 menit di temperatur 100°C sebelum di-*quench* kembali ke temperatur kamar, dan *step-quenching* dengan media air mendidih selama 15 menit di temperatur 100°C lalu didinginkan di dalam air bertemperatur kamar. Dilakukan pengetsaan dengan larutan yang mengandung 2,5 gram FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O dan 1 ml HCL dalam 48 ml metanol sebelum pengujian SEM. Ditemukan bahwa mikrostruktur paduan Cu-25Zn-4Al (*as-cast*) terdiri atas fasa β dan sejumlah partikel fasa α dendritik dalam matriks β, sedangkan paduan Cu-30Zn-4Al (*as-cast*) terdiri atas fasa β tunggal dengan butir poligonal yang besar. Dari Gambar 2.14, ditemukan mikrostruktur yang sepenuhnya martensitik pada metode *direct* (a) dan *up-quenching* (b), namun terdapat sedikit presipitat fasa α pada sampel yang diberikan perlakuan *step-quenching* (c) (Stošić et al., 2017).



**Gambar 2. 13** Mikrostruktur paduan Cu-25Zn-4Al setelah (a) *direct quenching*, (b) *up-quenching*, dan (c) *step-quenching* (Stošić et al., 2017)

Yusuf M. pada tahun 2021 melakukan penelitian tentang pengaruh variasi *holding time* proses *solution treatment* dan *artificial aging* terhadap kekerasan dan struktur mikro paduan Cu-11,9Zn-6,72Al. Paduan Cu-11,9Zn-6,72Al dicor menjadi ingot dan berikan beberapa perlakuan panas yaitu *homogenizing*, *annealing*, *solution treatment*, dan *artificial aging*. Proses *homogenizing* dilakukan pada temperatur 850°C dengan durasi selama 2 jam dan didinginkan dengan media udara. *Annealing* dilakukan pada temperatur 550°C selama 4 jam dan didinginkan dengan media udara. *Solution treatment* dilakukan pada temperatur 850°C selama 10 menit dan didinginkan dengan media pendingin *brine*, waktu tahan *solution treatment*

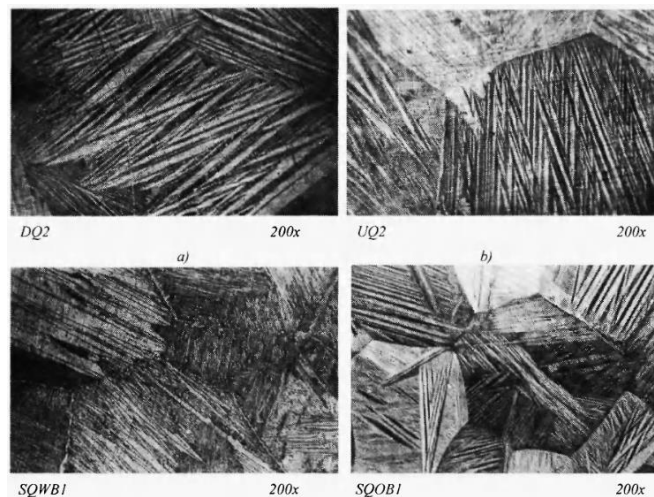
kemudian dinaikan menjadi 20 menit, 30 menit, dan 40 menit dengan langkah yang sama. Terakhir, *artificial aging* dilakukan pada temperatur 200°C dengan durasi selama 2 jam dan didinginkan dengan media udara. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian OES, XRD, metalografi, dan kekerasan. Pengujian XRD menunjukkan ada 4 fasa yang muncul yaitu  $\alpha$  ( $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ ),  $\beta$  ( $\text{CuZn}$ ),  $\gamma_2$  ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ), dan  $\gamma_1$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ ). Fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_2$ , ditemukan dalam semua spesimen namun  $\gamma_1$  hanya ditemukan pada spesimen yang diberikan variasi waktu tahan *solution treatment* selama 40 menit. Dari pengamatan mikrostruktur pada Gambar 2.15, ditemukan bahwa penambahan waktu tahan *solution treatment* menyebabkan terjadinya pertumbuhan butir yang meningkat namun tidak ditemukan adanya pengaruh signifikan antara perlakuan *artificial aging* dengan peningkatan besar butir. Dari pengujian kekerasan, ditemukan spesimen dengan waktu tahan *solution treatment* selama 10 menit memiliki nilai kekerasan tertinggi dibanding spesimen dengan variasi waktu tahan *solution treatment* lainnya. Hal ini dikarenakan semakin lama perlakuan *solution treatment* dilakukan, besar butir semakin meningkat dan mengurangi daerah batas butir. Besar daerah batas butir yang sedikit berakibat pada menurunnya nilai kekerasan paduan Cu-11,9Zn-6,72Al. Lalu, setelah diberikan perlakuan *artificial aging* selama 6 jam diperoleh nilai kekerasan tertinggi pada spesimen dengan waktu tahan *solution treatment* 10 menit. Dari pengamatan yang dilakukan, kekerasan meningkat karena pertumbuhan presipitat  $\gamma$  pada spesimen setelah diberi perlakuan *artificial aging*. Semakin banyak presipitat  $\gamma$  yang terbentuk, kekerasan spesimen Cu-11,9Zn-6,72Al akan semakin meningkat (Yusuf et al., 2021).



**Gambar 2. 14** Mikrostruktur paduan Cu-11,9Zn-6,72Al yang diberikan variasi waktu tahan *solution treatment* (Yusuf et al., 2021).

Vanja A. pada tahun 2004 melakukan penelitian tentang pengaruh variasi metode *quenching* berupa *direct, up*, dan *step quenching* dalam media pendingin air mendidih serta oli terhadap mikrostruktur, temperatur transformasi, sifat mekanik, dan *recovery* dari paduan SMA Cu-20,8Zn-5,8Al. Paduan Cu-20,8-5,8Al dipreparasi dengan pengecoran ke dalam cetakan grafit. Ingot hasil pengecoran lalu diberikan perlakuan panas *homogenizing* pada temperatur 1103K selama 2 jam diikuti dengan *quenching* dalam media pendingin air. Ingot yang telah dihomogenisasi diberikan perlakuan mekanik berupa *hot forging* dan *cold rolling* sehingga didapatkan plat dengan tebal 0,3 mm. Spesimen didapatkan dengan memotong plat hasil *cold rolling*. Dilakukan *solution treatment* dengan rentang waktu antara 5 sampai 20 menit dan temperatur antara 1113 sampai 1163 K untuk mendapatkan parameter *betatizing* (waktu dan temperatur) yang optimal. Ditemukan bahwa *solution treatment* selama 10 menit pada temperatur 1143 K menghasilkan fasa  $\alpha$  yang terlarut sempurna dengan besar butir yang sesuai harapan. Spesimen dibagi menjadi empat kelompok sesuai dengan metode *quenching*. Setiap

metode *quenching* memiliki dua media pendingin yaitu air dalam temperatur kamar dan air es sehingga terdapat delapan spesimen yang diamati. Dari pengujian mikrostruktur pada Gambar 2.16 ditemukan batas butir fasa induk (austenit) dan fasa martensit dengan tipe M18R pada setiap spesimen. Plat martensit kebanyakan berorientasi ke beberapa arah dalam satu butir namun spesimen yang diberikan perlakuan panas dengan metode *quenching* bermedia pendingin oli (SQOB) memiliki batas butir yang arah orientasi martensitnya seragam dalam satu butir. Selain itu, ditemukan presipitat berupa fasa  $\alpha$  pada batas butir dan dalam butir pada spesimen yang diberikan perlakuan panas dengan metode *quenching* bermedia pendingin air (SQWB). Dari variasi metode *quenching* proses pendinginan spesimen SQWB dipercaya memiliki laju pendinginan yang paling lambat akibat pembentukan lapisan uap (*vapor layer*) pada spesimen sehingga menginsulasi spesimen dari media pendingin. Pada pengujian temperatur transformasi Cu-Zn-Al, nilai temperatur transformasi ( $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$ , dan  $A_f$ ) masing-masing spesimen menunjukkan bahwa sangat dipengaruhi laju pendinginan dan kondisi *solution treatment*. Dari pengujian tarik, ditemukan adanya daerah *plateau* (peningkatan regangan pada nilai tegangan yang sama) dari kurva tegangan-regangan uji tarik pada spesimen DQ, UQ, dan SQOB di rentang 2,7 sampai 3,2%. Deformasi dalam daerah *plateau* dapat dikembalikan secara termal. Dalam spesimen SQWB tidak ditemukan daerah *plateau* yang jelas yang diakibatkan oleh adanya sejumlah fasa  $\alpha$  dalam struktur mikro spesimen. Dari pengujian *recovery*, didapatkan spesimen SQOB memiliki sifat *shape memory* yang paling baik diikuti dengan spesimen UQ, namun spesimen SQWB ditemukan memiliki nilai *recovery* yang relatif cukup rendah dibandingkan dengan spesimen lainnya. Salah satu alasan utama rendahnya nilai *recovery* pada spesimen SQWB adalah adanya fasa  $\alpha$  pada mikrostruktur spesimen. Dari pengujian *aging*, ditemukan adanya penurunan nilai *recovery*, tegangan luluh, dan temperatur transformasi pada spesimen yang diberikan perlakuan *aging*. Adanya proses presipitasi dari fasa  $\alpha$  dianggap sebagai hal utama terjadi penurunan nilai sifat-sifat tersebut (V. D. Asanovic et al., 2004).



**Gambar 2. 15** Mikrostruktur paduan Cu-20,8Zn-5,8Al yang telah diberikan *direct quench*, *up quench*, dan *step quench* dengan media air dan oli (V. D. Asanovic et al., 2004)

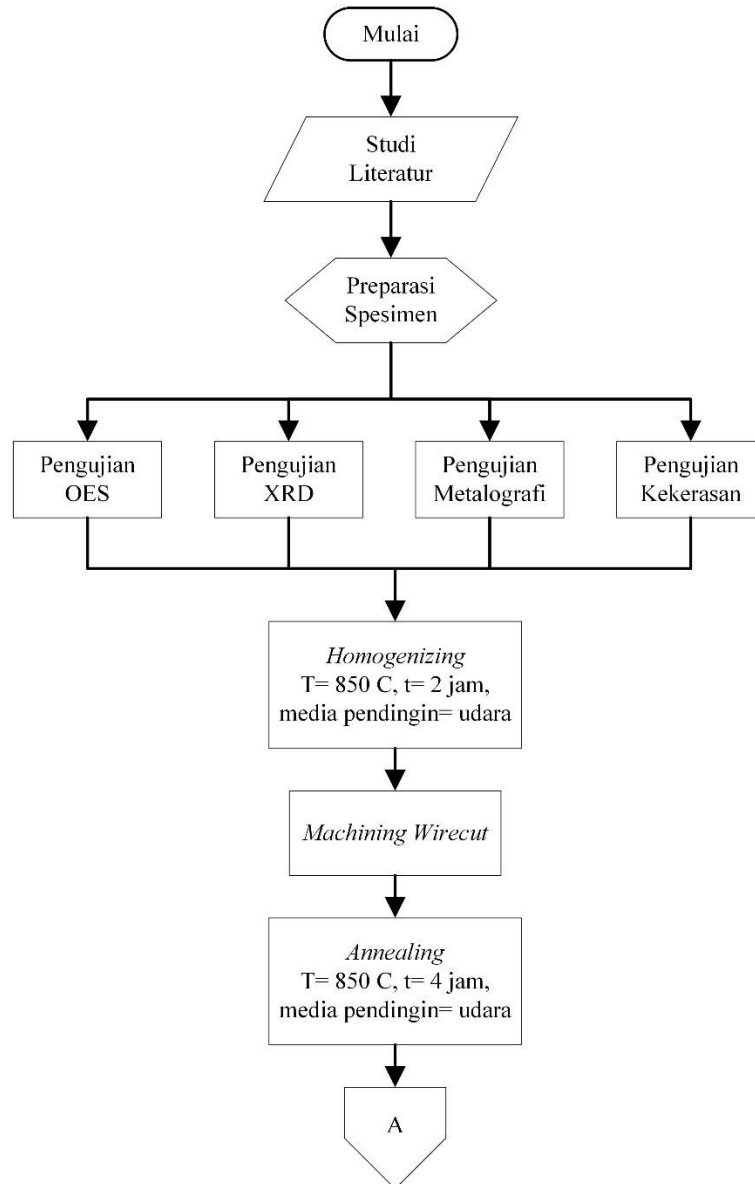
Liu H. pada tahun 2006 melakukan penelitian tentang pengaruh variasi perlakuan panas berupa *thermal cycling*, metode *quenching* dan media pendingin terhadap sifat *shape memory effect* (SME) dari berbagai paduan Cu-26Zn-4Al-1Ni dengan temperatur transformasi yang berbeda. Temperatur transformasi ini diatur dengan memvariasikan elemen paduan tambahan yaitu La dan Ce dengan rentang 0.01-0.10% dan didapatkan temperatur  $M_s$  yaitu 315, 326, 339, 347, 361, dan 398 K. Spesimen memiliki dimensi 1,5 mm x 4 mm x 100 mm. Spesimen

diberikan perlakuan panas *solution treatment* pada temperatur 1123 K selama 15 menit lalu didinginkan cepat dengan metode *up* dan *step quench*. Spesimen yang diberikan perlakuan panas *up quench* didinginkan dengan cepat dalam media pendingin oli bertemperatur ruang dan dipanaskan kembali dalam media oli dengan temperatur 423 K dan diberikan *aging* dalam air dengan temperatur 323 K selama 10 menit. Spesimen yang diberikan perlakuan panas *step quench* didinginkan ke dalam media pendingin oli dengan temperatur 423 K dan ditahan selama 15 menit. Ditemukan bahwa nilai *recovery* spesimen yang diberikan perlakuan panas berupa *up quench* dan *aging* lebih baik dari spesimen yang diberikan perlakuan panas *step quench*. Nilai *recovery* spesimen yang diberikan *thermal cycling* dalam media oli bertemperatur 423 K memiliki nilai *recovery* yang lebih baik dibanding spesimen yang diberikan *thermal cycling* dalam media air bertemperatur 373 K. Spesimen yang memiliki temperatur antara 315 – 347 K memiliki tatanan struktur martensit berbentuk pin dengan arah yang konsisten, namun pada spesimen yang memiliki temperatur transformasi antara 361 dan 398 K memiliki arah orientasi martensit yang tidak konsisten. Dengan bertambahnya jumlah *thermal cycling*, struktur martensit berbentuk pin semakin banyak ditemukan. Struktur ini memiliki pengaruh yang negatif terhadap sifat *shape memory effect* dimana regenerasi struktur martensit menjadi kurang baik (Liu, 2006).

