

**TUGAS AKHIR – TL184834**

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME UP-QUENCHING* DAN *ARTIFICIAL AGING* PADA CU-16,8ZN-6,99AL ALLOY TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

**RIZA MUHAMMAD ALIFANDI**  
NRP. 02511840000035

Dosen Pembimbing  
**DIAN MUGHNI FELLICIA, S.T., M.Sc.**  
NIP. 198405152014042003  
**MAVINDRA RAMADHANI, S.T., M.T.**  
NIP. 198805012019031008

**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 UP-QUENCHING* DAN *ARTIFICIAL AGING* PADA CU-16,8ZN-6,99AL ALLOY TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

**RIZA MUHAMMAD ALIFANDI**  
NRP. 02511840000035

Dosen Pembimbing  
**Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.**  
NIP. 198405152014042003  
**Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.**  
NIP. 198805012019031008

**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 HOLDING TIME UP-  
QUENCHING VARIATIONS AND ARTIFICIAL AGING IN CU-  
16,8ZN-6,99AL ALLOYS ON MICROSTRUCTURE AND  
HARDNESS**

**RIZA MUHAMMAD ALIFANDI**  
NRP. 02511840000035

Advisor

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

NIP. 198405152014042003

**Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.**

NIP. 198805012019031008

**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

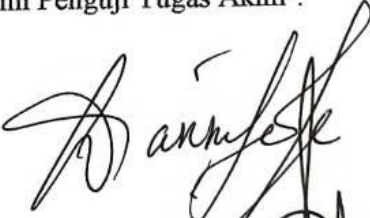



### ANALISIS PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME UP-QUENCHING* DAN *ARTIFICIAL AGING* PADA *CU-16,8ZN-6,99AL ALLOY* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN

#### 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 : **RIZA MUHAMMAD ALIFANDI**  
NRP. 0251184000035

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.  Pembimbing
2. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.  Ko-Pembimbing
3. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA  Penguji
4. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.  Penguji



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## APPROVAL SHEET

### ANALYSIS OF THE EFFECT OF HOLDING TIME UP-QUENCHING VARIATIONS AND ARTIFICIAL AGING IN CU-16,8ZN-6,99AL ALLOYS ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS

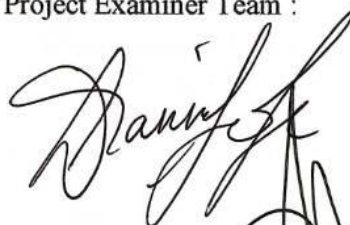
#### FINAL PROJECT

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 : **RIZA MUHAMMAD ALIFANDI**  
NRP. 0251184000035

Approved by Final Project Examiner Team :

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



Advisor

2. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.



Co-Advisor

3. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA



Examiner

4. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.



Examiner



*(This page is intentionally blank)*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

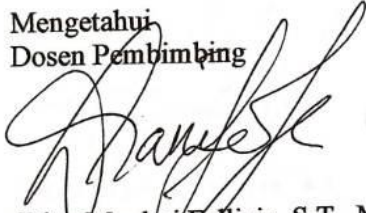
Nama mahasiswa/NRP : Riza Muhammad Alifandi / 02511840000035  
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi  
Dosen Pembimbing/NIP : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. /  
198405152014042003

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi  *Holding Time Up-Quenching*  dan  *Artificial Aging*  pada  *Cu-16,8Zn-6,99Al Alloy*  Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

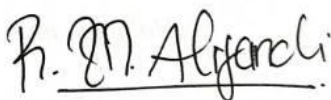
Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 14 Juli 2022

Mengetahui  
Dosen Pembimbing

  
(Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.)  
NIP. 198405152014042003

Mahasiswa

  
(Riza Muhammad Alifandi)  
NRP. 02511840000035

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

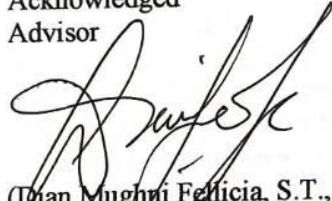
Name of student/NRP : Riza Muhammad Alifandi / 0251184000035  
Departement : Materials and Metallurgical Engineering  
Advisor/NIP : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. /  
198405152014042003

Hereby declare that the Final Project with the title of "Analysis The Effect of Holding Time Up-Quenching Variations and Artificial Aging in Cu-16,8Zn-6,99Al Alloy on Microstructure and Hardness" 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.

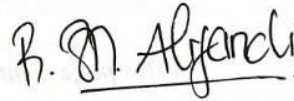
Surabaya, Juli 14<sup>th</sup> 2022

Acknowledged  
Advisor



(Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.)  
NIP. 198405152014042003

Student



(Riza Muhammad Alifandi)  
NRP. 0251184000035

*(This page is intentionally blank)*

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME UP-QUENCHING* DAN  
*ARTIFICIAL AGING* PADA CU-16,8ZN-6,99AL ALLOY TERHADAP STRUKTUR  
MIKRO DAN KEKERASAN**

**Nama Mahasiswa / NRP** : Riza Muhammad Alifandi / 0251184000035  
**Departemen** : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.  
**Dosen Ko-Pembimbing** : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

**Abstrak**

Material paduan yang terus mengalami perkembangan adalah paduan Cu-Zn-Al karena dianggap sebagai jenis material pintar yang umumnya disebut *shape memory alloys*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi *holding time up-quenching solution treatment* dan proses *artificial aging* paduan Cu-16,8Zn-6,99Al terhadap struktur mikro dan kekerasannya. Paduan Cu-16,8Zn-6,99Al dalam penelitian ini diperoleh melalui proses pengecoran yang kemudian diberikan perlakuan panas *homogenizing, annealing, solution treatment* dengan *up-quenching* variasi *holding time* 15 menit, 20 menit, dan 25 menit dengan media pendingin oli pada temperatur 100 °C dan *artificial aging* pada temperatur 200°C dengan *holding time* selama 2 jam. Dari hasil pengujian, struktur mikro yang terbentuk adalah  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  tanpa adanya fasa  $\beta'$  atau martensit yang ditemukan pada keseluruhan spesimen *solution treatment* dan *artificial aging*. Tidak terbentuknya  $\beta'$  atau martensit pada spesimen dikarenakan temperatur transformasi *martensite start* di bawah 0°C. Nilai kekerasan tertinggi pada spesimen *solution treatment* terdapat pada spesimen UQ15 sebesar  $280,67 \pm 0,57$  VHN dengan ukuran butir sebesar 121,152  $\mu\text{m}$ . Besar butir yang dihasilkan juga memiliki ukuran yang berbeda-beda antar spesimen. Semakin lama waktu tahan pada proses *solution treatment* semakin besar pula ukuran butir yang akan dihasilkan. Seiring meningkatnya ukuran butir akan mengurangi nilai kekerasan. Nilai kekerasan terkecil pada spesimen *solution treatment* terdapat pada spesimen UQ25 sebesar  $266 \pm 1$  VHN dengan ukuran butir sebesar 140,493  $\mu\text{m}$ . Untuk nilai kekerasan tertinggi dimiliki oleh spesimen *artificial aging* terdapat pada spesimen UQ15A sebesar  $305,67 \pm 0,57$  VHN. Adanya proses *artificial aging* berakibat pada terbentuknya presipitat  $\gamma$  pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. Presipitat inilah yang membuat kekerasan paduan semakin meningkat selaras dengan bertambahnya temperatur *artificial aging*.

**Kata Kunci:** *Cu-Zn-Al, Solution Treatment, Up-Quenching, Artificial Aging, Struktur Mikro, Kekerasan.*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# ANALYSIS OF THE EFFECT OF HOLDING TIME UP-QUENCHING VARIATIONS AND ARTIFICIAL AGING IN CU-16,8ZN-6,99AL ALLOYS ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS

**Student Name / NRP** : Riza Muhammad Alifandi / 0251184000035  
**Departement** : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
**Advisor** : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.  
**Co-Advisor** : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

## Abstract

The material alloy that continues to develop is Cu-Zn-Al alloy, considered a type of smart material called shape memory alloy. This study aims to analyze the variation in holding time up-quenching solution treatment and artificial aging process of Cu-16,8Zn-6,99Al alloy on microstructure and hardness. The Cu-16,8Zn-6,99Al alloy in this study was made by casting method and heat treated by homogenizing, annealing, solution treatment with up-quenching variations of holding time about 15 minutes, 20 minutes, and 25 minutes on the oil-bath cooling media at 100°C and artificial aging process at 200°C for 2 hours. From the test results, the microstructures formed are  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$  for solution treatment and artificial aging specimens. The  $\beta'$  martensite phase does not appear because the theoretical martensite start temperature is below 0°C. The highest hardness value in the solution treatment specimen was found in UQ15 specimen, with the hardness and grain size value about  $280,67 \pm 0,57$  VHN and  $121,152 \mu\text{m}$ . The grain size value also has some different value from another specimen. The grain size change is because the longer the holding time applied in the solution treatment process, the larger grain size will be produced. As the grain size increases, the hardness value will decrease. The smallest hardness value in solution treatment specimen was found in UQ25, with the hardness and grain size value about  $266 \pm 1$  VHN and  $140,493 \mu\text{m}$ . The highest hardness value in the artificial aging specimen was found in UQ15A specimen, with the hardness value about  $305,67 \pm 0,57$  VHN. The existence of an artificial aging process causes  $\gamma$  precipitates in the Cu-16,8Zn-6,99Al alloy. These precipitates make the hardness value increase with increasing artificial aging temperature.

**Keywords:** *Cu-Zn-Al, Solution Treatment, Up-Quenching, Artificial Aging, Microstructure, Hardness.*

*(This page is intentionally blank)*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Analisis Pengaruh Variasi  *Holding Time Up-Quenching dan Artificial Aging pada Cu-16,8Zn-6,99Al Alloy terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan***”. Penyusunan tugas akhir ini bertujuan untuk memenuhi mata kuliah tugas akhir Departemen Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS-ITS.

Tanpa bantuan serta dukungan dari berbagai pihak, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan tugas akhir ini, di antaranya:

1. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. dan Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis selama proses pengerjaan laporan tugas akhir serta selama proses penelitian berlangsung.
2. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., P.hD. selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS-ITS.
3. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS-ITS yang telah memberikan ilmu selama masa perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, FTIRS-ITS.

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, 14 Juli 2022  
Penulis

Riza Muhammad Alifandi

*(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.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Paduan Cu-Zn-Al.....	3
2.2 Diagram Fasa Cu-Zn-Al .....	4
2.3 Perlakuan Panas .....	6
2.3.1 <i>Homogenizing</i> .....	6
2.3.2 <i>Annealing</i> .....	7
2.3.3 <i>Aging</i> .....	7
2.4 Up Quenching.....	8
2.5 <i>Shape Memory Alloy</i> .....	8
2.5.1 Transformasi Fasa pada <i>Shape Memory Alloys</i> .....	9
2.6 Pengujian .....	11
2.6.1 <i>Optical Emission Spectrometry (OES)</i> .....	12
2.6.2 Pengujian Struktur Mikro .....	12
2.6.3 Pengujian <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	12
2.6.4 Pengujian Kekerasan .....	14
2.6.5 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry (DSC)</i> .....	14
2.7 Penelitian Sebelumnya .....	15
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>21</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	21
3.2 Alat Penelitian .....	22
3.3 Alat Pengujian .....	23
3.4 Bahan Penelitian .....	23
3.5 Kurva Perlakuan Panas .....	23
3.6 Prosedur Penelitian .....	25
3.6.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Homogenizing</i> .....	25
3.6.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Annealing</i> .....	25
3.6.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Solution Treatment</i> .....	25
3.6.4 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Artificial Aging</i> .....	26
3.7 Proses Pengujian.....	26
3.7.1 Pengujian Komposisi.....	26
3.7.2 Pengujian Metalografi .....	26
3.7.3 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> .....	26
3.7.4 Pengujian Kekerasan .....	27
3.7.5 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> .....	27

3.8	Jadwal Penelitian.....	28
3.9	Rancangan Penelitian.....	29
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>31</b>
4.1	Hasil Pengujian Komposisi Kimia.....	31
4.2	Hasil Pengujian XRD Cu-16,8Zn-6,99Al Alloy.....	31
4.3	Hasil Pengujian Metalografi .....	34
4.4	Hasil Pengujian Kekerasan .....	37
4.5	Hasil Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> .....	39
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>41</b>
5.1	Kesimpulan .....	41
5.2	Saran.....	41
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>43</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Diagram fasa Cu-Zn.....	4
<b>Gambar 2. 2</b>	Diagram fasa terner Cu-Zn-Al dengan penambahan kandungan (a) 4% aluminium (b) 6% aluminium .....	5
<b>Gambar 2. 3</b>	Diagram fasa terner Cu-16,8Zn-6,99Al .....	6
<b>Gambar 2. 4</b>	Diagram perlakuan panas <i>solution treatment</i> dan <i>precipitation heat treatment</i> .....	7
<b>Gambar 2. 5</b>	Kurva proses <i>up-quenching</i> .....	8
<b>Gambar 2. 6</b>	Aplikasi <i>shape memory alloys</i> pada <i>thermal velve</i> .....	9
<b>Gambar 2. 7</b>	Transformasi fasa pada <i>shape memory alloys</i> .....	10
<b>Gambar 2. 8</b>	Skema <i>shape memory effect</i> dari <i>shape memory alloys</i> yang memperlihatkan proses <i>detwinned</i> seiring pembebanan .....	11
<b>Gambar 2. 9</b>	Skema pelepasan beban dan pemanasan kembali pada <i>shape memory alloy</i> .....	11
<b>Gambar 2. 10</b>	Prinsip Kerja XRD .....	13
<b>Gambar 2. 11</b>	Difraksi sinar-X pada jarak antar atom $d$ dan sinar datang $\theta$ .....	13
<b>Gambar 2. 12</b>	Indentasi pengujian kekerasan Vickers.....	14
<b>Gambar 2. 13</b>	Diagram waktu dan temperatur <i>aging</i> pada paduan Cu-22,3Zn-5,1Al; (a) Temperatur $M_s$ ; (b) <i>SM recovery</i> .....	15
<b>Gambar 2. 14</b>	Struktur mikro dengan <i>aging</i> 200°C setelah <i>quenching</i> (a) Paduan Cu-24,98%Zn-4,43%Al selama 2 jam; .....	16
<b>Gambar 2. 15</b>	Hasil struktur mikro (a) <i>direct quenching</i> ; (b) <i>up-quenching</i> ; (c) <i>step-quenching</i> .....	17
<b>Gambar 2. 16</b>	Struktur mikro hasil <i>aging</i> (a) 250°C selama 5 jam; (b) 250°C selama 8 jam; (c) 250°C selama 22 jam; (d) 250°C selama 30 jam; (e) 440°C selama 10 menit; (f) 475°C selama 7 menit; (g) 475°C selama 10 menit.....	17
<b>Gambar 2. 17</b>	Struktur mikro paduan A <i>up-quenching</i> dengan <i>aging</i> pada 400°C selama 50 menit .....	18
<b>Gambar 2. 18</b>	Hasil metalografi <i>solution treatment up-quenching</i> pada temperatur 105°C pada media <i>oilbath</i> .....	19
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram alir penelitian.....	22
<b>Gambar 3. 2</b>	Kurva perlakuan panas <i>up-quenching</i> 15 menit.....	24
<b>Gambar 3. 3</b>	Kurva perlakuan panas <i>up-quenching</i> 20 menit.....	24
<b>Gambar 3. 4</b>	Kurva perlakuan panas <i>up-quenching</i> 25 menit.....	25
<b>Gambar 4. 2</b>	Hasil pengujian XRD dengan perlakuan <i>artificial aging</i> .....	33
<b>Gambar 4. 1</b>	Hasil pengujian XRD dengan perlakuan <i>solution treatment</i> metode <i>holding time up-quenching</i> .....	32
<b>Gambar 4. 3</b>	Hasil metalografi <i>as cast</i> Cu-16,8Zn-6,99Al perbesaran 100x.....	34
<b>Gambar 4. 4</b>	Hasil pengujian metalografi pada spesimen <i>holding time up-quenching solution treatment</i> ; (a) UQ15; (b) UQ20; (c) UQ25.....	35
<b>Gambar 4. 5</b>	Hasil pengujian metalografi pada spesimen <i>artificial aging</i> ; (a) UQ15A; (b) UQ20A; (c) UQ25A .....	36
<b>Gambar 4. 6</b>	Grafik nilai kekerasan paduan Cu-16,9Zn-6,88Al.....	38
<b>Gambar 4. 7</b>	Hasil pengujian DSC.....	39

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Karakteristik unsur penyusun paduan Cu-Zn-Al.....	3
<b>Tabel 2. 2</b> Sifat termal paduan Cu-Zn-Al <i>alloys</i> .....	3
<b>Tabel 2. 3</b> Sifat mekanik paduan Cu-Zn-Al <i>alloys</i> .....	4
<b>Tabel 2. 4</b> Sifat <i>shape memory</i> paduan Cu-Zn-Al <i>alloys</i> .....	4
<b>Tabel 3. 1</b> Jadwal penelitian.....	28
<b>Tabel 3. 2</b> Rancangan penelitian.....	29
<b>Tabel 4. 1</b> Hasil pengujian komposisi paduan Cu-Zn-Al .....	31
<b>Tabel 4. 2</b> Ukuran butir spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al .....	37
<b>Tabel 4. 3</b> Nilai kekerasan paduan Cu-16,8Zn-6,99Al .....	37
<b>Tabel 4. 4</b> Transformasi temperature paduan Cu-16,8Zn-6,99Al.....	40

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi akan terus mengalami perkembangan seiring dengan kebutuhan dan perkembangan zaman. Kemajuan pengetahuan teknologi terjadi secara menyeluruh dari berbagai sektor industri dan aplikasi teknik. Kebutuhan manusia akan suatu perangkat yang memiliki *properties* tertentu akan semakin meningkat. Namun, kebutuhan tersebut tidak dapat dipenuhi jika hanya mengandalkan material murni yang dihasilkan langsung oleh alam atau hanya dengan mengandalkan satu material saja. Karena keterbatasan tersebut, muncul inovasi-inovasi paduan baru dibidang material sebagai salah satu elemen penting dalam terciptanya perangkat-perangkat teknologi canggih untuk memperoleh *properties* yang lebih baik dengan memberikan suatu perlakuan terhadap material paduan atau *alloy*. Material paduan yang terus mengalami perkembangan adalah paduan Cu-Zn-Al karena dianggap sebagai jenis material pintar yang umumnya disebut *shape memory alloys* (Sreekumar et al., 2007).