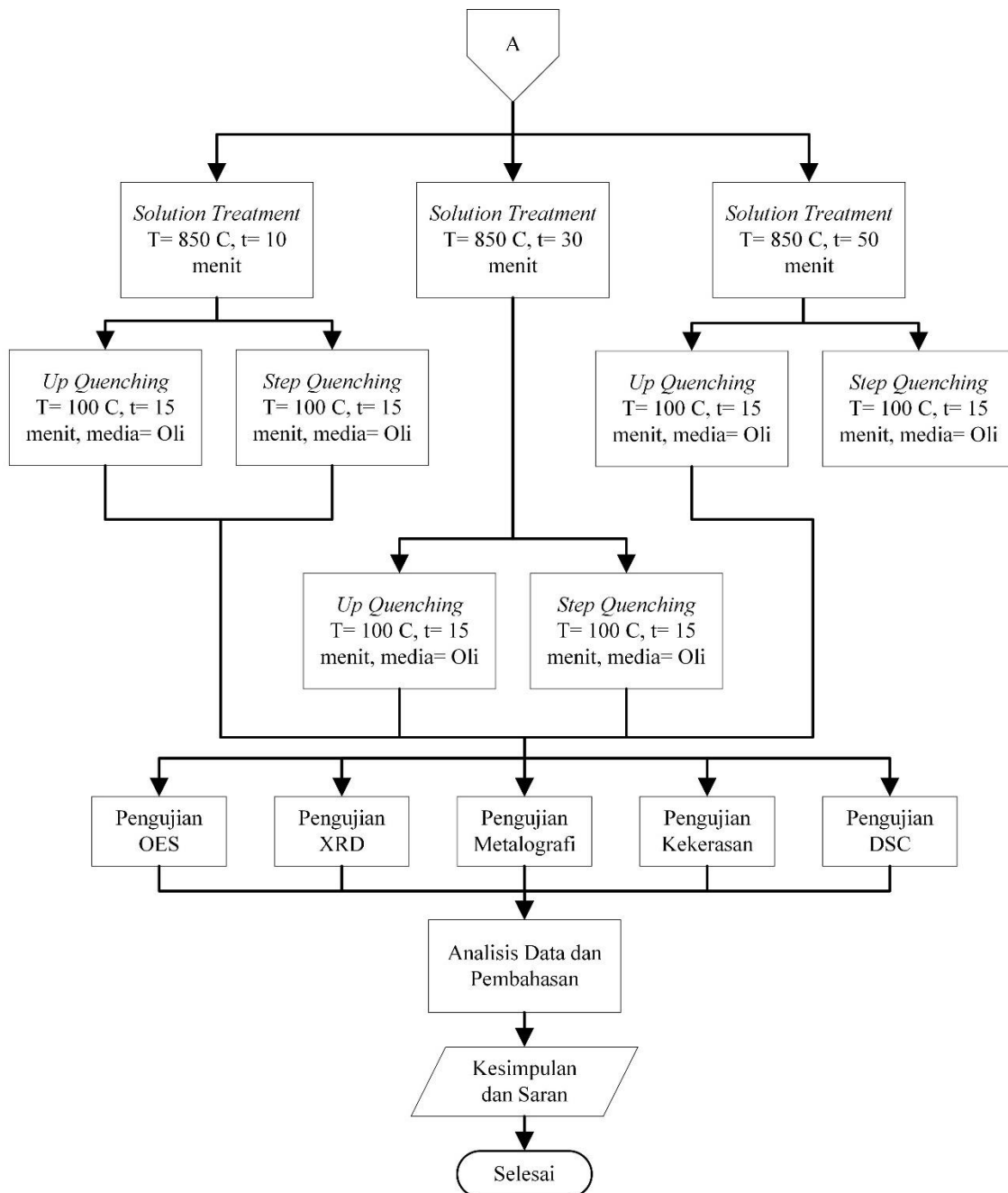
### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan diagram alir yang dilakukan pada penelitian ini:







**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Gelas Ukur  
Alat ini berfungsi untuk mengukur bahan larutan etsa yang merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.
2. *Beaker Glass*  
Alat ini berfungsi sebagai wadah pencampur bahan larutan etsa dan merupakan inventaris Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.
3. Gerinda Tangan.  
Alat ini berfungsi untuk memotong spesimen pada saat proses preparasi spesimen.



**Gambar 3. 2** Gerinda Tangan

4. Mesin *Grinding* dan *Polishing*  
Alat ini berfungsi untuk melakukan proses *grinding* dan *polishing* spesimen pada saat pengujian metalografi dan merupakan inventaris Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.
5. Kertas Amplas  
Alat ini berfungsi untuk mengamplas spesimen pada saat pengujian metalografi.
6. Alat *Wire Cut*  
Alat ini berfungsi untuk memotong spesimen yang digunakan pada saat preparasi pengujian *shape memory effect*.
7. *High Temperature Furnace*  
Alat ini berfungsi pada saat proses perlakuan panas dan merupakan inventaris Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.



**Gambar 3. 3** *High Temperatur Furnace*

8. Alat Uji Komposisi  
Alat ini berfungsi untuk menguji komposisi kimia pada paduan Cu-Al-Zn dan merupakan inventaris PPNS, Surabaya.
9. Alat Uji Kekerasan  
Alat ini berfungsi untuk mengetahui nilai kekerasan paduan Cu-Zn-Al. Alat ini berfungsi untuk mengetahui nilai kekerasan dari paduan Cu-Al-Zn baik sebelum maupun sesudah proses perlakuan panas dan merupakan inventaris Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.
10. Mikroskop Optik  
Alat ini berfungsi untuk mengetahui struktur mikro spesimen paduan dan merupakan inventaris Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.



**Gambar 3. 4** Mikroskop Optik

11. Alat Uji XRD

Alat ini berfungsi untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk pada spesimen dengan cara menembakkan sinar-X dan merupakan inventaris Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS

12. *Oilbath*

Alat ini berfungsi pada saat proses *step quenching* untuk menginkubasi spesimen dalam oli pada temperature konstan dan waktu tertentu.

### 3.3 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Paduan Cu-Zn-Al

Dari proses pengecoran didapatkan paduan Cu-Zn-Al dengan komposisi sesuai dengan *ASM Specialty Handbook: Copper & Copper Alloys*.



**Gambar 3. 5** Paduan Cu-Zn-Al Hasil Pengecoran

2. Bahan Etsa

Pada penelitian ini digunakan bahan etsa yang sesuai dengan *ASM Handbook Volume 9*, yaitu:

- 6,5 gram  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- 1 ml HCl
- 48 ml Metanol

3. Oli

Pada penelitian ini digunakan oli sebagai media pendingin. Oli yang digunakan adalah oli SAE 10W-30.

4. Aquades

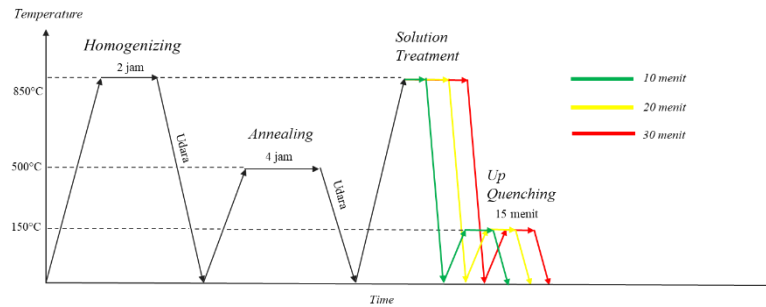
Pada penelitian ini digunakan air murni atau aquades sebagai media pendingin.

### 3.4 Kurva Perlakuan Panas

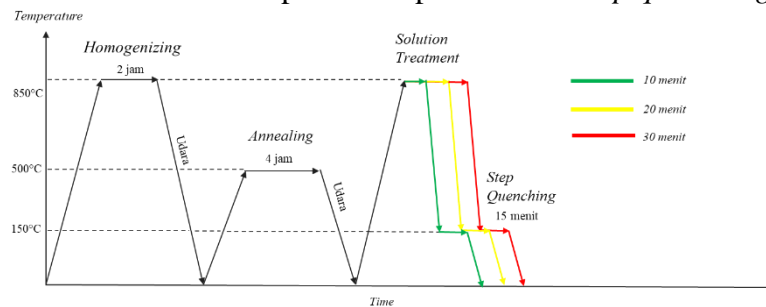
Pada penelitian ini dilakukan perlakuan panas yang terdiri dari *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment*. Sedangkan variable yang digunakan pada penelitian ini adalah *holding time solution treatment*, *up quenching*, dan *step quenching* pada *solution treatment*.

---





**Gambar 3. 6** Kurva perlakuan panas metode *up quenching*



**Gambar 3. 7** Kurva perlakuan panas metode *step quenching*

### 3.5 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini prosedur yang dilakukan pada proses perlakuan panas adalah sebagai berikut:

#### 3.5.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Homogenizing*

Pada penelitian ini prosedur yang dilakukan pada proses perlakuan panas *homogenizing* adalah sebagai berikut:

1. Spesimen disiapkan.
2. *Furnace* untuk perlakuan panas disiapkan.
3. Spesimen dimasukkan ke dalam *furnace*, kemudian spesimen dipanaskan hingga temperatur 850°C dan ditahan selama 2 jam.
4. Spesimen dikeluarkan dari *furnace* dan dibiarkan dingin di udara.

#### 3.5.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Annealing*

Pada penelitian ini prosedur yang dilakukan pada proses perlakuan panas *annealing* adalah sebagai berikut:

1. Spesimen disiapkan.
2. *Furnace* untuk perlakuan panas disiapkan.
3. Spesimen dimasukkan ke dalam *furnace*, kemudian spesimen dipanaskan hingga temperatur 500°C dan ditahan selama 4 jam.
4. Spesimen dikeluarkan dari *furnace* dan dibiarkan dingin di dalam *furnace*.

#### 3.5.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Solution Treatment*

Pada penelitian ini prosedur yang dilakukan pada proses perlakuan panas *solution treatment* adalah sebagai berikut:

1. Spesimen disiapkan.
2. *Furnace* untuk perlakuan panas disiapkan.
3. Spesimen dimasukkan ke dalam *furnace*, kemudian spesimen dipanaskan hingga temperatur 850°C dan ditahan selama 10 menit.
4. Spesimen dikeluarkan dari *furnace*, kemudian dimasukkan ke dalam media pendingin oli.

- Langkah 1-4 diulangi, namun durasi yang digunakan pada *solution treatment* diubah menjadi 30 menit dan 50 menit.
- Langkah 1-5 diulangi, namun metode *step quenching* yang digunakan diubah menjadi *up quenching* pada media oli bertemperatur 100°C.

### 3.6 Proses Analisa

Pada penelitian ini dilakukan analisa berupa analisa komposisi kimia, analisa XRD, analisa metalografi, analisa kekerasan, analisa DSC, dan analisa SME. Proses analisisnya adalah sebagai berikut:

#### 3.6.1 Analisa Komposisi Kimia

Analisa komposisi kimia dilakukan dengan pengujian OES dan membandingkannya dengan *range* komposisi sesuai *ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys*. Jenis pengujian OES yang digunakan adalah Spark OES, yang menggunakan perbedaan potensial elektrik antara elektroda dan spesimen yang menghasilkan *electrical discharge* sehingga permukaan material tipis menjadi panas dan menguap.

#### 3.6.2 Analisa X-Ray Diffraction (XRD)

Pada penelitian ini analisa XRD dilakukan untuk mengetahui fasa dan struktur kristal yang terbentuk pada spesimen yang digunakan. analisa XRD bekerja dengan mendeteksi perbedaan intensitas sinar-X antara material yang dipancarkan oleh sinar-X dengan intensitas sinar yang ditransmisikan. Perbedaan tersebut terjadi karena adanya penyerapan oleh material tersebut. Pada berkas sinar-X yang dihamburkan, terdapat sinar-X yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan juga saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan disebut sebagai berkas difraksi.

#### 3.6.3 Analisa Metalografi

Pada penelitian ini analisa metalografi berfungsi untuk mengamati struktur mikro dan topografi pada suatu material. Analisa ini memerlukan preparasi menggunakan larutan etsa sebelum diamati pada mikroskop. Larutan etsa yang digunakan berdasarkan pada *ASM Handbook Volume 9* dan mikroskop yang digunakan adalah *Metallurgical Microscope OLYMPUS BX51MRF*.

#### 3.6.4 Analisa Kekerasan

Pada penelitian ini analisa kekerasan berfungsi untuk mengetahui nilai kekerasan dari spesimen baik sebelum maupun sesudah dilakukan proses *solution treatment*. Metode yang digunakan merupakan metode Vickers berdasarkan standar ASTM E-92-17 dan indentor yang digunakan merupakan piramida *diamond* dengan sudut 136° dan beban 30 kgf dengan waktu tahan 10 detik.

#### 3.6.5 Analisa Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Analisa DSC berfungsi untuk mengukur kalor yang diserap atau dilepaskan dari suatu material baik saat pemanasan maupun pendinginan pada rentang temperatur transformasi tertentu. Sampel material memiliki ukuran yang sangat kecil, hanya beberapa milligram. Terdapat puncak endotermik dan eksotermik pada saat sampel menyerap atau mengeluarkan energi karena adanya transformasi sehingga akan keluar suatu grafik yang mendefinisikan awal, puncak, dan akhir dari perubahan fasa material. Pada penelitian ini analisa DSC bertujuan untuk mengetahui temperatur transformasi  $M_S$  (*Martensite Start*),  $M_F$  (*Martensite Finish*),  $A_S$  (*Austenite Start*), dan  $A_F$  (*Austenite Finish*) pada paduan Cu-Zn-Al.

### 3.7 Rancangan Penelitian

Rancangan dari penelitian kali ini adalah sebagai berikut.