*Shape memory alloys* merupakan suatu material logam yang mampu mengingat bentuk dan memiliki kemampuan untuk memulihkan bentuk dan ukuran aslinya setelah dilakukan proses deformasi dan diberikan perlakuan temperatur di atas suhu transformasinya. Sifat yang unik ini dikenal dengan *shape memory effect* yang merupakan respon dari panas akibat perlakuan temperatur yang ada pada material tersebut. Kemampuan *shape memory effect* yang dapat mengingat bentuk dan mengembalikannya ke bentuk asal disebabkan oleh transisi fasa dari fasa martensit ke austenit sebagai respon dari adanya perubahan temperatur transformasinya (Ishihara et al., 1995).

Menurut ASM International, 1990. Secara komersial paduan *shape memory alloys* yang umum digunakan adalah paduan Ni-Ti dan *Cu-based*. Namun, keduanya memiliki sifat yang berbeda satu sama lain. Paduan Ni-Ti memiliki efek *shape memory* yang lebih besar yaitu hingga 8% dibandingkan dengan paduan *Cu-based* yang hanya memiliki efek *shape memory* sebesar 4-5%. Paduan Ni-Ti cenderung jauh lebih stabil secara termal dibandingkan dengan paduan *Cu-based*. Namun paduan Ni-Ti memiliki harga yang jauh lebih mahal dari paduan *Cu-based*. Sehingga paduan *Cu-based* dapat dijadikan alternatif pengganti paduan Ni-Ti. Selain harganya yang lebih murah, paduan *Cu-based* memiliki rentang transformasi temperatur yang lebih luas. Aplikasi dari *shape memory alloys* dapat ditemukan diberbagai bidang atau sektor industri seperti pada perangkat biomedis digunakan untuk *eyeglass frame* dan aktuator pada katup pengaman kebakaran (D.E.Hodgson, 1990).

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh V. Asanovic pada tahun 2004. Pada penelitian ini diteliti pengaruh proses *quenching* dan *artificial aging* yang diberikan terhadap paduan *shape memory alloys* dengan komposisi Cu-22.3wt%Zn-5.1wt%Al menggunakan 2 variasi *quenching* pada *solution treatment*, yaitu *step quenching* dan *up quenching*. Dengan hasil yang diperoleh suhu transformasi martensitik,  $M_s$ , selama proses *aging* pada temperatur 400°C mengalami penurunan selama waktu penuaan. *Aging* pada temperatur 400°C secara signifikan mengurangi tingkat keuletan dan *yield strength* paduan. Penurunan temperatur  $M_s$  pada spesimen *step quenching* dan *up quenching* terjadi karena berbagai faktor, yaitu adanya perubahan komposisi kimia karena terbentuknya endapan *solute-lean* dan terbentuknya presipitat yang mengakibatkan terganggunya nukleasi dari martensit (Asanović et al., 2004). Pada penelitian yang dilakukan Bagherpour pada tahun 2017, spesimen *up-quenching* tanpa adanya proses *artificial aging* memiliki sifat yang lunak (Bagherpour et al., 2017). Berdasarkan kedua penelitian tersebut, masih banyak hal yang dapat dilakukan dalam penelitian di bidang *shape memory alloys* dengan memodifikasi perlakuan panas paduan Cu-

Zn-Al sebagai alternatif pengganti dari paduan Ni-Ti yang umum digunakan di dunia industri sehingga diperoleh sifat dari material Cu-Zn-Al *alloys* yang optimal, dengan temperatur transformasi yang lebih rendah dan nilai kekerasan yang lebih baik. Maka dari itu penelitian ini akan menganalisis pengaruh variasi *holding time up quenching* dan proses *artificial aging* pada Cu-Zn-Al *alloys* terhadap struktur mikro dan kekerasan.

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh variasi *holding time* pada proses *up-quenching solution treatment* paduan Cu-16,8Zn-6,99Al terhadap struktur mikro dan kekerasan.
2. Pengaruh proses *artificial aging* paduan Cu-16,8Zn-6,99Al terhadap struktur mikro dan kekerasan.

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesimen produk hasil pengecoran dianggap homogen, bebas cacat dan komposisi sesuai dengan *ASM Handbook Volume 2*.
2. Pengaruh lingkungan selama proses perlakuan panas diabaikan.
3. Indikator pada *furnace* dianggap sesuai dengan metode.
4. Waktu pengeluaran spesimen dari *furnace* saat perlakuan panas dianggap sama.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi *holding time* pada proses *up-quenching solution treatment* paduan Cu-16,8Zn-6,99Al terhadap struktur mikro dan kekerasan.
2. Menganalisis pengaruh proses *artificial aging* pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al terhadap struktur mikro dan kekerasan.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh *holding time* pada proses *up-quenching solution treatment* dan *artificial aging* terhadap struktur mikro dan kekerasan pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. Diharapkan dengan adanya penelitian ini dapat mengetahui data secara spesifik sehingga dapat diterapkan pada dunia industri dan bermanfaat untuk pengembangan teknologi selanjutnya dalam bidang Teknik Material dan Metalurgi.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Paduan Cu-Zn-Al

Paduan *shape memory alloys* berbasis Cu yang umumnya digunakan adalah kombinasi unsur paduan Cu (tembaga), Zn (seng) dan Al (aluminium). Dengan rentang komposisi masing-masing unsur adalah 16-30% Zn, 4-8% Al dan sisanya adalah kandungan Cu. Paduan berbasis Cu atau tembaga dapat dilakukan *hot worked* di udara dan dengan komposisi unsur Al yang rendah yaitu pada rentang 4-8% paduan Cu-Zn-Al dapat dilakukan *cold worked* dengan dilanjutkan perlakuan *annealing*. Paduan *shape memory alloys* berbasis Cu ini bersifat metastabil, sehingga diperlukan panas untuk fasa induk  $\beta$  dan pendinginan terkontrol perlu dilakukan untuk mempertahankan fasa  $\beta$  tetap memiliki sifat *shape memory effect*. Salah satu paduan logam yang memiliki sifat *shape memory effect* atau SME yang baik adalah paduan *Cu-based* dibandingkan dengan paduan yang lain. Salah satu paduan utama Cu yang digunakan pada *shape memory alloys* adalah paduan dengan kombinasi unsur Cu-Zn-Al (D.E.Hodgson, 1990). Pada Tabel 2.1 berikut ini ditunjukkan karakteristik tiap unsur penyusun dari paduan Cu-Zn-Al.

**Tabel 2. 1** Karakteristik unsur penyusun paduan Cu-Zn-Al (Institution Organization, 1989)

Unsur penyusun	Tembaga	Seng	Aluminium
Simbol	Cu	Zn	Al
Nomor Atom	29	30	13
Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	8,96	7,14	2,69
Struktur Kristal	FCC	HCP	FCC
Temperatur Leleh (°C)	1080	420	660
Modulus Elastisitas (Gpa)	110	90	68,3

Peleburan pada *shape memory alloys* berbasis Cu hampir mirip dengan perunggu aluminium. Sebagian besar paduan komersial dilelehkan dengan cara induksi. Selama proses pelelehan, penggunaan fluks atau gas inert selama penuangan diperlukan untuk mencegah penguapan Zn dan oksidasi Al. Paduan Cu-Zn-Al, ketika di-*quench* dengan cepat akan langsung menjadi fasa martensit sehingga rentan terhadap efek stabilisasi martensit. Efek ini menyebabkan transformasi terbalik bergeser ke temperatur yang lebih tinggi sehingga menyebabkan terhambatnya pemulihan bentuk (Avner, 1974). Adapun beberapa sifat dari paduan Cu-Zn-Al dapat dilihat pada Tabel 2.2, Tabel 2.3, dan Tabel 2.4 berikut.

**Tabel 2. 2** Sifat termal paduan Cu-Zn-Al *alloys* (Institution Organization, 1989)

Sifat Termal	
Temperatur Leleh (°C)	950-1020
Massa Jenis (g/cm <sup>3</sup> )	7,64
Resistivitas ( $\mu\Omega$ .cm)	8,5-9,7
Konduktivitas Termal (W/m.°C)	120
Kapasitas Panas (J/Kg)	400

**Tabel 2. 3** Sifat mekanik paduan Cu-Zn-Al *alloys* (Institution Organization, 1989)  
Sifat Mekanik

Modulus Young Fasa (Gpa)	72
Modulus Young Martensit (Gpa)	70
Yield Strength Fasa (Mpa)	350
Yield Strength Martensit (Gpa)	80
Kekuatan Tarik Maksimum (Mpa)	600

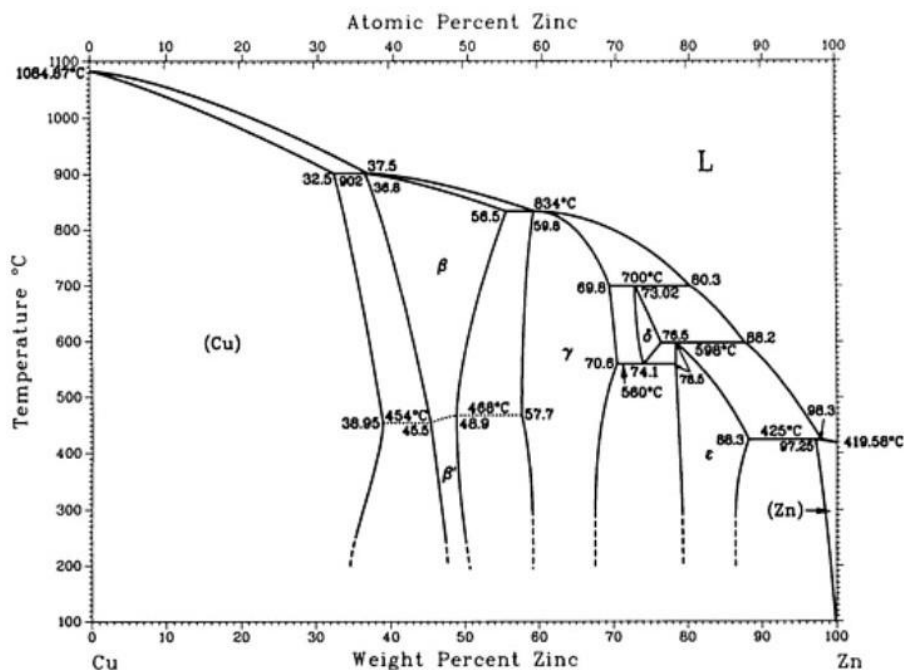
**Tabel 2. 4** Sifat *shape memory* paduan Cu-Zn-Al *alloys* (Institution Organization, 1989)  
Sifat *Shape Memory*

Transformasi Temperatur (°C)	<120
Recoverable Strain (%)	4

## 2.2 Diagram Fasa Cu-Zn-Al

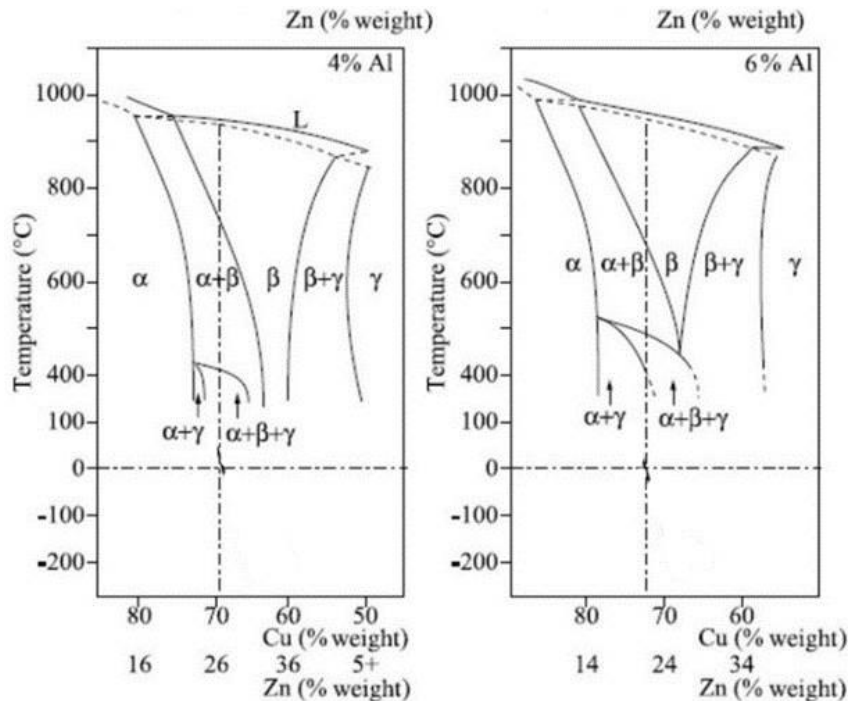
Kombinasi antara beberapa unsur dapat membentuk paduan logam yang menghasilkan sifat yang berbed-beda dari unsur aslinya. Sifat tersebut dapat diperhatikan dari fasa-fasa paduan yang terdapat pada diagram fasa. Diagram fasa merupakan suatu grafik yang berfungsi sebagai representasi mengenai fasa-fasa paduan dengan komposisi paduan, variasi temperatur dan tekanan. Diagram fasa suatu paduan dapat mengidentifikasi kelarutan pada suatu logam dan menunjukkan jenis-jenis fasa yang terbentuk pada kondisi kesetimbangan atau equilibrium (Institution Organization, 1989).

Terdapat berbagai macam diagram fasa, salah satunya adalah diagram fasa *binary* dan *ternary*. Diagram fasa *binary* merupakan diagram yang mempresentasikan fasa-fasa dalam paduan yang terdiri atas dua komponen unsur dengan tekanan konstan, komposisi dan temperatur yang berubah-ubah. Sedangkan untuk diagram fasa *ternary* merupakan diagram fasa pada paduan yang melibatkan tiga komponen unsur penyusun. Pada Gambar 2.1 berikut diperlihatkan diagram fasa *binary* dari paduan Cu-Zn.



**Gambar 2. 1** Diagram fasa Cu-Zn (Institution Organization, 1989)

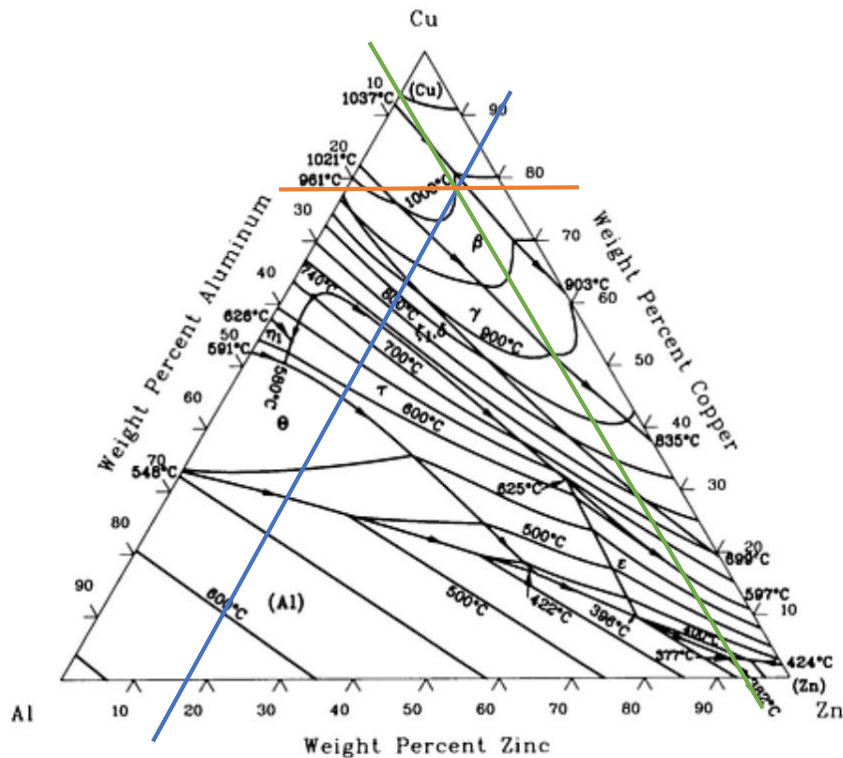
Pada Gambar 2.1 di atas, fasa  $\beta$  pada paduan biner Cu-Zn menunjukkan transformasi fasa martensit. Dengan penambahan elemen lain yaitu aluminium dapat memungkinkan kita untuk memperoleh transformasi martensit dengan suhu yang dapat disesuaikan dengan komposisinya. Diketahui bahwa, pada *shape memory alloys* sifat *shape memory effect* hanya dapat terjadi pada temperatur di bawah  $200^{\circ}\text{C}$ . Oleh karena itu, diperlukan *quenching* untuk menstabilkan fasa  $\beta$ . Selain itu, penambahan aluminium pada paduan dapat bertujuan untuk meningkatkan kestabilan dari fasa  $\beta$ . Selanjutnya dapat diamati diagram fasa biner Cu-Zn dengan penambahan aluminium pada Gambar 2.2 berikut, yang memperlihatkan diagram fasa *ternary* dari paduan Cu-Zn-Al.