**Tabel 3.1** Rancangan Penelitian

Nama Spesimen	<i>Holding Time Solution Treatment</i> (Temperatur 850°C)	Metode <i>Quenching</i>	Pengujian					
			OES	Metalografi	XRD	DSC	SEM	Kekerasan
<i>As Cast</i>	-	-	V	V	V	-	-	V
UQ10	10 Menit	<i>Up Quenching</i>	-	V	V	-	-	-
SQ10	10 Menit	<i>Step Quenching</i>	-	V	V	-	-	-
UQ30	30 Menit	<i>Up Quenching</i>	-	V	V	V	V	V
SQ30	30 Menit	<i>Step Quenching</i>	-	V	V	V	V	V
UQ50	50 Menit	<i>Up Quenching</i>	-	V	V	-	V	V
SQ50	50 Menit	<i>Step Quenching</i>	-	V	V	-	V	V

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisa Komposisi Kimia

Dilakukan pengujian komposisi kimia pada paduan Cu-Zn-Al menggunakan alat uji *Optical Emmision Spectroscopy* (OES) di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Dari pengujian OES didapatkan komposisi paduan Cu-Zn-Al seperti pada Tabel 4.1.

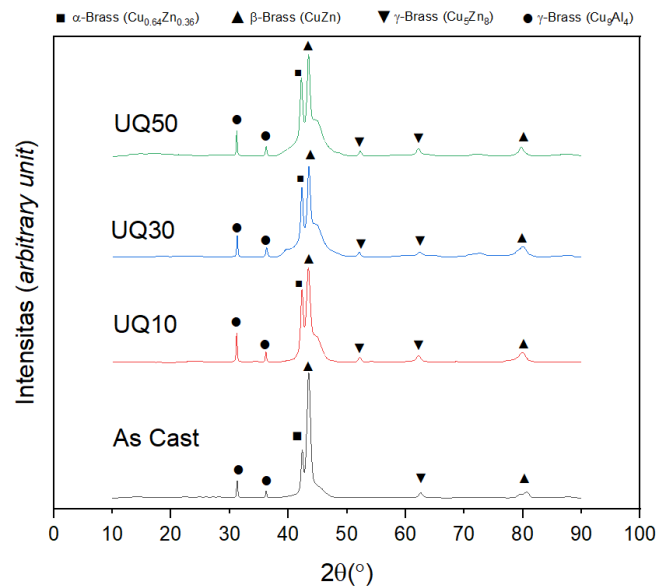
**Tabel 4. 1** Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Cu-Zn-Al

Keterangan	Komposisi		
	Cu (%)	Zn (%)	Al (%)
<i>ASM Handbook Volume. 2</i>	<i>Balance</i>	10 – 30	5 – 10
Hasil Pengujian	<i>Balance</i>	15,9	6,89

Dari Tabel 4.1, telah ditunjukkan bahwa dari hasil pengujian komposisi paduan Cu-Zn-Al selanjutnya dapat disebut sebagai Cu-15,9Zn-6,89Al.

### 4.2 Hasil Analisa X-Ray Diffraction Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al

Pengujian XRD telah dilakukan pada spesimen paduan Cu-15,9Zn-6,89Al di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS. Pengujian XRD bertujuan untuk mengetahui fasa, senyawa, dan struktur kristal paduan Cu-15,9Zn-6,89Al. Pada penelitian ini dilakukan pengujian XRD pada spesimen *as cast* atau spesimen hasil pengecoran yang belum menerima perlakuan panas, spesimen yang diberikan variasi metode *quenching upquenching* dan *step quenching* yang telah diberikan tiga variasi waktu tahan atau *holding time* pada proses *solution treatment* selama 10, 30, dan 50 menit. Kodifikasi dari masing-masing spesimen disesuaikan dengan variasi metode *quenching* dan waktu tahan saat proses *solution treatment* yaitu UQ10, UQ30, UQ50, SQ10, SQ30, dan SQ50. Digunakan *software HighScore Plus* untuk menganalisis *peak* pada grafik hasil pengujian XRD untuk membandingkannya dengan data difraksi standar pada *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Pada Gambar 4.1., Ditunjukkan hasil analisis *peak* XRD untuk variasi spesimen *As Cast* dan *Upquenching* paduan Cu-15,9Zn-6,89Al.



**Gambar 4. 1** Hasil pengujian XRD spesimen *as cast* dan spesimen dengan metode *up quenching*

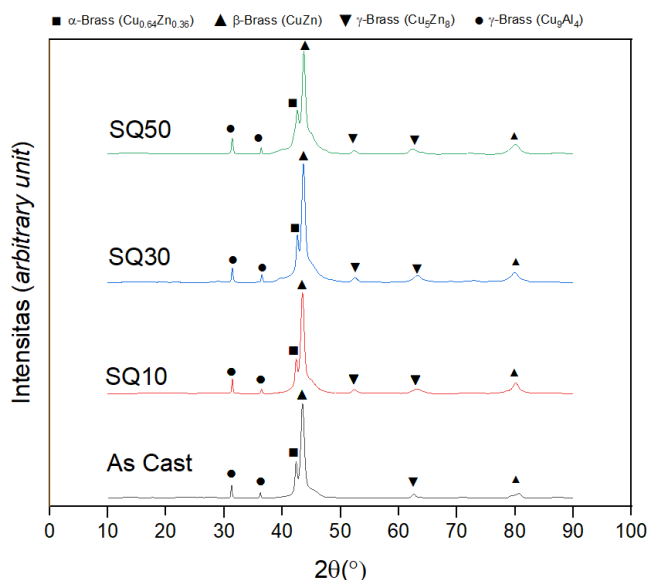
Dapat diketahui bahwa, dari Gambar 4.1, terdapat beberapa *peak* yang mengkarakterisasikan masing-masing fasa yang ada dalam spesimen *as cast* dan spesimen yang telah diberikan perlakuan panas berupa *upquenching* dengan variasi waktu tahan proses *solution treatment* dari paduan Cu-15,9-6,89Al. Untuk spesimen *As Cast*, hasil pengujian XRD memperlihatkan *peak* yang menandakan adanya  $\alpha$ -brass ( $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ ) berada pada  $2\theta$   $42,376^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-050-1333. Selanjutnya, untuk *peak*  $\beta$ -brass (CuZn), berada pada  $2\theta$   $43,472^\circ$  dan  $80,145^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-002-1231. Kemudian, untuk *peak*  $\gamma$ -Brass ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) berada pada  $2\theta$   $62,461^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-025-1228 dan ( $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ) berada pada  $2\theta$   $31,248^\circ$  dan  $36,188^\circ$  dengan struktur kristal kubik sesuai kode referensi ICDD 00-024-0003.

Untuk spesimen UQ10, hasil pengujian XRD memperlihatkan *peak* yang menandakan adanya  $\alpha$ -brass ( $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ ) berada pada  $2\theta$   $42,279^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-050-1333. Selanjutnya, untuk *peak*  $\beta$ -brass (CuZn), berada pada  $2\theta$   $43,374^\circ$  dan  $79,916^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-002-1231. Kemudian, untuk *peak*  $\gamma$ -Brass ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) berada pada  $2\theta$   $52,150$  dan  $62,163^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-025-1228 dan ( $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ) berada pada  $2\theta$   $31,167^\circ$  dan  $36,148^\circ$  dengan struktur kristal kubik sesuai kode referensi ICDD 00-024-0003.

Untuk spesimen UQ30, hasil pengujian XRD memperlihatkan *peak* yang menandakan adanya  $\alpha$ -brass ( $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ ) berada pada  $2\theta$   $42,266^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-050-1333. Selanjutnya, untuk *peak*  $\beta$ -brass (CuZn), berada pada  $2\theta$   $43,462^\circ$  dan  $79,962^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-002-1231. Kemudian, untuk *peak*  $\gamma$ -Brass ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) berada pada  $2\theta$   $52,074$  dan  $62,382^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-025-1228 dan ( $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ) berada pada  $2\theta$   $31,263^\circ$  dan  $36,272^\circ$  dengan struktur kristal kubik sesuai kode referensi ICDD 00-024-0003.

Untuk spesimen UQ50, hasil pengujian XRD memperlihatkan *peak* yang menandakan adanya  $\alpha$ -brass ( $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ ) berada pada  $2\theta$   $42,179^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik

sesuai kode referensi ICDD 00-050-1333. Selanjutnya, untuk *peak*  $\beta$ -brass (CuZn), berada pada  $2\theta$   $43,405^\circ$  dan  $79,732^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-002-1231. Kemudian, untuk *peak*  $\gamma$ -Brass (Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>) berada pada  $2\theta$   $52,232^\circ$  dan  $62,130^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-025-1228 dan (Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>) berada pada  $2\theta$   $31,178^\circ$  dan  $36,191^\circ$  dengan struktur kristal kubik sesuai kode referensi ICDD 00-024-0003.



**Gambar 4. 2** Hasil pengujian XRD spesimen *as cast* dan spesimen dengan metode *step quenching*

Dari Gambar 4.2, terdapat beberapa *peak* yang mengkarakterisasikan masing-masing fasa yang ada dalam spesimen *as cast* dan spesimen yang telah diberikan perlakuan panas berupa *step quenching* dengan variasi waktu tahan proses *solution treatment* dari paduan Cu-15,9-6,89Al. Untuk spesimen SQ10, hasil pengujian XRD memperlihatkan *peak* yang menandakan adanya  $\alpha$ -brass (Cu<sub>0,64</sub>Zn<sub>0,36</sub>) berada pada  $2\theta$   $42,339^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-050-1333. Selanjutnya, untuk *peak*  $\beta$ -brass (CuZn), berada pada  $2\theta$   $43,416^\circ$  dan  $80,045^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-002-1231. Kemudian, untuk *peak*  $\gamma$ -Brass (Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>) berada pada  $2\theta$   $52,365^\circ$  dan  $62,077^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-025-1228 dan (Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>) berada pada  $2\theta$   $31,380^\circ$  dan  $36,383^\circ$  dengan struktur kristal kubik sesuai kode referensi ICDD 00-024-0003.

Untuk spesimen SQ30, hasil pengujian XRD memperlihatkan *peak* yang menandakan adanya  $\alpha$ -brass (Cu<sub>0,64</sub>Zn<sub>0,36</sub>) berada pada  $2\theta$   $42,546^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-050-1333. Selanjutnya, untuk *peak*  $\beta$ -brass (CuZn), berada pada  $2\theta$   $43,582^\circ$  dan  $79,922^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-002-1231. Kemudian, untuk *peak*  $\gamma$ -Brass (Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>) berada pada  $2\theta$   $52,442^\circ$  dan  $63,251^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-025-1228 dan (Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>) berada pada  $2\theta$   $31,376^\circ$  dan  $36,439^\circ$  dengan struktur kristal kubik sesuai kode referensi ICDD 00-024-0003.

Untuk spesimen SQ50, hasil pengujian XRD memperlihatkan *peak* yang menandakan adanya  $\alpha$ -brass (Cu<sub>0,64</sub>Zn<sub>0,36</sub>) berada pada  $2\theta$   $42,527^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-050-1333. Selanjutnya, untuk *peak*  $\beta$ -brass (CuZn), berada pada  $2\theta$   $43,654^\circ$  dan  $79,987^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-

002-1231. Kemudian, untuk *peak*  $\gamma$ -Brass ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) berada pada  $2\theta$   $52,317^\circ$  dan  $62,297^\circ$  dengan struktur kristal berbentuk kubik sesuai kode referensi ICDD 00-025-1228 dan ( $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ) berada pada  $2\theta$   $31,366^\circ$  dan  $36,343^\circ$  dengan struktur kristal kubik sesuai kode referensi ICDD 00-024-0003.

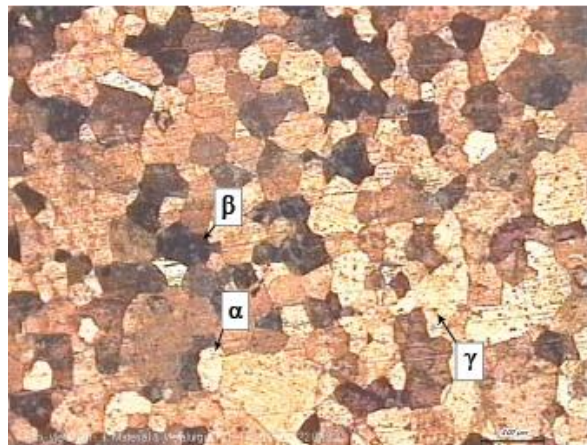
Dari pengujian XRD yang telah dilakukan ditemukan adanya fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  pada semua spesimen paduan Cu-15,9Zn-6,89Al. Hal ini sesuai dengan diagram fasa *ternary* yang menunjukkan bahwa dalam rentang paduan tersebut akan dihasilkan fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  (ASM International, 1992b)(Stošić et al., 2017). Fasa  $\alpha$  dan fasa  $\gamma$  terjadi karena reaksi dekomposisi dari fasa  $\beta$  ketika proses pendinginan menjadi  $\alpha$  dan  $\gamma$ . Fasa  $\gamma$  terbagi menjadi 2 yaitu fasa  $\gamma$ -brass ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) dan  $\gamma_2$ -brass ( $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ). Pada pendinginan ekuilibrium, fasa  $\beta$  akan terdekomposisi menjadi  $\alpha$  dan  $\gamma$  pada temperatur  $427^\circ\text{C}$  sesuai diagram fasa biner Cu-Zn dan fasa  $\beta$  akan terdekomposisi menjadi fasa  $\alpha$  dan  $\gamma_2$  pada temperatur  $565^\circ\text{C}$  sesuai diagram fasa biner Cu-Al. Namun karena pendinginan yang tidak ekuilibrium, fasa  $\beta$  masih ditemukan pada temperatur kamar (Otsuka & Wayman, 1998) (Fremond & Miyazaki, 1996).