**Gambar 2. 2** Diagram fasa terner Cu-Zn-Al dengan penambahan kandungan (a) 4% aluminium (b) 6% aluminium (Institution Organization, 1989)

Pada penambahan Al sebesar 4% dengan kandungan Zn sebesar 28% dapat menstabilkan fasa  $\beta$  pada kisaran rentang temperatur antara  $720^{\circ}\text{C}$  -  $950^{\circ}\text{C}$ . sedangkan untuk penambahan aluminium sebesar 6% dengan kandungan Zn sebesar 22%, fasa  $\beta$  dapat stabil pada kisaran rentang temperatur antara  $690^{\circ}\text{C}$  -  $950^{\circ}\text{C}$ . Paduan dengan komposisi ini dapat lebih mudah dilakukan homogenisasi dan *quenching*, karena pada rentang temperatur tersebut menghasilkan fasa tunggal, yaitu fasa  $\beta$  dan ketika didinginkan secara cepat akan menghasilkan martensit yang memunculkan sifat *shape memory alloys* pada paduan *shape memory* (Institution Organization, 1991).

Pada Gambar 2.3 berikut merupakan diagram fasa terner dari Cu-Zn-Al yang digunakan untuk menentukan fasa paduan, yaitu dengan dilakukan *plotting* komposisi tiap unsur paduan. *Plotting* dilakukan dengan menarik garis sejajar agar diperoleh titik potong dari ketiga garis tersebut yang mana merupakan fasa dari paduan itu sendiri.



**Gambar 2. 3** Diagram fasa terner Cu-16,8Zn-6,99Al (Institution Organization, 1989)

### 2.3 Perlakuan Panas

Perlakuan panas merupakan proses pemanasan dan pendinginan sebuah logam atau logam paduan untuk mengubah sifat mekanik yang diinginkan dari logam atau logam paduan tersebut. Melalui perlakuan panas yang tepat akan diperoleh sifat mekanik dari logam atau logam paduan yang baik seperti, kekuatan, kekerasan, keuletan dan ketangguhan dapat ditingkatkan dan diturunkan sesuai dengan sifat mekanik yang diinginkan (Groover, 2010). Pada penelitian ini digunakan beberapa perlakuan panas atau *heat treatment*, yaitu *homogenizing*, *annealing*, *solution treatment* dan *artificial aging*.

#### 2.3.1 Homogenizing

*Homogenizing* adalah proses pemanasan yang dilakukan pada temperatur tinggi dalam jangka waktu yang lama dengan tujuan untuk memperbaiki sifat mampu pengerjaan panas dan menghilangkan segregasi kimia atau metalurgi yang disebut *coring* yang terjadi secara alami pada beberapa paduan sebagai hasil dari proses solidifikasi. Proses homogenisasi diterapkan pada paduan yang memiliki rentang titik beku yang luas seperti perunggu, timah, nikel dan tembaga. Proses homogenisasi pada tembaga juga bertujuan untuk meningkatkan keuletan yang diinginkan agar sesuai syarat sifat mekanik seperti kekerasan, ketangguhan dan keuletan yang diinginkan.

Proses homogenisasi yang dilakukan pada paduan memiliki waktu dan temperatur homogenisasi yang berbeda-beda tiap paduan. Waktu yang digunakan untuk proses homogenisasi pada umumnya berkisar pada rentang 3 – 10 jam. Dengan temperatur yang digunakan adalah pada rentang 700-1000°C. Temperatur homogenisasi ini biasanya sekitar 50°C di atas garis solvus (Callister, 2010).

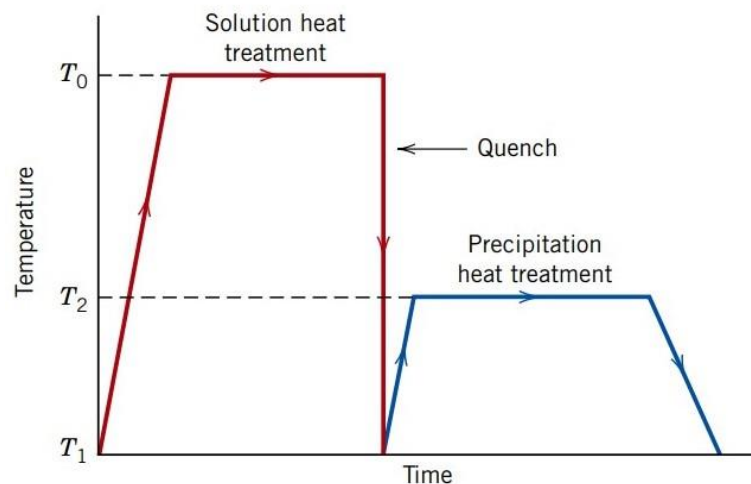


### 2.3.2 Annealing

Proses perlakuan panas *annealing* terdiri dari beberapa tahapan, yaitu proses pemanasan, penahanan dan pendinginan. Sehingga *annealing* dapat diartikan sebagai proses pemanasan yang dilakukan pada temperatur tertentu, kemudian ditahan pada temperatur tersebut dalam kurun waktu yang telah ditentukan, kemudian dilakukan proses pendinginan. Proses *annealing* ini bertujuan untuk melunakkan dan meningkatkan keuletan dan ketangguhan dari suatu logam dan paduannya. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi hasil dari proses *annealing* ini, yaitu laju pemanasan, temperatur, *holding time* dan laju pendinginan (Callister, 2010). Selain berfungsi untuk melunakkan dan meningkatkan keuletan serta ketangguhan dari logam dan paduan, *annealing* juga berfungsi untuk menghilangkan atau mengurangi tekanan internal, mengurangi segregasi dan memperbaiki ukuran butir.

### 2.3.3 Aging

Proses *aging* atau *age hardening* merupakan proses perlakuan panas dengan penahanan pada suatu temperatur pada selang waktu tertentu. Proses *aging* meliputi beberapa tahapan, yaitu berupa proses *solution heat treatment* hingga bidang fasa  $\alpha$  atau pada temperatur  $T_0$  untuk membentuk fasa tunggal pada paduan yang diikuti dengan proses pendinginan cepat (*quenching*) untuk melewati batas kelarutan atau pada temperatur  $T_1$  untuk mencegah fasa  $\beta$  terbentuk pada paduan saat proses pendinginan dilakukan. Proses tersebut menghasilkan larutan padat yang tetap stabil pada temperatur rendah. Selanjutnya dilakukan proses *aging* atau *age hardening* dengan pemanasan *supersaturated solution* hingga temperatur  $T_2$  dan dilakukan *holding* selama selang waktu tertentu dan didinginkan hingga temperatur kamar. Gambar 2.4 Merupakan skema proses *solution treatment* yang diikuti dengan proses *precipitation heat treatment*.

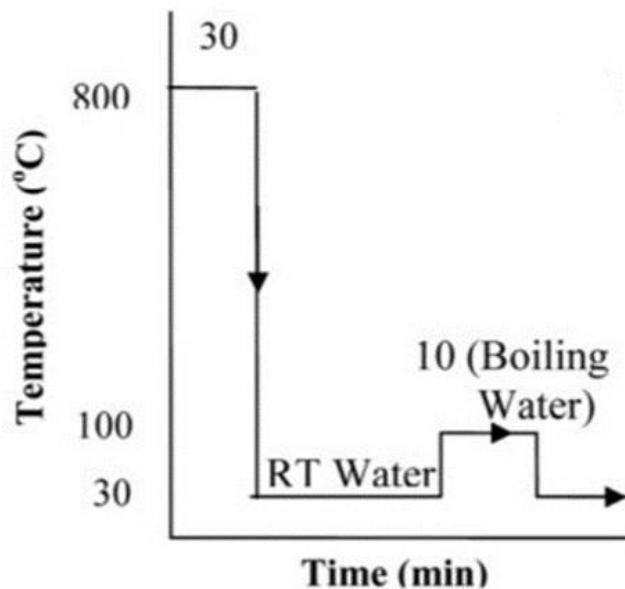


**Gambar 2. 4** Diagram perlakuan panas *solution treatment* dan *precipitation heat treatment* (Muzakir, 2012)

*Aging* dibedakan menjadi dua, yaitu *natural aging* (penuaan alami) dan *artificial aging* (penuaan buatan). *Natural aging* atau penuaan alami dilakukan pada temperatur kamar yang diikuti dengan peningkatan kekerasan paduan secara perlahan dalam waktu yang relatif lama. Sedangkan *artificial aging* atau penuaan buatan yang dilakukan di atas temperatur kamar dapat meningkatkan kekerasan paduan secara cepat dalam waktu yang relatif singkat (Muzakir, 2012).