Spesimen paduan Cu-15,9Zn-6,89Al diberikan perlakuan panas berupa *solution treatment* yang dilakukan untuk mendapatkan fasa  $\beta$  yang tunggal di temperatur kamar. Perlakuan panas *solution treatment* dilakukan dengan menahan spesimen pada temperatur dan waktu tertentu sehingga terbentuk fasa yang diinginkan pada diagram fasa. Proses *solution treatment* diikuti dengan pendinginan cepat sehingga fasa yang berada pada temperatur tinggi dapat ditemukan di temperatur kamar (Chandrasekaran et al., 1995). Pada penelitian ini, fasa  $\beta$  didinginkan cepat melalui proses *quenching* dengan jenis *up quenching* dan *step quenching* untuk mendapatkan fasa martensit tanpa mengalami dekomposisi menjadi  $\alpha$  dan  $\gamma$ . Namun, ditemukan adanya perbedaan intensitas fasa  $\alpha$  antara spesimen yang diberikan *quenching* dengan metode *up quenching* dan *step quenching*. Perbedaan jumlah fasa  $\alpha$  ini terjadi akibat perbedaan laju pendinginan dimana laju pendinginan cepat seperti pada spesimen *up quenching* yang didinginkan dengan media air pada temperatur kamar akan menghasilkan fasa  $\alpha$  yang lebih banyak dan laju pendinginan lambat seperti pada spesimen *step quenching* yang didinginkan dengan media oli pada temperatur kamar akan menghasilkan fasa  $\beta$  yang lebih banyak sesuai dengan diagram TTT Cu-Zn pada penelitian yang dilakukan oleh Coric dan hasil pengujian XRD pada penelitian yang dilakukan oleh Wibisono (Danko & Franz, 2009; Wibisono et al., 2020).

### 4.3 Hasil Analisa Metalografi Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al

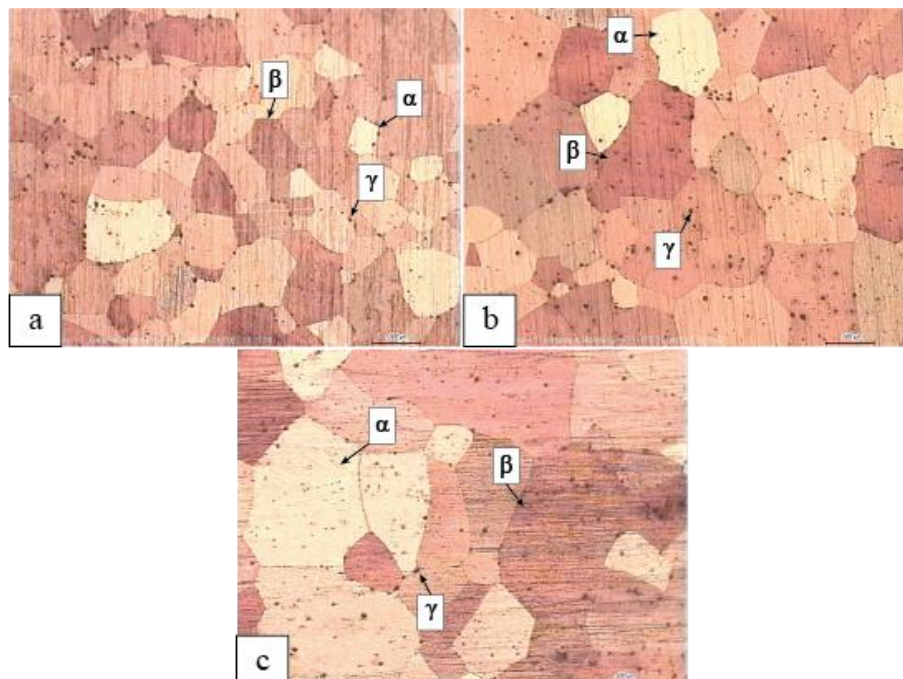
Pengujian metalografi telah dilakukan pada spesimen paduan Cu-15,9Zn-6,89Al di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS. Pengujian metalografi dilakukan menggunakan alat uji *Metallurgical Microscope OLYMPUS BX51M-RF*. Pengujian metalografi bertujuan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk pada spesimen paduan Cu-15,9Zn-6,89Al. Pada penelitian ini dilakukan pengujian metalografi pada spesimen *as cast*, UQ10, UQ30, UQ50, SQ10, SQ30, dan SQ50. Sebelum pengujian metalografi dapat dilakukan, masing-masing spesimen perlu diberikan preparasi permukaan yang terdiri atas *grinding* dengan amplas kertas, *polishing*, dan pengetsaan. Larutan etsa yang digunakan untuk spesimen Cu-15,9Zn-6,89Al disesuaikan dengan larutan etsa yang digunakan untuk spesimen kuningan (paduan Cu-Zn) yang memiliki komposisi 6,5 gr  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 48 ml metanol, dan 1 ml HCl. Pengetsaan spesimen Cu-15,9Zn-6,89Al dilakukan dengan metode *immerse* selama 10 detik.





**Gambar 4. 3** Hasil pengujian metalografi spesimen *as cast* dengan perbesaran 100x

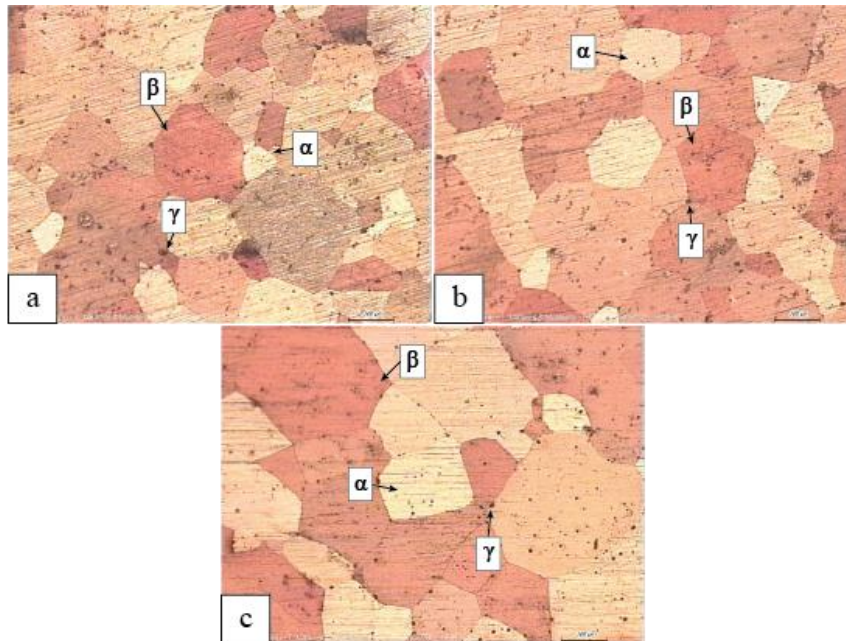
Gambar 4.3 menunjukkan struktur mikro yang terbentuk pada spesimen *as cast* paduan Cu-15,9Zn-6,89Al setelah dietsa dan diamati dengan perbesaran 100x. Dari hasil pengamatan, spesimen *as cast* menunjukkan beberapa fasa yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ . Fasa tersebut dapat dibedakan dari warna yang dihasilkan. Fasa  $\alpha$  dikarakteristikan dengan warna terang, fasa  $\beta$  dikarakteristikan dengan warna gelap, dan fasa  $\gamma$  dikarakteristikan dengan butiran presipitat berwarna gelap di batas butir maupun matriks butir spesimen (Kostov et al., 2018). Dari hasil metalografi, fasa  $\beta$  merupakan fasa yang lebih dominan dibandingkan dengan fasa  $\alpha$  maupun fasa  $\gamma$  (Wibisono et al., 2020). Hal ini didukung dengan hasil pengujian XRD dimana intensitas *peak* yang mengkarakterisasikan fasa  $\beta$  memiliki intensitas yang tinggi apabila dibandingkan dengan intensitas *peak* yang mengkarakterisasikan fasa  $\alpha$  dan  $\gamma$ .



**Gambar 4. 4** Hasil pengujian metalografi spesimen *up quenching* dengan waktu tahan selama (a) 10 menit, (b) 30 menit, dan (c) 50 menit pada perbesaran 100x

Gambar 4.4 menunjukkan struktur mikro yang terbentuk pada spesimen paduan Cu-15,9Zn-6,89Al *up quenching* dengan variasi waktu tahan *solution treatment* 10 menit (UQ10),

30 menit (UQ30), dan 50 menit (UQ50) setelah dietsa dan diamati dengan perbesaran 100x. Dari hasil pengamatan, terlihat adanya fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  seperti pada spesimen *as cast*. Terdapat beberapa perbedaan yang ditemukan setelah spesimen diberikan perlakuan *upquenching* dan variasi waktu tahan *solution treatment* yaitu terbentuknya fasa  $\alpha$  yang lebih banyak dan pertumbuhan butir spesimen UQ10, UQ30, dan UQ50 apabila dibandingkan dengan spesimen *as cast* yang sesuai dengan hasil pengujian XRD.



**Gambar 4. 5** Hasil pengujian metalografi spesimen *step quenching* dengan waktu tahan selama (a) 10 menit, (b) 30 menit, dan (c) 50 menit pada perbesaran 100x

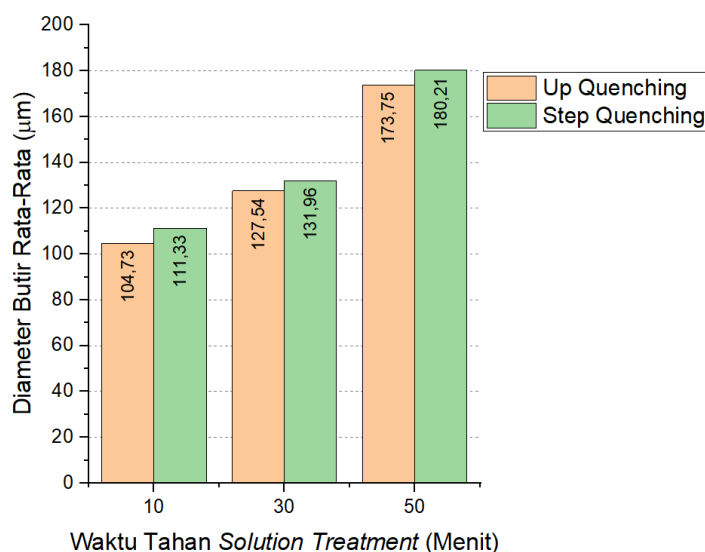
Gambar 4.5 menunjukkan struktur mikro yang terbentuk pada spesimen paduan Cu-15,9Zn-6,89Al *step quenching* dengan variasi waktu tahan *solution treatment* 10 menit (SQ10), 30 menit (SQ30), dan 50 menit (SQ50) setelah dietsa dan diamati dengan perbesaran 100x. Dari hasil pengamatan, terlihat adanya fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  seperti pada spesimen *as cast*. Terdapat beberapa perbedaan yang ditemukan setelah spesimen diberikan perlakuan *upquenching* dan variasi waktu tahan *solution treatment* yaitu pertumbuhan butir spesimen SQ10, SQ30, dan SQ50 apabila dibandingkan dengan spesimen *as cast*. Terlihat juga kesamaan pada spesimen *step quenching* dimana fasanya didominasi oleh fasa  $\beta$  seperti yang ditunjukkan oleh hasil pengujian XRD.

Pada gambar 4.4 dan 4.5, tidak ditemukan adanya martensit ( $\beta'$ ) pada spesimen yang telah diberikan perlakuan panas berupa *up quenching* dan *step quenching* dengan variasi waktu tahan *solution treatment*. Hal ini diduga terjadi akibat rendahnya temperatur mulai terbentuknya martensit ( $M_s$ ) yang berada dibawah temperatur kamar.

Perhitungan ukuran butir dari hasil pengujian metalografi spesimen dapat dilakukan menggunakan *software ImageJ*. Ukuran butir dari spesimen yang telah diuji metalografi dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut:

**Tabel 4. 2** Ukuran Butir Spesimen

Spesimen	Diameter Butir Rata-Rata ( $\mu\text{m}$ )
<i>As cast</i>	66,82
UQ10	104,73
UQ30	127,54
UQ50	173,75
SQ10	111,33
SQ30	131,96
SQ50	180,21



**Gambar 4. 6** Diagram ukuran butir spesimen

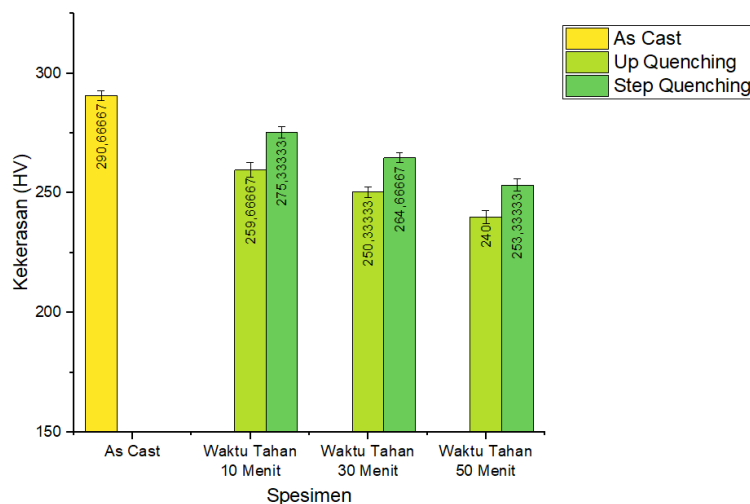
Tabel 4.2 dan Gambar 4.6 menunjukkan adanya pertumbuhan butir ketika spesimen diberikan variasi waktu tahan pada proses *solution treatment*. Spesimen UQ10 dan SQ10 yang diberikan waktu tahan 10 menit, memiliki besar butir terkecil yaitu 104,73 dan 111,33  $\mu\text{m}$  dan tumbuh hingga mencapai nilai 173,75 dan 180,21  $\mu\text{m}$  pada spesimen UQ50 dan SQ50 yang diberikan waktu tahan 50 menit. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Adnyana dimana seiring bertambahnya waktu tahan *solution treatment* besar butir akan mengalami pertumbuhan (Adnyana, 1986). Dari Gambar 4.6, terlihat juga adanya perbedaan ukuran butir spesimen yang diberikan perlakuan *up quenching* dan *step quenching* dimana pada setiap variasi waktu tahan, spesimen *step quenching* memiliki ukuran butir yang lebih besar dibandingkan spesimen *up quenching*. Hal ini berhubungan dengan laju pendinginan yang dialami oleh spesimen pada proses *quenching*. Spesimen *up quenching*, yang didinginkan cepat dalam media air di temperatur ruang, akan mengalami laju pendinginan yang lebih cepat dibandingkan spesimen *step quenching* yang didinginkan cepat dalam media oli pada temperatur 100 °C. Laju pendinginan yang cepat akan menghambat pertumbuhan butir spesimen akibat banyaknya inti yang terbentuk dan menghasilkan butir dengan ukuran yang lebih kecil dibanding spesimen dengan laju pendinginan lambat (Avner, 1974; Haque & Ismail, 2008; Leu & Hu, 1991).

#### 4.4 Hasil Analisa Kekerasan Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al

Pengujian kekerasan telah dilakukan pada spesimen paduan Cu-15,9-6,89Al di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS FTIRS ITS. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan alat uji *Universal Hardness Tester HBRV 187,5*. Pengujian kekerasan yang digunakan adalah pengujian kekerasan *Vickers* dengan indenter berbentuk piramida. Pada penelitian ini dilakukan pengujian kekerasan pada spesimen pada spesimen *as cast*, UQ10, UQ30, UQ50, SQ10, SQ30, dan SQ50. Sebelum pengujian kekerasan dapat dilakukan, spesimen perlu dipreparasi permukaan melalui proses *grinding* menggunakan amplas. Digunakan beban 30 kgf dengan waktu tahan selama 10 detik pada proses indentasi dari pengujian kekerasan. Proses indentasi dilakukan sebanyak 3 (tiga) titik untuk masing-masing spesimen. Hasil pengukuran indentasi yang didapatkan lalu dirata-rata dan ditabulasi seperti Tabel 4.3 berikut untuk mendapatkan nilai kekerasan masing-masing spesimen.

**Tabel 4. 3** Hasil kekerasan spesimen

Spesimen	Kekerasan (HV)
<i>As Cast</i>	290,67±2,08
UQ10	259,67±3,06
UQ30	250,33±2,08
UQ50	240±2,65
SQ10	275,33±2,52
SQ30	264,67±2,08
SQ50	253,33±2,52



**Gambar 4. 7** Diagram kekerasan spesimen

Tabel 4.3 menunjukkan nilai kekerasan hasil pengujian spesimen *as cast*, UQ10, UQ30, UQ50, SQ10, SQ30, dan SQ50. Pada tabel tersebut diketahui spesimen hasil pengecoran tanpa diberikan perlakuan panas (*as cast*) memiliki kekerasan tertinggi dengan nilai 290,67±2,08 HV dan spesimen hasil perlakuan panas *solution treatment* dengan waktu tahan 50 menit dan metode *up quenching* (UQ50) memiliki kekerasan terendah dengan nilai 240±2,65 HV. Dari Tabel 4.3 dan Gambar 4.7 diketahui spesimen *as cast* mengalami penurunan nilai kekerasan ketika diberikan perlakuan panas berupa variasi waktu tahan 10, 30, dan 50 menit maupun variasi metode *quenching* berupa *up quenching* dan *step quenching*. Tingginya nilai kekerasan



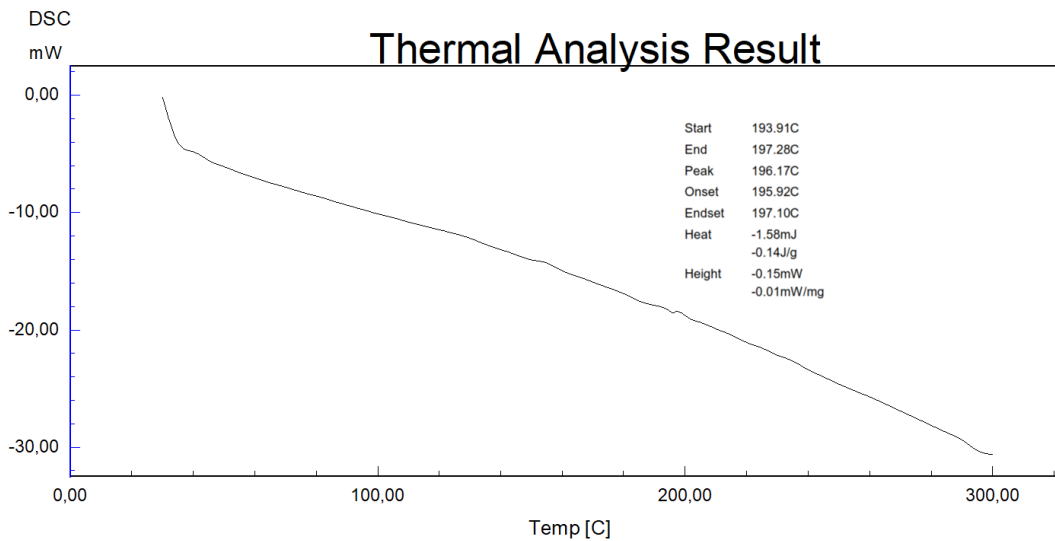
spesimen *as cast* disebabkan oleh banyaknya fasa  $\beta$  yang keras dan rapuh, sedikit fasa  $\alpha$  yang lunak, dan kecilnya besar butir (Bagherpour et al., 2017; Danko & Franz, 2009). Hal ini sesuai dengan dengan intensitas dari pengujian XRD dan perhitungan besar butir dari pengujian metalografi.

Lalu terlihat adanya perbedaan nilai kekerasan pada spesimen yang diberikan perlakuan panas berupa variasi waktu tahan dimana seiring meningkatnya waktu tahan spesimen dalam metode *quench* sejenis (*up quench* maupun *step quench*) nilai kekerasan spesimen akan semakin menurun. Pada spesimen dengan metode *up quenching*, nilai kekerasan spesimen yang diberikan waktu tahan *solution treatment* selama 10 menit (UQ10) dengan nilai  $259,67 \pm 3,06$  HV turun menjadi  $250,33 \pm 2,08$  HV ketika diberikan waktu tahan *solution treatment* selama 30 menit (UQ30) dan kembali turun menjadi  $240 \pm 2,65$  HV ketika diberikan waktu tahan *solution treatment* selama 50 menit (UQ50). Hal yang sama juga terjadi pada spesimen dengan metode *step quenching*, nilai kekerasan spesimen yang diberikan waktu tahan *solution treatment* selama 10 menit (SQ10) dengan nilai  $275,33 \pm 2,52$  HV turun menjadi  $264,67 \pm 2,08$  HV ketika diberikan waktu tahan *solution treatment* selama 30 menit (SQ30) dan kembali turun menjadi  $253,33 \pm 2,52$  HV ketika diberikan waktu tahan *solution treatment* selama 50 menit (SQ50). Hal ini disebabkan oleh pertumbuhan besar butir seiring meningkatnya waktu tahan *solution treatment*. Butir yang besar akan mengurangi daerah batas butir dan menurunkan nilai kekerasan spesimen (Jung et al., 2013).

Terlihat juga adanya perbedaan antara spesimen dengan waktu tahan *solution treatment* yang sama namun dengan variasi *quenching* yang berbeda. Dengan waktu tahan *solution treatment* yang sama, spesimen dengan metode *up quenching* memiliki kekerasan dibawah spesimen dengan metode *step quenching*. Pada spesimen dengan waktu tahan 10 menit, kekerasan spesimen dengan metode *up quenching* (UQ10) yang bernilai  $259,67 \pm 3,06$  HV lebih rendah dibandingkan spesimen dengan metode *step quenching* (SQ10) yang bernilai  $275,33 \pm 2,52$  HV. Lalu, pada spesimen dengan waktu tahan 30 menit, kekerasan spesimen dengan metode *up quenching* (UQ30) yang bernilai  $250,33 \pm 2,08$  HV lebih rendah dibandingkan spesimen dengan metode *step quenching* (SQ30) yang bernilai  $264,67 \pm 2,08$  HV. Kemudian, pada spesimen dengan waktu tahan 50 menit, kekerasan spesimen dengan metode *up quenching* (UQ50) yang bernilai  $240 \pm 2,65$  HV lebih rendah dibandingkan spesimen dengan metode *step quenching* (SQ50) yang bernilai  $253,33 \pm 2,52$  HV. Hal ini disebabkan oleh perbedaan fasa yang terbentuk akibat proses *quenching* dimana spesimen yang diberikan perlakuan *up quenching* menghasilkan fasa  $\alpha$  yang lebih banyak dibanding spesimen yang diberikan perlakuan *step quenching* yang didominasi oleh fasa  $\beta$ . Spesimen yang memiliki banyak fasa  $\alpha$  seperti spesimen *up quenching* akan memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dibanding spesimen yang memiliki sedikit fasa  $\alpha$  seperti spesimen *step quenching* (Danko & Franz, 2009).

#### 4.5 Hasil Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al

Pengujian DSC telah dilakukan pada spesimen paduan Cu-15,9Zn-6,89Al di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada (LPPT UGM) Yogyakarta. Pengujian DSC dilakukan menggunakan alat uji *Shimadzu DSC-60* dengan laju pemanasan sampel sebesar  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{menit}$ , range temperatur  $30\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$ , dan dalam gas atmosfer nitrogen murni. Pengujian DSC bertujuan untuk mengetahui temperatur transformasi dari spesimen. Temperatur transformasi yang perlu untuk diketahui antara lain *austenite start* ( $A_s$ ), *austenite finish* ( $A_f$ ), *martensite start* ( $M_s$ ), dan *martensite finish* ( $M_f$ ). Grafik hasil pengujian DSC ditunjukkan pada Gambar 4.8 berikut.



**Gambar 4. 8** Hasil pengujian DSC

Dari Gambar 4.8, terlihat adanya *peak* endotermis yang ditandai dengan turunnya nilai *heat flow*. *Peak* tersebut dimulai dari temperatur 193,91 °C (*Start*) dan berakhir pada temperatur 197,28 °C (*End*). *Peak* endotermis menunjukkan adanya transformasi fasa dari austenit. Temperatur *austenite start* ( $A_s$ ), yang merupakan temperatur mulai terbentuknya fasa austenit, berada di temperatur *Start* yaitu 193,91 °C dan temperatur *austenite finish* ( $A_f$ ), yang merupakan temperatur berakhirnya transformasi fasa menjadi austenit, berada di temperatur *End* yaitu 197,28 °C. Tidak terlihat adanya *peak* eksotermis yang ditandai dengan adanya kenaikan nilai *heat flow*. *Peak* eksotermis sendiri menunjukkan adanya transformasi fasa menjadi martensit dan akan memperlihatkan temperatur *martensite start* ( $M_s$ ) dan *martensite finish* ( $M_f$ ) (ASTM International, 2015). Hal ini disebabkan oleh rendahnya temperatur transformasi yang nilainya berada dibawah temperatur kamar. Menurut *ASM Metal Handbook Vol. 2*, temperatur  $M_s$  dari paduan *shape memory* CuZnAl dapat diperkirakan menggunakan Persamaan 2.1.

Dari perhitungan Persamaan 2.1, fraksi massa (wt%) yang didapatkan dari pengujian OES perlu diubah terlebih dahulu menjadi fraksi atom (at%). Berikut nilai  $M_s$  setelah hasil konversi fraksi atom disubstitusi ke Persamaan 4.1.

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = -81,975^{\circ}\text{C}$$

Perkiraan temperatur  $M_s$  juga dapat dihitung menggunakan persamaan menurut buku *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* seperti pada Persamaan 2.2 berikut:

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = -81,968^{\circ}\text{C}$$

Temperatur transformasi  $M_s$ ,  $A_s$ , dan  $A_f$  dapat ditabulasi seperti pada Tabel 4.4 berikut:

**Tabel 4. 4** Temperatur Transformasi Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al

Spesimen	$M_s$	$A_s$	$A_f$
Paduan Cu-15,9Zn- 6,89Al	-81,968°C	193,91°C	197,28°C

Berdasarkan Tabel 4.4 dan Gambar 4.7, yang menunjukkan temperatur transformasi austenit ( $A_s$  dan  $A_f$ ) dari paduan Cu-15,9Zn-6,89Al, hasil pengujian DSC sesuai dengan ASTM F2005-05 yang membahas tentang pengujian DSC untuk paduan *shape memory* dimana grafik pengujian DSC menghasilkan satu *peak* endotermis yang menunjukkan adanya transformasi

---

austenit (ASTM International, 2015). Hasil yang didapatkan juga sesuai dengan pengujian metalografi yang tidak menunjukkan adanya struktur mikro *twinned martensite*.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Pengaruh variasi *holding time* proses *solution treatment* pada Cu-15,9Zn-6,89Al alloy yaitu menghasilkan struktur mikro dengan fasa  $\beta$  dan  $\gamma$  yang sama pada variasi *holding time* yang telah dilakukan. Hasil pengukuran diameter butir menunjukkan bahwa adanya penambahan ukuran butir seiring meningkatnya *holding time* dari *solution treatment*. Pertambahan ukuran butir lalu menyebabkan turunnya nilai kekerasan dimana spesimen dengan *holding time* 10 menit memiliki kekerasan tertinggi diikuti dengan spesimen dengan *holding time* 50 menit memiliki kekerasan terendah.
2. Pengaruh metode perlakuan panas *up quenching* dan *step quenching* pada Cu-15,9Zn-6,89Al alloy yaitu terbentuknya struktur mikro dengan fasa  $\alpha$  dengan jumlah berbeda tanpa fasa martensit ( $\beta'$ ). Perbedaan jumlah fasa  $\alpha$  dan tidak adanya martensit yang terbentuk berhubungan dengan perbedaan laju pendinginan metode *quenching* dan rendahnya temperatur mulai terbentuknya martensit ( $M_s$ ). Pendinginan dengan metode *up quenching* memiliki laju pendinginan yang lebih cepat dibandingkan dengan metode *step quenching* sehingga terbentuk fasa  $\alpha$  dengan jumlah berbeda dengan besar butir yang lebih kecil. Lalu, rendahnya temperatur  $M_s$  ( $\sim -81,975^\circ\text{C}$ ) dari hasil hitungan teoritis menyebabkan tidak adanya indikasi fasa martensit baik dari pengujian metalografi maupun DSC. Perbedaan jumlah fasa  $\alpha$  dan besar butir yang dihasilkan oleh metode *up quenching* dan *step quenching* juga mempengaruhi nilai kekerasan dimana kekerasan tertinggi dicapai oleh spesimen SQ10 ( $275,33 \pm 2,52$  HV) dan kekerasan terendah dicapai oleh spesimen UQ50 ( $240 \pm 2,65$  HV)