## 2.4 Up Quenching

*Up quenching* merupakan salah satu dari tiga jenis metode *quenching*. Proses pendinginan pada *up quenching* ini diawali dengan proses perlakuan panas *solution treatment* yang kemudian dilanjutkan dengan pendinginan *direct quenching* pada media pendingin yang ditentukan hingga temperatur ruangan, kemudian spesimen dimasukkan kembali pada media pendingin dengan temperatur serta waktu tahan tertentu dan selanjutnya dilakukan proses *direct quenching* spesimen dibiarkan dingin hingga menyentuh temperatur ruangan. Contoh proses *up quenching* adalah sebagai berikut, setelah proses perlakuan panas *solution treatment* pada temperatur 800°C dan ditahan selama 30 menit, dilanjutkan dengan pendinginan cepat atau *direct quenching* pada media pendingin air hingga temperatur ruangan. Selanjutnya, dimasukkan kembali ke dalam *water bath* dengan temperatur 100°C dan waktu tahan selama 10 menit. Kemudian dilanjutkan dengan proses *direct quenching* kembali dengan media pendingin air pada temperatur ruangan (Furuya & Shimada, 1991). Berikut ini adalah Gambar 2.5 Yang menunjukkan kurva proses *up quenching*.



**Gambar 2. 5** Kurva proses *up-quenching* (Furuya & Shimada, 1991)

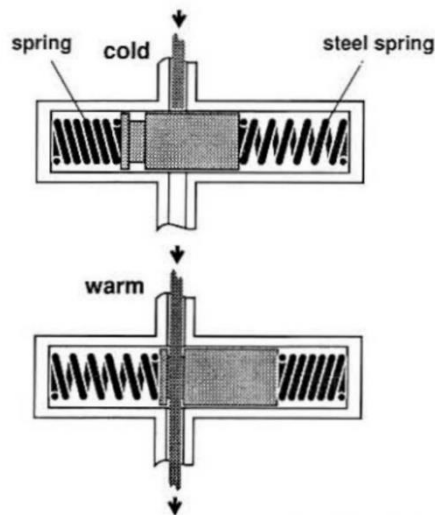
## 2.5 Shape Memory Alloy

*Shape Memory Alloys* atau yang biasa dikenal dengan sebutan SMA merupakan paduan material logam yang bisa disebut juga sebagai *smart material* karena kemampuannya yang dapat mengalami deformasi plastis pada suhu rendah dan seiring dengan peningkatan temperatur material tersebut akan kembali ke bentuk dan ukuran semulanya. Fenomena unik ini dikenal sebagai *shape memory effect*. Paduan yang paling sering digunakan dalam pembuatan SMA adalah paduan Ni-Ti atau nitinol dan *Cu-based*. Paduan Ni-Ti merupakan paduan yang memiliki kombinasi sifat material yang baik pada saat diaplikasikan. Namun paduan ini memiliki kekurangan yaitu temperatur transformasinya yang relatif rendah hanya sekitar 120°C sementara banyak aplikasi dari SMA yang digunakan pada suhu yang jauh lebih tinggi berkisar 200°C dan harganya yang sangat mahal dibandingkan dengan SMA *Cu-based*. Saat ini, paduan berbasis Cu telah digunakan sebagai alternatif preferensial untuk Ni-Ti untuk diaplikasikan pada suhu tinggi. Karena paduan berbasis Cu menunjukkan stabilitas termal yang tinggi, biaya lebih rendah dari Ni-Ti dan temperatur transformasinya tinggi (Sampath, 2007).

*Shape memory alloys* sendiri dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *shape memory alloys one-way* dan *shape memory alloys two-ways*. Paduan yang memiliki *shape memory alloys one-way* hanya pada saat diberikan perlakuan panas atau pemanasan termasuk dalam jenis *shape memory alloys one-way*. Sebaliknya, paduan yang memiliki *shape memory* pada saat diberikan perlakuan panas atau pemanasan dan juga pendinginan termasuk kedalam jenis *shape memory alloys two-ways* (D.E.Hodgson, 1990).

Aplikasi dari *shape memory alloys* telah digunakan di bidang industri di berbagai sektor. Baik di bidang biomedis, otomotif, kedirgantaraan, *micro-electromechanical system* (MEMS) dan juga di berbagai alat keamanan seperti sensor dan aktuator katup pengaman kebakaran (D.E.Hodgson, 1990).

*Shape memory alloys* memiliki andil yang cukup besar dalam berkembangnya industri di bidang otomotif. Terdapat beberapa aplikasi dari *shape memory alloys* yang digunakan dalam bidang ini, salah satunya adalah *thermal valve* yang berfungsi untuk mengatur tekanan pergeseran pada transmisi otomatis kendaraan. Pada mesin mobil, temperatur kinerja mesin mobil dalam kondisi ideal adalah pada temperatur 60-95°C. Fungsi dari *thermal valve* ini dapat dilihat secara skematis pada Gambar 2.6 berikut.



**Gambar 2. 6** Aplikasi *shape memory alloys* pada *thermal valve* (Stoekel, 1990)

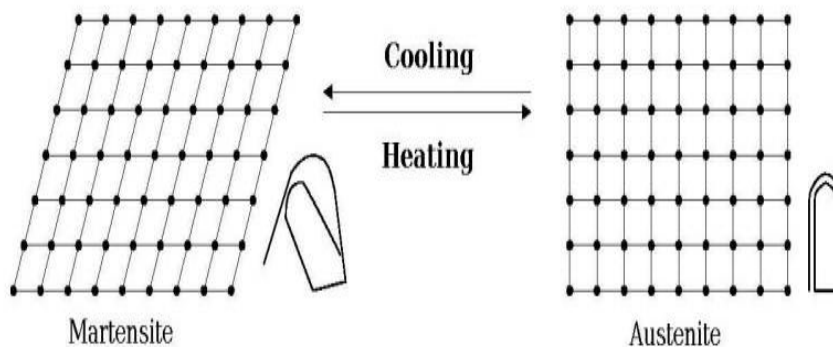
Pada temperatur rendah, gaya pegas pada *steel spring* lebih tinggi daripada gaya pegas pada *shape memory alloys spring* dalam fasa martensit. Akibatnya *steel spring* dapat mendeformasi *shape memory alloys spring* mendorong piston katup ke dalam posisi tertutup. Seiring dengan kenaikan temperatur pada cairan transmisi, *shape memory alloys spring* akan mendorong *steel spring* yang mengakibatkan posisi piston katup dalam kondisi terbuka. Katup ini berfungsi untuk meningkatkan kinerja transmisi untuk memungkinkan pergeseran transmisi yang lebih halus, mengurangi emisi gas kendaraan dan efisiensi konsumsi bahan bakar (Mehaddene, 2006).

### 2.5.1 Transformasi Fasa pada *Shape Memory Alloys*

*Solid state transformations* terdiri dari dua jenis transformasi, yaitu *diffusional* dan *displacive transformation*. *Diffusional transformation* adalah transformasi yang terjadi dimana fasa baru hanya terbentuk oleh atom yang bergerak atau atom yang terdifusi. Sedangkan, *displacive transformation* merupakan suatu proses transformasi di mana fasa dapat dibentuk tanpa melalui pergerakan atom, melainkan fasa tersebut terbentuk karena adanya perubahan