### 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah:

1. Teliti dalam penentuan komposisi paduan karena perbedaan komposisi pada paduan Cu-Zn-Al akan membuat perubahan yang signifikan terhadap struktur mikro maupun sifat mekaniknya.
2. Menggunakan *furnace* dengan temperatur yang stabil dan vakum sehingga proses pengecoran tidak banyak dipengaruhi oleh lingkungan.
3. Selalu menggunakan alat pelindung diri saat melakukan proses dengan temperatur tinggi seperti pengecoran maupun perlakuan panas untuk menghindari kecelakaan saat penelitian berlangsung.
4. Membuat dan menggunakan paduan Cu-Zn-Al *single crystal* dengan metode pengecoran *bridgman* dibandingkan dengan Cu-Zn-Al *polycrystalline* yang didapat dari metode pengecoran konvensional sehingga sifat Cu-Zn-Al yang getas dapat diminimalisir.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Adiguzel, O. (2007). *Smart Materials and the Influence of Atom Sizes on Martensite Microstructures in Copper-based Shape Memory Alloys*. 185, 120–124. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.111>
- Adnyana, D. N. (1986). *Effects of Grain Size on Transformation Temperatures in a Grain Refined, Copper-Based, Shape-Memory Alloy*. 196(1985), 187–196.
- Alfarisa, S., Rifai, D. A., & Toruan, P. L. (2018). Studi Difraksi Sinar-X Struktur Nano Seng Oksida (ZnO). *Risalah Fisika*, 2(2), 53–57. <https://doi.org/10.35895/rf.v2i2.114>
- Asanovic, V. D., Delijic, K. H., Leka, Z. B., & Bosnjak, B. T. (2004). *The Effect of Heat Treatment on the Martensitic Transformation and Properties of Cu-Zn-Al Alloy*.
- Asanovic, V., Radonjic, D., Šcepanovic, J., & Vuksanovic, D. (2021). Effect of chemical composition and quenching media on recoverable strain in Cu-Zn-Al alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1368–1379. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.098>
- ASM International. (1991). *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating*. ASM International.
- ASM International. (1992a). *ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (Vol. 2). ASM International.
- ASM International. (1992b). *ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams*. ASM International.
- ASTM International. (2015). *Standard Terminology for Nickel-Titanium Shape Memory Alloys 1. 05*(Reapproved), 1–3. <https://doi.org/10.1520/F2005-05R15.2>
- Avner, S. H. (1974). *INTRODUCTION TO PHYSICAL Second Edition*. McGraw-Hill Book Company.
- Bagherpour, M., Shokouhfar, A., Zolriasatein, A., & Farzaneh Bahelgerdy, A. (2017). Effect of severe plastic deformation on shape memory and mechanical properties of nanostructured Cu-Zn-Al alloy. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 9(1). [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(1\).01008](https://doi.org/10.21272/jnep.9(1).01008)
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- Campbell, J. (2015). *Complete Casting Handbook Metal Casting Processes , Metallurgy , Techniques and Design Second Edition*. Butterworth-Heinemann.
- Chandrasekaran, M., Cesari, E., Wolska, J., Hurtado, I., Stalmans, R., & Dutkiewicz, J. (1995). Stabilisation of Martensite in Copper Based Shape Memory Alloys. *Le Journal de Physique IV, 05*(C2), C2-143-C2-152. <https://doi.org/10.1051/jp4:1995222>
- Chanmuang, C., Niyomsoan, S., & Chomsaeng, N. (2018). Effect of indium in Cu-Zn-Al shape memory alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 1082(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1082/1/012060>
- Cheng, X., Huang, F., Li, N., & Wu, X. (2008). Microstructure and shape memory effect of Cu-26.1Zn-4.8Al alloy. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 23(5), 717–719. <https://doi.org/10.1007/s11595-007-5717-7>
- Danko, Ć., & Franz, M. (2009). Properties of Thermally Treated CuZn27Al3 Shape Memory Alloy. *Journal of Mechanical Engineering*, 55, 623–632.
- Davis, J. R. (2001). *ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys*. ASM International.
- Duerig, T. W., Melton, K. N., Stockel, D., & Wayman, C. M. (1990). *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*. Butterworth-Heinemann.
- Francis, L. F. (2016). *Materials Processing: A Unified Approach to Processing of Metals, Ceramics, and Polymers*. Elsevier.
- Fremont, M., & Miyazaki, S. (1996). *Shape Memory Alloys*. Springer-Verlag Wien GmbH.

- Grand View Research. (2014). *Smart Materials Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Piezoelectric, Shape Memory Alloys, Electrostrictive, Magnetostrictive, Electrochromic), By Application, By Region, And Segment Forecasts*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-materials-market>
- Haque, M. M., & Ismail, A. F. (2008). *Effect of Cooling Rate on Strength and Fracture Surfaces of Alpha Brass Casting*. 37(260), 7–12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.33-37.7>
- Jung, B., Lee, H., & Park, H. (2013). International Journal of Solids and Structures Effect of grain size on the indentation hardness for polycrystalline materials by the modified strain gradient theory q. *International Journal of Solids and Structures*, 50(18), 2719–2724. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.05.002>
- Kostov, A., Milosavljević, A., Stanojević-Šimšić, Z., & Craciunescu, C. (2018). Characterization of copper-based shape memory alloy with zinc and aluminum. *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 1–2, 79–88. <https://doi.org/10.5937/mmeb1802079k>
- Kuhn, H., & Medlin, D. (2000). *ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International.
- Lagoudas, D. C. (2008). *Shape Memory Alloys: Modelling and Engineering Applications*. Springer New York LLC.
- Leu, S. S., & Hu, C. T. (1991). *The Aging Effect on Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys with Low Contents of Aluminum*.
- Lexcellent, C. (2013). *Shape-memory Alloys Handbook*. Wiley.
- Liu, H.-X. (2006). Science Press Influence of process factors on shape memory effect of CuZnAl alloys. In *Trans. Nonferrous Met. SOC. China* (Vol. 16). [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- Obradó, E., Mañ Osa, L., Planes, A., Romero, R., & Somoza, A. (1999). Quenching effects in Cu-Al-Mn shape memory alloy. In *Materials Science and Engineering*. [www.elsevier.com/locate/msea](http://www.elsevier.com/locate/msea)
- Otsuka, K., & Wayman, C. M. (1998). *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press.
- Setiabudi, A., Hardian, R., & Mudzakir, A. (n.d.). *Karakterisasi Material Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia*.
- Srinivasaiah, S., U.S., M., & Raju, T. N. (2014). Microstructure and Shape Memory Effect of Cu-Zn-Ni Shape Memory Alloys. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 02(02), 71–77. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2014.22011>
- Stefanescu, D. M. (1992). *ASM Handbook Volume 15: Casting*.
- Stošić, Z., Manasijević, D., Balanović, L., Holjevac-Grgurić, T., Stamenković, U., Premović, M., Minić, D., Gorgievski, M., & Todorović, R. (2017). Effects of composition and thermal treatment of Cu-Al-Zn alloys with low content of Al on their shape-memory properties. *Materials Research*, 20(5), 1425–1431. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0153>
- Whan, R. E. (1992). *ASM Handbook Volume 10: Materials Characterization*. ASM International.
- Wibisono, A. T., Devara, G., F, D. M., & Rochiem, R. (2020). *A study of microstructure and shape memory properties in Cu-Zn-Al by miscellaneous cooling medium during martensite formation A Study of Microstructure and Shape Memory Properties in Cu-Zn-Al by Miscellaneous Cooling Medium during Martensite Formation*. 040023.
- Widyastuti, Ardhyanta, H., Purwaningsih, H., & Quluq, R. M. (2019). *Karakterisasi Material Bagian I : Komposisi, Topografi, dan Sifat Mekanik*. ITS Press.
- Yamauchi, K., Ohkata, I., Tsuchiya, K., & Miyazaki, S. (2011). *Shape memory and superelastic alloys*. CRC Press.
- Yusuf, M. F., Ramadhani, M., Rochiem, R., Teknik, D., Teknologi, F., & Sistem, R. (2021).

Analisis Pengaruh Holding Time Proses Solution Treatment dan Artificial Aging terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Cu-Zn-Al Shape Memory Alloy. *Jurnal Teknik ITS*, X, 1–6.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN

### 1. Perhitungan Kebutuhan Massa Bahan

#### a. Komposisi Bahan

Bahan	Komposisi	
Tembaga murni (Cu)	1	Cu
Kuningan (CuZn)	0,59	Cu
	0,3775	Zn
Aluminium murni (Al)	1	Al

#### b. Target Komposisi Bahan

Target Komposisi Bahan		
Cu	Zn	Al
0,7721	0,159	0,0689

#### c. Densitas Bahan

Densitas Bahan (g/cm <sup>3</sup> )	
Cu	8,96
Zn	7,14
Al	2,7

#### d. Dimensi Cetakan

Dimensi Cetakan	
Panjang (mm)	329,96
Lebar (mm)	23,28
Tinggi (mm)	25,31
Volume (mm <sup>3</sup> )	194409,624
Volume (cm <sup>3</sup> )	194,410

#### e. Densitas

$$\begin{aligned} \text{Densitas rata-rata} &= \text{densitas Cu} \times \% \text{Cu} + \text{densitas Zn} \times \% \text{Zn} + \text{densitas Al} \times \% \text{Al} \\ &= 6,918 + 1,136 + 0,186 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$= 8,239 \text{ g/cm}^3$$

f. Massa Target

$$\begin{aligned} \text{Massa target} &= \text{densitas rata-rata} \times \text{volume} \\ &= 8,239 \text{ g/cm}^3 \times 194,410 \text{ cm}^3 \\ &= 1601,8 \text{ g} \end{aligned}$$

g. Massa Unsur

$$\text{Massa Cu} = \% \text{Cu} \times \text{massa target}$$

$$\text{Massa Zn} = \% \text{Zn} \times \text{massa target}$$

$$\text{Massa Al} = \% \text{Al} \times \text{massa target}$$

Sehingga:

Unsur	Massa Unsur (g)
Cu	1236,75
Zn	254,687
Al	110,364

h. Mass Balance

$$\text{Al balance : Alumunium murni} = 110,364 \text{ g}$$

$$\text{Zn balance : Kuningan} \times 0,3775 = 254,686 \text{ g}$$

$$\text{Cu balance : Tembaga murni} + \text{Kuningan} \times 0,59 = 1236,75 \text{ g}$$

Sehingga:

Massa Bahan Dibutuhkan (g)	
Tembaga murni	838,70
Kuningan	674,66
Alumunium Murni	110,364

i. Massa Total Bahan

$$\begin{aligned} \text{Massa total bahan} &= \text{Massa tembaga murni} + \text{massa kuningan} + \text{massa alumunium} \\ &\text{murni (g)} \\ &= 1623,73 \text{ g} \end{aligned}$$

j. Massa Pengotor

$$\begin{aligned} \text{Massa pengotor} &= \text{Massa total bahan} - \text{massa target (g)} \\ &= 21,927 \text{ g} \end{aligned}$$



2. Hasil Pengujian *Optical Emmision Spectroscopy*



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI**  
**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA**  
**UNIT LAYANAN BISNIS, JASA DAN PRODUKSI**  
*Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Sukolilo - Surabaya 60111*  
*TELP. (031) 5947186 - 5994444 FAX. (031) 5994444*  
Laman : [www.ppns.ac.id](http://www.ppns.ac.id)


---

**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**  
*REPORT ON THE TEST RESULT*

Nomor Number	: 044 /PL19/BJP/2022
-----------------	----------------------

<b>PELANGGAN / Customer</b>		
1. Nama Name	: Sdr. Ferdy - T. Material ITS	
2. Alamat Address	: Kampus ITS Sukolilo, Surabaya	
<b>BENDA UJI / Test Specimen</b>		
1. Tanggal Diterima Date of Received	: April 11, 2022	
2. Spesimen Uji Test Specimen	: CuZnAl Alloy	
3. Identifikasi Material Identification of Material	: -	
4. Proses Las /Posisi Las/Jura Las Weld Process/Position/Welder	: -	
5. Proyek Project	: -	
<b>PENGUJIAN / Testing</b>		
1. Tanggal Pengujian Date of Testing	: April 12, 2022	
2. Lokasi Pengujian Location of Testing	: Laboratorium Uji Bahan PPNS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya	
3. Jenis Pengujian Type of Testing	: Chemical Analysis	
4. Kondisi Lingkungan Environmental Condition	: Suhu 27°C	
5. Metode uji Test Method	: IK.LUB.008	
<b>ALAT / Equipment</b>		
1. Nama Name	: OES Foundry Master Pro	-
2. Tipe/Model Type/Model	: Foundry Master Pro	-
3. Kapasitas Capacity	: All Material / Global	-
4. Merek/Buatan Manufacturer	: Oxford, Germany	-
5. Nomor Seri Serial Number	: 44P0070	-
6. Nilai Ketidakpastian Number of uncertainty	: -	-
7. Ketertelusuran Traceability	: LK-022-IDN	-
<b>HASIL PENGUJIAN /</b> Result of Testing	: (Terlampir) (Attached)	
<b>DITERBITKAN TANGGAL /</b> Date of Issue	: April 12, 2022	

Kalab. Uji Bahan  
Head of DT & MT Laboratory



Hendri Budi Kurniyanto, SSi, MT  
NIP. 199003072019031019

*Keterangan / Notes:*

1. Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS  
It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS
2. Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk material yang diujikan dalam pengujian ini  
This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above

Halaman  
1 dari 2

LAPORAN TUGAS AKHIR  
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI  
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA  
UNIT LAYANAN BISNIS, JASA DAN PRODUKSI  
Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Sukolilo - Surabaya 60111  
TELP. (031) 5947186 - 5994444 FAX. (031) 5994444  
Laman : www.ppns.ac.id

LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN  
ATTACHMENT OF THE TEST RESULT

Nomor  
Number : 0441 /PL19/BJP/2022

No. SPK. 14-IV/PL19/BJP/2022

F.08-LUB-PPNS

CHEMICAL COMPOSITION TEST									
Identification	COMPOSITION (%)								
	Element	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
	Value	74.2	15.9	2.02	0.318	0.0041	<0.0002	0.224	0.130
	Element	Si	Mg	Cr	Al	S	As	Ag	Co
	Value	0.0052	<0.0005	0.0017	6.89	0.0011	0.0113	0.0004	0.0103
	Element	Co	Bi	Cd	Sb	Zr	B	Se	Te
	Value	0.0076	0.0185	0.0045	0.0593	0.0011	<0.0001	<0.0001	0.108
	Element	Tl	C	Nb	-	-	-	-	-
	Value	<0.0001	<0.0001	0.0070	-	-	-	-	-

Surabaya, April 12, 2022.

Examined by,	Verified by,
MUHARROR	Hendri Budi K.

Keterangan / Notes :

- Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS  
It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS
- Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk material yang disajikan dalam pengujian ini  
This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above

Halaman  
2 dari 2



**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA  
LABORATORIUM UJI BAHAN**

**OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY RESULT**

No. SPK : 14-IV/PL19/BJP/2022 Penandaan : -  
Pelanggan : Sdr. Ferdy - T. Material ITS Material : CuZnAl alloy  
Proyek : - Dimensi : 20x25x33mm  
Kepala Lab. : Hendri Budi K., S.ST., M.T. Heat No. : -  
Program : CU\_000 Keterangan : -

	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
1	74.2	15.9	1.95	0.375	0.0051	< 0.0002	0.222	0.134
2	74.1	16.0	2.03	0.283	0.0049	< 0.0002	0.231	0.127
3	74.2	15.8	2.08	0.296	0.0022	< 0.0002	0.218	0.129
Ave	74.2	15.9	2.02	0.318	0.0041	< 0.0002	0.224	0.130
	Si	Mg	Cr	Al	S	As	Be	Ag
1	0.0025	< 0.0005	0.0013	6.88	0.0011	0.0135	0.0003	0.0102
2	0.0062	< 0.0005	0.0017	6.88	0.0009	0.0122	0.0006	0.0104
3	0.0069	< 0.0005	0.0022	6.92	0.0013	0.0082	0.0004	0.0104
Ave	0.0052	< 0.0005	0.0017	6.89	0.0011	0.0113	0.0004	0.0103
	Co	Bi	Cd	Sb	Zr	B	Se	Te
1	0.0085	0.0206	0.0042	0.0543	0.0012	< 0.0001	< 0.0001	0.121
2	0.0069	0.0180	0.0050	0.0687	0.0012	< 0.0001	< 0.0001	0.125
3	0.0074	0.0168	0.0042	0.0550	0.0010	< 0.0001	< 0.0001	0.0776
Ave	0.0076	0.0185	0.0045	0.0593	0.0011	< 0.0001	< 0.0001	0.108
	Ti	C	Nb					
1	< 0.0001	< 0.0001	0.0035					
2	< 0.0001	< 0.0001	0.0136					
3	< 0.0001	< 0.0001	0.0038					
Ave	< 0.0001	< 0.0001	0.0070					




Surabaya, 4/12/2022

Diuji oleh: Muharror






Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo Surabaya (Indonesia)  
Tel. : +62 31 5999444 Fax: +62 31 5999444

3. *Pattern List* Hasil Pengujian X-Ray Diffraction

Spesimen	<i>Pattern List</i>																									
As Cast	 <p>The screenshot shows the 'Pattern List' window for the 'As Cast' sample. It features a search bar with 'Accepted Ref. Pattern: 00-002-123'. Below is a table with columns: No., Visible, Ref. Code, Compound Name, and Chemical Formula. The table lists four entries:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Visible</th> <th>Ref. Code</th> <th>Compound Name</th> <th>Chemical Formula</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu Zn</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>5</sub> Zn<sub>8</sub></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>0.64</sub> Zn<sub>0.36</sub></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Aluminum Copper</td> <td>Cu<sub>9</sub> Al<sub>4</sub></td> </tr> </tbody> </table>	No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn	2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>	3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula																						
1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn																						
2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>																						
3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>																						
4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>																						
UQ10	 <p>The screenshot shows the 'Pattern List' window for the 'UQ10' sample. It features a search bar with 'Accepted Ref. Pattern: 00-050-133'. Below is a table with columns: No., Visible, Ref. Code, Compound Name, and Chemical Formula. The table lists four entries:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Visible</th> <th>Ref. Code</th> <th>Compound Name</th> <th>Chemical Formula</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>0.64</sub> Zn<sub>0.36</sub></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu Zn</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>5</sub> Zn<sub>8</sub></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Aluminum Copper</td> <td>Cu<sub>9</sub> Al<sub>4</sub></td> </tr> </tbody> </table>	No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn	3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula																						
1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>																						
2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn																						
3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>																						
4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>																						
UQ30	 <p>The screenshot shows the 'Pattern List' window for the 'UQ30' sample. It features a search bar with 'Accepted Ref. Pattern: 00-050-133'. Below is a table with columns: No., Visible, Ref. Code, Compound Name, and Chemical Formula. The table lists four entries:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Visible</th> <th>Ref. Code</th> <th>Compound Name</th> <th>Chemical Formula</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>0.64</sub> Zn<sub>0.36</sub></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu Zn</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>5</sub> Zn<sub>8</sub></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Aluminum Copper</td> <td>Cu<sub>9</sub> Al<sub>4</sub></td> </tr> </tbody> </table>	No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn	3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula																						
1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>																						
2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn																						
3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>																						
4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>																						



UQ50	 <p>Pattern List   Scan List   Peak List   Anchor Scan Data</p> <p>Accepted Ref. Pattern: 00-050-133:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Visible</th> <th>Ref. Code</th> <th>Compound Name</th> <th>Chemical Formula</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>0.64</sub> Zn<sub>0.36</sub></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu Zn</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>5</sub> Zn<sub>8</sub></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Aluminum Copper</td> <td>Cu<sub>9</sub> Al<sub>4</sub></td> </tr> </tbody> </table>	No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn	3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula																						
1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>																						
2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn																						
3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>																						
4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>																						
SQ10	 <p>Pattern List   Scan List   Peak List   Anchor Scan Data</p> <p>Accepted Ref. Pattern: 00-050-133:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Visible</th> <th>Ref. Code</th> <th>Compound Name</th> <th>Chemical Formula</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>0.64</sub> Zn<sub>0.36</sub></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu Zn</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>5</sub> Zn<sub>8</sub></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Aluminum Copper</td> <td>Cu<sub>9</sub> Al<sub>4</sub></td> </tr> </tbody> </table>	No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn	3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula																						
1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>																						
2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn																						
3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>																						
4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>																						
SQ30	 <p>Pattern List   Scan List   Peak List   Anchor Scan Data</p> <p>Accepted Ref. Pattern: 00-050-133:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Visible</th> <th>Ref. Code</th> <th>Compound Name</th> <th>Chemical Formula</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>0.64</sub> Zn<sub>0.36</sub></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu Zn</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Copper Zinc</td> <td>Cu<sub>5</sub> Zn<sub>8</sub></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>ICDD 00-...</td> <td>Aluminum Copper</td> <td>Cu<sub>9</sub> Al<sub>4</sub></td> </tr> </tbody> </table>	No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn	3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>	4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula																						
1	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>																						
2	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu Zn																						
3	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>																						
4	<input checked="" type="checkbox"/>	ICDD 00-...	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>																						

SQ50

Pattern List		Scan List		Peak List		Anchor Scan Data	
Accepted Ref. Pattern: 00-050-1333							
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula			
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub>			
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu Zn			
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>			
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Aluminum Copper	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>			

#### 4. PDF Card Fasa

##### a. $\alpha$ (Cu<sub>0,64</sub>Zn<sub>0,36</sub>)

##### Name and formula

Reference code:	00-050-1333
Compound name:	Copper Zinc
Common name:	a-brass
PDF index name:	Copper Zinc
Empirical formula:	Cu <sub>0,64</sub> Zn <sub>0,36</sub>
Chemical formula:	Cu <sub>0,64</sub> Zn <sub>0,36</sub>

##### Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225
a (Å):	3,6961
b (Å):	3,6961
c (Å):	3,6961
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	90,0000
Calculated density (g/cm <sup>3</sup> ):	8,44
Measured density (g/cm <sup>3</sup> ):	8,43
Volume of cell (10 <sup>6</sup> pm <sup>3</sup> ):	50,49
Z:	4,00

### Subfiles and Quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Inorganic  
Quality: Star (S)

### Comments

Creation Date: 01/01/1970  
Modification Date: 01/01/1970  
Sample Preparation: Commercially available Cu<sub>64</sub>-Zn<sub>36</sub> was abraded to produce powder, then milled and annealed under nitrogen at 300 C for 2 hours  
Analysis: Chemical analysis (wt.%): Cu 63.44, Zn 36.45.

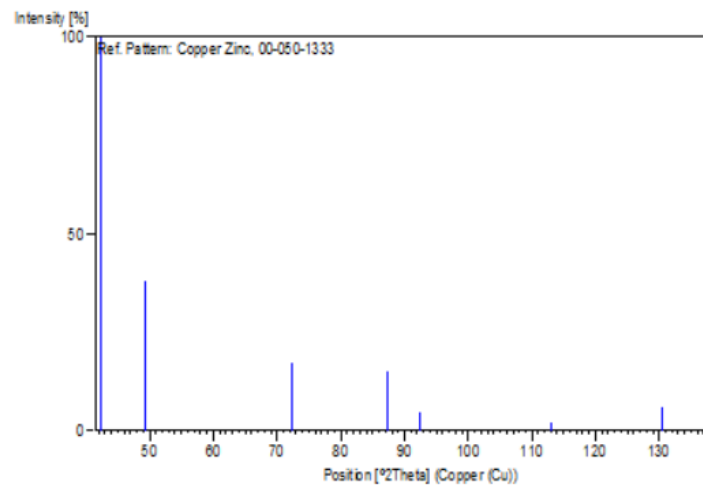
### References

Primary reference: Voncken, J., Verkroost, Th., *Powder Diffraction*, **12**, 228, (1997)

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	2,13371	42,325	100,0
2	2	0	0	1,84779	49,275	38,0
3	2	2	0	1,30667	72,245	17,0
4	3	1	1	1,11439	87,455	15,0
5	2	2	2	1,06703	92,425	5,0
6	4	0	0	0,92391	112,970	2,0
7	3	3	1	0,84804	130,550	6,0
8	4	2	0	0,82657	137,475	6,0

### Stick Pattern



b.  $\beta$  (CuZn)

---

### Name and formula

Reference code: 00-002-1231

Mineral name: Zhanghengite, syn  
Compound name: Copper Zinc  
Common name: b-brass  
PDF index name: Copper Zinc

Empirical formula: CuZn  
Chemical formula: CuZn

### Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic  
Space group: Pm-3m  
Space group number: 221

a (Å): 2,9480  
b (Å): 2,9480  
c (Å): 2,9480  
Alpha (°): 90,0000  
Beta (°): 90,0000  
Gamma (°): 90,0000

Volume of cell (10<sup>6</sup> pm<sup>3</sup>): 25,62  
Z: 1,00

### Subfiles and Quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Common Phase  
Inorganic  
Mineral

Quality: Indexed (I)

### Comments

Color: Yellow  
Creation Date: 01/01/1970  
Modification Date: 01/01/1970  
D-values corrected for absorption. \$GB' phase, ordered (PI). Additional Patterns: See also 8-349  
Color: Yellow  
Analysis: Analysis (wt.%): Cu 51.0, Zn 49.0.

### References

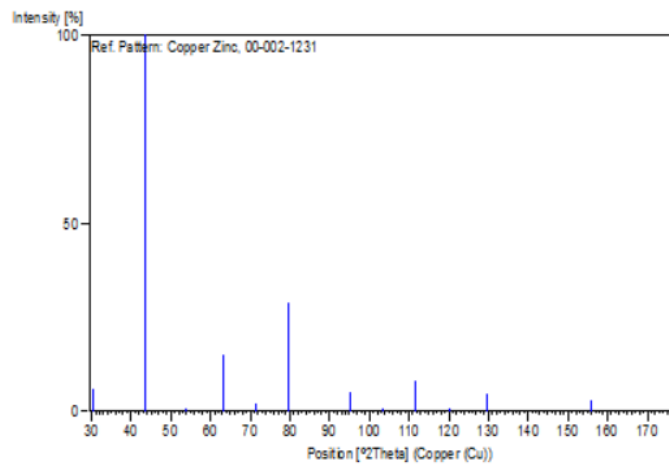
Primary reference: Nowotny, Winkels., *Z. Phys.*, **114**, 457, (1939)



### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	0	0	2,95000	30,273	6,0
2	1	1	0	2,08000	43,473	100,0
3	1	1	1	1,70200	53,819	1,0
4	2	0	0	1,47400	63,013	15,0
5	2	1	0	1,31900	71,465	2,0
6	2	1	1	1,20300	79,631	29,0
7	2	2	0	1,04200	95,335	5,0
8	3	0	0	0,98300	103,187	1,0
9	3	1	0	0,93200	111,482	8,0
10	3	1	1	0,88900	120,104	1,0
11	2	2	2	0,85100	129,692	5,0
12	3	2	1	0,78800	155,666	3,0
13	4	0	0	0,73800		4,0

### Stick Pattern



c.  $\gamma$  ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ )

#### Name and formula

Reference code:	00-025-1228
Compound name:	Copper Zinc
PDF index name:	Copper Zinc
Empirical formula:	$\text{Cu}_5\text{Zn}_8$
Chemical formula:	$\text{Cu}_5\text{Zn}_8$

#### Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	I-43m
Space group number:	217
a (Å):	8,8600
b (Å):	8,8600
c (Å):	8,8600
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	90,0000
Calculated density (g/cm <sup>3</sup> ):	8,03
Volume of cell (10 <sup>6</sup> pm <sup>3</sup> ):	695,51
Z:	4,00

### Subfiles and Quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
Common Phase  
Inorganic  
Quality: Calculated (C)

### Comments

Creation Date: 01/01/1970  
Modification Date: 01/01/1970

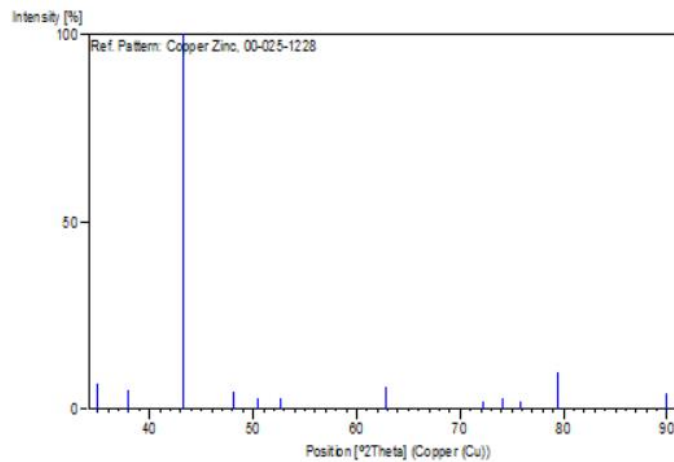
### References

Primary reference: Smith et al., Penn State University, University Park, Pennsylvania, USA., *ICDD Grant-in-Aid*, (1973)  
Unit cell: Bradley, Gregory., *Philos. Mag. A.*, **12**, 143, (1931)

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	2	2	2	2,55800	35,051	7,0
2	3	2	1	2,36800	37,967	5,0
3	3	3	0	2,08800	43,298	100,0
4	3	3	2	1,88900	48,131	5,0
5	4	2	2	1,80850	50,419	3,0
6	5	1	0	1,73760	52,631	3,0
7	6	0	0	1,47670	62,884	6,0
8	6	3	1	1,30630	72,269	2,0
9	4	4	4	1,27880	74,078	3,0
10	5	5	0	1,25300	75,870	2,0
11	7	2	1	1,20570	79,417	10,0
12	7	4	1	1,09060	89,871	4,0

### Stick Pattern



d.  $\gamma_2$  (Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>)

---

### **Name and formula**

Reference code:	00-024-0003
Compound name:	Aluminum Copper
PDF index name:	Aluminum Copper
Empirical formula:	Al <sub>4</sub> Cu <sub>9</sub>
Chemical formula:	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>

### **Crystallographic parameters**

Crystal system:	Cubic
Space group:	P-43m
Space group number:	215
a (Å):	8,7027
b (Å):	8,7027
c (Å):	8,7027
Alpha (°):	90,0000
Beta (°):	90,0000
Gamma (°):	90,0000

Calculated density (g/cm <sup>3</sup> ):	6,85
Volume of cell (10 <sup>6</sup> pm <sup>3</sup> ):	659,12
Z:	4,00

### **Subfiles and Quality**

Subfiles:	Alloy, metal or intermetallic Inorganic NBS pattern
Quality:	Calculated (C)

### **Comments**

Creation Date:	01/01/1970
Modification Date:	01/01/1970
Additional Patterns:	See ICSD 1625 (PDF 71-307).