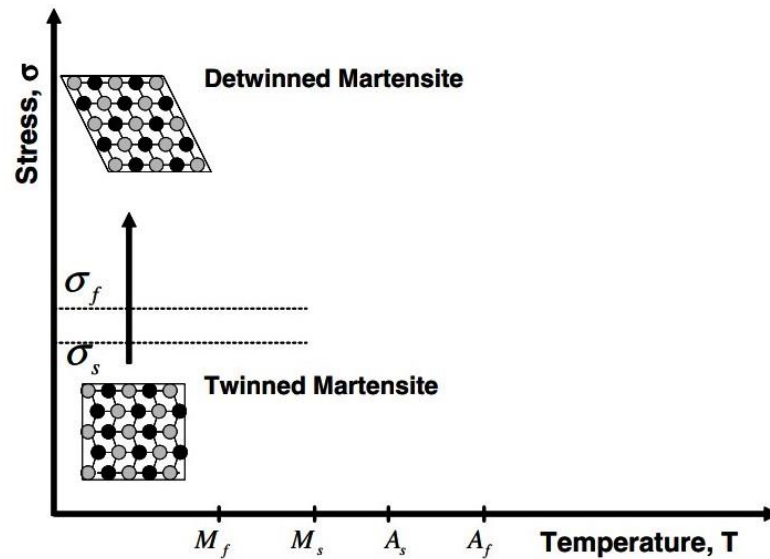
pada temperatur. Transformasi fasa pada *shape memory alloys* umumnya adalah jenis transformasi yang ke dua ini. Pada *shape memory alloys* transformasi dari satu struktur ke struktur yang lain terjadi tanpa melalui proses difusi atom, melainkan pergeseran distorsi kisi yang disebut dengan transformasi martensitik. Pada transformasi martensitik, Kristal martensitik memiliki arah orientasi yang berbeda disebut dengan *variant* yang terdiri atas *twinned martensite* dan *detwinned martensite*. *Shape memory alloy* memiliki dua fasa, yaitu fasa austenit dan martensit. Fasa yang terbentuk pada pendinginan dari fasa dengan temperatur yang lebih tinggi yang disebut fasa austenit dan temperatur fasa yang lebih rendah disebut martensit. Fasa austenit memiliki stuktur kristal berbentuk kubik. Sedangkan fasa martensit memiliki struktur kristal umumnya berbentuk tetragonal, orthorhombic, atau monoklinik.

Proses transformasi fasa pada *shape memory alloys* dapat dibedakan menjadi dua proses, yaitu *forward transformation* dan *reverse transformation*. *Forward transformation* merupakan suatu proses perubahan fasa dari austenit ke *twinned martensite*. Transformasi ini terjadi pada pendinginan dari temperatur martensit *start* ke temperatur martensit *finish* tanpa pembebanan mekanik dan perubahan bentuk paduan. Sedangkan *reverse transformation* merupakan suatu proses perubahan fasa dari *detwinned martensit* ke austenit. Transformasi ini mulai terjadi saat pemanasan dari temperatur austenit *start* ke temperatur austenit *finish* dengan pembebanan mekanik sehingga merubah bentuk paduan (Machado & Lagoudas, 2008). Skema proses transformasi fasa tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut.



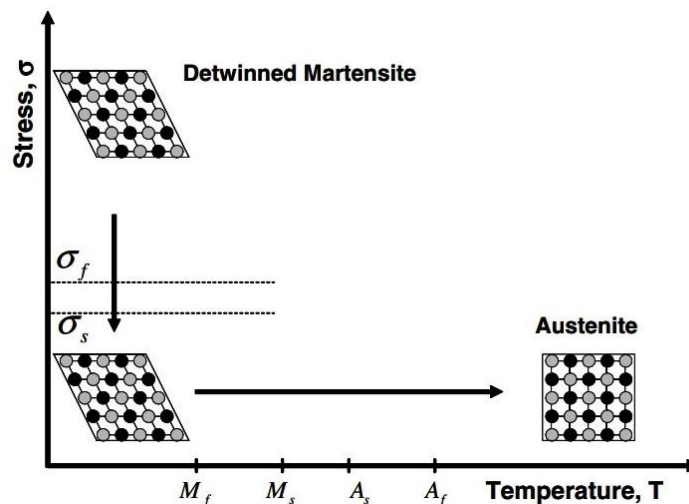
**Gambar 2. 7** Transformasi fasa pada *shape memory alloys*  
(Mehaddene, 2006)

Perubahan pada fasa martensit pada *shape memory alloy* disebut dengan proses *detwinning*. Proses ini terjadi ketika adanya perubahan fasa *twinned martensite* ke *detwinned martensite*. Perubahan fasa ini terjadi ketika beban mekanis diaplikasikan pada fasa *twinned martensite* sehingga terjadi deformasi kisi, dimana bagian yang diberi pembebanan akan mempertahankan bentuknya saat beban dilepaskan. Proses perubahan tersebut dapat dilihat secara makroskopik seperti pada Gambar 2.8 berikut.



**Gambar 2. 8** Skema *shape memory effect* dari *shape memory alloys* yang memperlihatkan proses *detwinned* seiring pembebanan (Machado & Lagoudas, 2008)

Ketika *shape memory alloys* diberi perlakuan panas di atas temperatur austenit *finish*  $A_f$ , akan terjadi transformasi fasa dari *detwinned martensite* menjadi austenit dan diikuti dengan perubahan bentuk paduan ke bentuk semula. Kemudian ketika proses pendinginan kembali (*forward transformation*) hingga di bawah temperatur *martensite finish* ( $M_f$ ), fasa akan kembali menjadi *twinned martensite* tanpa adanya perubahan bentuk (Gouda, 2014). Skema perubahan struktur kristal dari *detwinned martensite* menjadi austenit dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut.



**Gambar 2. 9** Skema pelepasan beban dan pemanasan kembali pada *shape memory alloy* (Machado & Lagoudas, 2008)

## 2.6 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian, yaitu pengujian *Optical Emission Spectrometry* (OES), pengujian metalografi, pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), pengujian kekerasan dan pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC).

### 2.6.1 *Optical Emission Spectrometry (OES)*

*Optical Emission Spectrometry (OES)* merupakan salah satu jenis alat pengujian dengan menggunakan teknik *atomic spectrometry* yang digunakan untuk mendapatkan kandungan unsur dari suatu spesimen. Prinsip kerja dari OES ini adalah dengan memanaskan spesimen hingga temperatur yang cukup supaya atom spesimen tereksitasi dan menyebabkan atom tidak stabil, kemudian atom akan kembali ke keadaan stabil seperti kondisi semula dengan mengemisikan energy. Intensitas cahaya yang diemisikan atom pada panjang gelombang tertentu dapat digunakan untuk mencari kandungan komposisi unsur yang diinginkan. Terdapat dua jenis OES yang umum digunakan, yaitu *Inductively Coupled Plasma (ICP)-OES* dan *spark OES*. Perbedaan yang membedakan keduanya adalah pada jenis sumber panas yang digunakan. Pada ICP-OES menggunakan plasma sedangkan *spark OES* menggunakan *electrical discharge* dari *gap* antara elektroda dan spesimen.

Pengujian *spark OES* dapat diaplikasikan untuk menganalisa komposisi kimia berbagai industri pembuatan logam dan manufaktur. *Spark OES* memiliki akurasi dan kecepatan analisa yang paling efektif untuk mengontrol pemrosesan paduan logam (Baldwin, 2004).

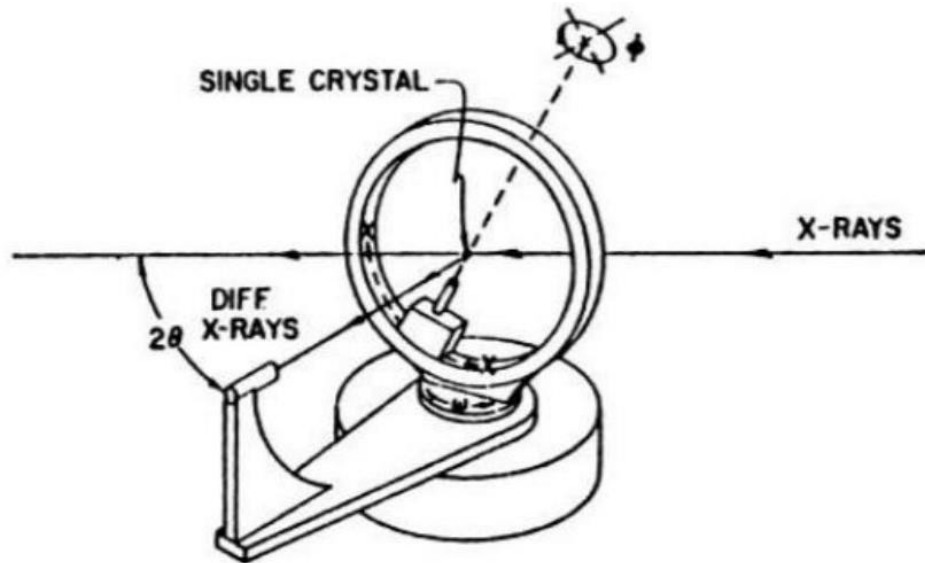
### 2.6.2 Pengujian Struktur Mikro

Metalografi merupakan ilmu yang mempelajari struktur mikro suatu logam dan karakteristiknya. Metalografi sangat penting dilakukan untuk mengetahui ukuran butir, distribusi fasa dan mengetahui adanya inklusi dalam suatu logam. Alat yang digunakan untuk pengujian struktur mikro ini adalah mikroskop optik dan struktur logam yang terlihat disebut dengan mikrostruktur.