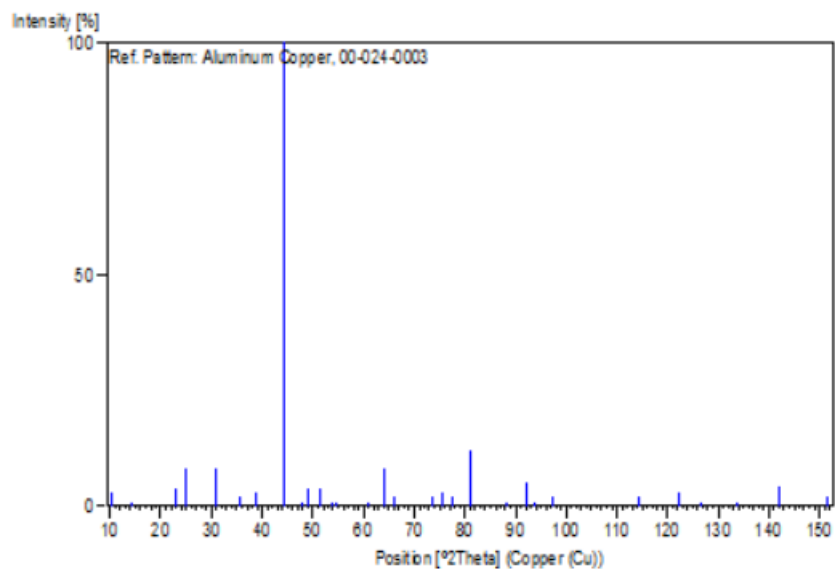
### **References**

Primary reference:	<i>Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 11, 79, (1973)</i>
Unit cell:	Heidenstam et al., <i>Acta Chem. Scand.</i> , <b>22</b> , 653, (1968)

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	8,69881	10,161	3,0
2	1	1	0	6,15412	14,381	1,0
3	2	1	0	3,89030	22,841	4,0
4	2	1	1	3,55330	25,040	8,0
5	3	0	0	2,90060	30,801	8,0
6	2	2	2	2,51160	35,721	2,0
7	3	2	1	2,32590	38,681	3,0
8	3	3	0	2,05090	44,122	100,0
9	4	2	1	1,89900	47,862	1,0
10	3	3	2	1,85530	49,062	4,0
11	4	2	2	1,77620	51,402	4,0
12	5	1	0	1,70660	53,663	1,0
13	5	1	1	1,67490	54,762	1,0
14	4	4	1	1,51500	61,121	1,0
15	6	0	0	1,45030	64,164	8,0
16	6	1	1	1,41160	66,144	2,0
17	6	3	1	1,28320	73,782	2,0
18	4	4	4	1,25620	75,642	3,0
19	5	5	0	1,23060	77,505	2,0
20	7	2	1	1,18440	81,139	12,0
21	6	5	1	1,10530	88,360	1,0
22	7	4	1	1,07120	91,960	5,0
23	8	2	0	1,05530	93,762	1,0
24	6	6	0	1,02560	97,367	2,0
25	9	3	0	0,91730	114,227	2,0
26	7	7	0	0,87910	122,383	3,0
27	10	1	1	0,86170	126,743	1,0
28	10	2	2	0,83740	133,814	1,0
29	8	7	1	0,81510	141,831	4,0
30	10	4	2	0,79440	151,702	2,0





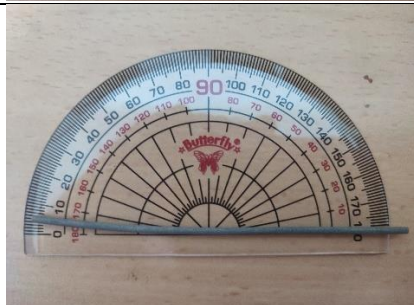
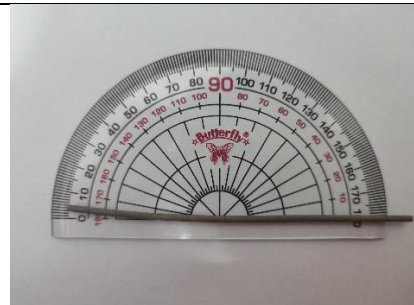
### Stick Pattern



5. Hasil Pengujian Kekerasan Spesimen


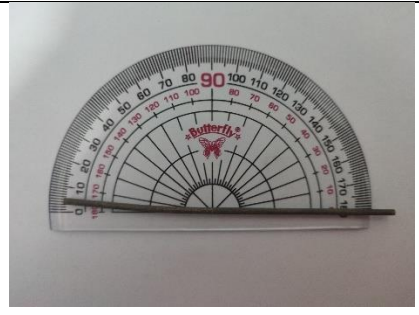



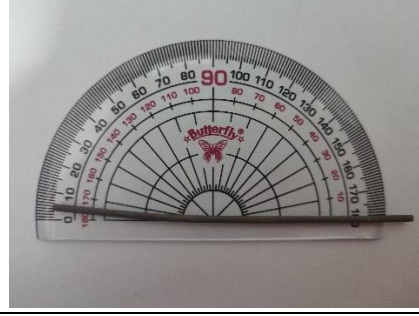
Spesimen	Angka Kekerasan (HV)				
	Indestasi 1	Indentasi 2	Indentasi 3	Rata-Rata	Standar Deviasi
As Cast	293	290	289	290,67	2,08
UQ10	259	257	263	259,67	3,06
UQ30	251	248	252	250,33	2,08
UQ50	239	238	243	240,00	2,65
SQ10	273	275	278	275,33	2,52
SQ30	263	267	264	264,67	2,08
SQ50	253	256	251	253,33	2,52

6. Hasil Pengujian *Shape Memory Effect* Spesimen

Spesimen	Sudut		Gambar		Recovery (%)
	$\Theta_0$ (°)	$\Theta_1$ (°)	Sebelum	Sesudah	
UQ10	5	5			0
UQ30	5	5			0
UQ50	5	5			0



LAPORAN TUGAS AKHIR  
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

SQ10	5	5			0
SQ30	5	5			0
SQ50	5	5			0

7. Perhitungan Konversi wt% ke at% Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al

Massa Atom (Ar)		Fraksi Massa (wt%)	
Cu	63,546	Cu	77,31
Zn	65,38	Zn	15,9
Al	26,981	Al	6,89

$$at\%Total = \frac{wt\%Cu}{ArCu} + \frac{wt\%Zn}{ArZn} + \frac{wt\%Al}{ArAl}$$

$$at\%Total = \frac{77,31}{63,546} + \frac{15,9}{65,38} + \frac{6,89}{26,981} = 1,715$$

$$at\%Zn = \frac{\frac{wt\%Zn}{ArZn}}{at\%Total} \times 100 = \frac{\frac{15,9}{65,38}}{1,715} \times 100 = 14,18\%$$

$$at\%Al = \frac{\frac{wt\%Al}{ArAl}}{at\%Total} \times 100 = \frac{\frac{6,89}{26,981}}{1,715} \times 100 = 14,89\%$$

8. Perhitungan Persamaan 2.1

$$M_s(C) = 2212 - 66,9(at\%Zn) - 90,65(at\%Al)$$

$$M_s(C) = 2212 - 66,9(14,18) - 90,65(14,89)$$

$$M_s(C) = -81,975^{\circ}C$$

9. Perhitungan Persamaan 2.2

$$M_s(C) = 2212 - 66,9[1,355(at\%Al) + (at\%Zn)]$$

$$M_s(C) = 2212 - 66,9[1,355(14,89) + (14,18)]$$

$$M_s(C) = -81,9675^{\circ}C$$

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan laporan penelitian Tugas Akhir ini, banyak bantuan, saran, maupun dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam terselesaikannya laporan penelitian Tugas Akhir, diantaranya:

1. Kedua orang tua serta kakak penulis yang selalu mendoakan, memberi motivasi maupun semangat dalam pengerjaan penelitian Tugas Akhir ini.
2. Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing pertama atas ilmu, kesabaran, dan arahan yang beliau terus berikan selama keberjalanannya Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing kedua atas ilmu, kesabaran, dan arahan yang beliau terus berikan selama keberjalanannya Tugas Akhir ini.
4. Ibu Dian Mughni Felicia, S.T., M.Sc., selaku dosen wali yang telah membimbing dan memberikan banyak saran baik secara akademik maupun non akademik.
5. Seluruh dosen Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama proses perkuliahan.
6. Pak Asman, Pak Chanan, dan seluruh Tenaga Pendidik Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS yang telah menyediakan tempat dan memberikan banyak saran kepada penulis selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
7. Rifqi Nafis selaku *partner* penulis selama pengerjaan Tugas Akhir yang telah menemani penulis dan saling membantu sehingga penelitian Tugas Akhir dapat terselesaikan.
8. Pasukan Fundichionco (Nafis, Marzuki, Zain, Denby, Ferdy, Ezra, dan Riza) yang telah berusaha dan berjuang bersama penulis baik senang maupun susah saat proses pengerjaan Tugas Akhir.
9. Pasukan Koncor (Fernanda, Gading, Sabam, Farhan, dan Didik) yang memberikan banyak ilmu dan pengalaman sehingga penelitian Tugas Akhir menjadi lancar.
10. Aisyah Aulia Zahradini yang selalu menemani penulis dikala senang maupun susah, memberikan semangat dan dukungan terhadap segala yang penulis lakukan, dan menjadi teman cerita terbaik untuk penulis.
11. Tim Tridiku (Mas Faisal, Mas Patrick, Mas Girsang, Mori, Delta, Rafi) yang telah menerima sepenuh hati, menyediakan tempat bagi penulis untuk berkembang, serta memberikan banyak pengalaman baik secara profesional maupun personal untuk penulis.
12. EDM Dental Practice (Mas Andri) yang telah memberikan banyak pengalaman serta saran dalam dunia kerja kepada penulis.
13. Pink Dragon (Nafis, Marzuki, Zain, Riza, Salam, Byan, Azhim, Ara, Adel, Bagus, Farid, dan Madan) sebagai teman yang telah menemani selama perkuliahan penulis.
14. Semua pihak yang telah berkontribusi dalam proses pengerjaan Tugas Akhir yang tidak bisa penulis ucapkan satu persatu.

---

Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi semua pembaca maupun yang membutuhkannya.

Surabaya, 10 Juli 2022

Penulis

Taufiq Ramadhan

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Jakarta pada tanggal 24 Desember 2000 sebagai anak keempat dari empat bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal mulai dari SD Islam Harapan Ibu di tahun 2006 hingga 2012. Melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 19 Jakarta pada tahun 2012 hingga 2015 dan SMA Negeri 29 Jakarta pada tahun 2015 hingga 2018. Selulus SMA, penulis melanjutkan pendidikan S-1 di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS. Selama keberjalanan kegiatan perkuliahan penulis pernah mengikuti pelatiba berupa PKTI, LKMM, BMS, dan LKMW. Aktif berorganisasi sebagai staff media dan informasi ITS Material Advantage Student Chapter (IMAC) kepengurusan 2019/2020, staff kewirausahaan Ashaabul Kahfi kepengurusan 2019/2020, Intern Tridiku 3D Print Surabaya di tahun 2019, *marketing manager* Tridiku 3D Print Surabaya dari tahun 2020 hingga saat ini, dan staff *design & production* di EDM Dental

Practice dari tahun 2021 hingga saat ini. Penulis juga memiliki pengalaman sebagai finalis MME NE UI 2019, Juara 2 ICON ISE 2020, Finalis *Shell LiveWIRE* 2020, Juara 1 dalam *Social Media Competition Shell LiveWIRE* 2020, Juara 3 *Innovation Challenge 2020* ICBS IKA ITS, dan menjadi start up terdantai pada program pendanaan CPPBT Kemenristek-BRIN yang membawa Tridiku Argonaut. Untuk menyelesaikan pendidikan S1, penulis melakukan penelitian dalam bidang studi Metalurgi Manufaktur dengan judul Tugas Akhir “Pengaruh Variasi  *Holding Time* dan Metode  *Up/Step Quenching* pada  *Solution Treatment* terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Cu-15,9Zn-6,89 Alloy”. Penulis dapat dihubungi melalui kontak seluler di 085888703893 dan email pribadi penulis di [taufikr101@gmail.com](mailto:taufikr101@gmail.com).

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*