Dalam melakukan pengujian struktur mikro atau metalografi, terdapat beberapa tahapan preparasi spesimen sebelum dilakukannya pengujian. Tahapan pada preparasi spesimen ini terdiri atas *cutting* (memotong material), *mounting* (pemberian resin), *grinding* (meratakan permukaan material), *polishing* (pemberian alumina untuk lebih menghaluskan dan mengkilapkan material), *etching* (pemberian etsa agar terkorosi) sehingga lebih mudah dalam proses pengamatan material dengan menggunakan mikroskop (Kaufman, 2003).

### 2.6.3 Pengujian *X-Ray Diffraction (XRD)*

*X-Ray Diffraction (XRD)* merupakan pengujian yang digunakan untuk analisa kualitatif meliputi identifikasi unsur tunggal dan senyawa maupun analisa kuantitatif meliputi penentuan komposisi, ukuran kristal, regangan dan tegangan sisa. Pada prinsipnya, XRD menggunakan sinar-X untuk menganalisa material. Sinar-X ini ditransmisikan ke suatu material dengan intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan karena adanya penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena perbedaan fasa dan saling menguatkan karena kesamaan fasa. Berkas yang saling menguatkan tersebut yang disebut dengan berkas difraksi (Callister, 2014). Berikut ini diperlihatkan skema prinsip kerja XRD pada Gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2. 10 Prinsip Kerja XRD (Roell, 2009)

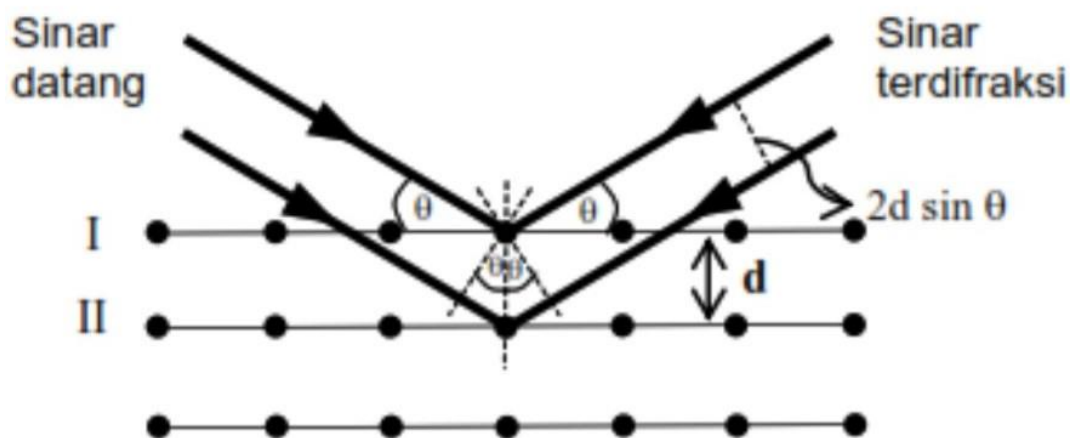
Berdasarkan mekanisme kerjanya, gelombang yang terdifraksi dapat dihitung menggunakan persamaan Hukum Bragg yang ditunjukkan pada Persamaan 2.1 berikut.

$$n \lambda = 2d \sin \theta \quad (2.1)$$

Keterangan:

- n : Orde difraksi (bilangan bulat)
- $\lambda$  : Panjang gelombang sinar-X
- d : Jarak antar kisi Kristal
- $\theta$  : Sudut sinar datang

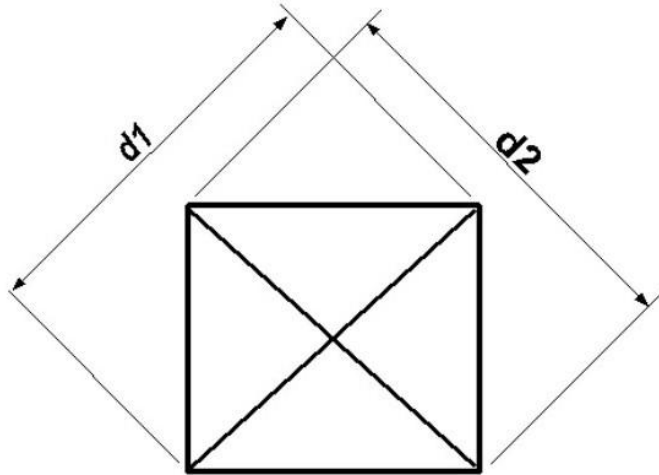
Pada Gambar 2.11, diperlihatkan visualisasi difraksi Bragg pada bidang kristal (Roell, 2009).



Gambar 2. 11 Difraksi sinar-X pada jarak antar atom  $d$  dan sinar datang  $\theta$  (Roell, 2009)

#### 2.6.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan suatu pengujian yang digunakan untuk mengetahui harga kekerasan dari suatu material. Kekerasan dapat didefinisikan sebagai ketahanan suatu material terhadap deformasi permanen oleh penekanan. Kekerasan dapat diukur dengan cara pengujian menggunakan alat uji kekerasan Vickers. Uji kekerasan Vickers ini menggunakan indentor piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar dengan sudut ujung sebesar  $136^\circ$ . Dapat dilihat macam-macam hasil indentasi pada Gambar 2.12 berikut ini.



**Gambar 2.12** Indentasi pengujian kekerasan Vickers  
(Zengin & Kayal, 2010)

Lekukan yang benar oleh penekanan piramida intan haruslah berbentuk bujur sangkar seperti Gambar 2.12.

Untuk mengetahui nilai kekerasan pada uji kekerasan vickers ini adalah dengan cara mengukur luas tampak tekan. Adapun perhitungan nilai kekerasan vickers dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.2 berikut.

$$HV = 1.854 \frac{P}{d^2} \quad (2.2)$$

Dimana :

- $HV$  : Angka kekerasan Vickers ( $\text{kg/mm}^2$ )
- $P$  : Beban indentasi (kg)
- $d$  : diagonal tapak tekan (mm)

#### 2.6.5 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

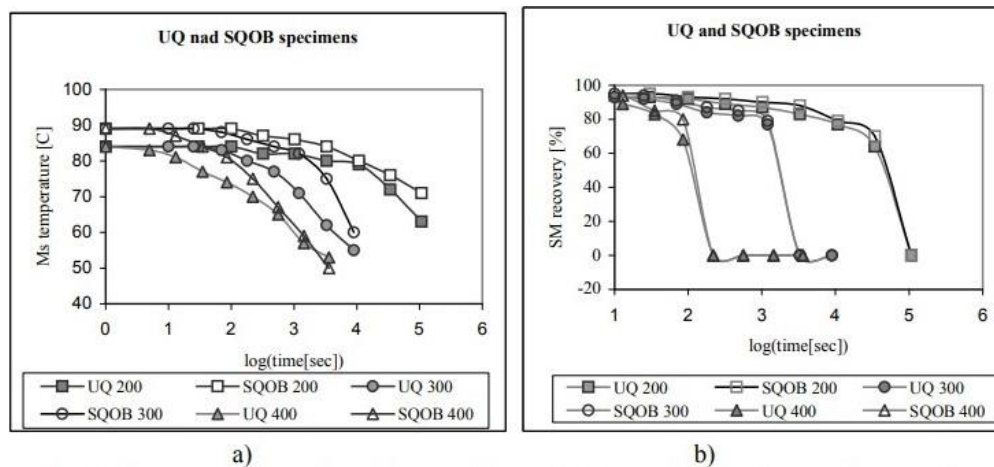
Pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC) merupakan salah satu alat dari *thermal analyser* yang dapat digunakan untuk menentukan kapasitas panas dan entalpi dari suatu material. Pengujian ini digunakan dalam mengukur kalor yang diserap atau dikeluarkan dari sebuah material yang dipanaskan maupun didinginkan pada rentang temperatur tertentu, sehingga diperoleh temperatur transformasi dari material yang diuji. Material yang dapat dianalisis kapasitas panas dan entalpinya menggunakan alat diuji DSC adalah logam, paduan logam dan paduan keramik. Sampel yang digunakan pada pengujian DSC ini berukuran sangat kecil, yaitu hanya beberapa milligram. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan penambahan temperatur terus-menerus pada sampel dan pembanding yang dimonitor sehingga tidak berlebihan. Hal ini bertujuan untuk mempertahankan agar temperatur keduanya selalu sama. Penambahan panas yang terjadi tercatat pada *recorder*, kemudian panas ini digunakan juga untuk mengganti kekurangan atau kelebihan karena reaksi endoterm atau eksoterm yang terjadi



pada sampel. Data yang diperoleh selanjutnya di plot ke dalam kurva yang dapat disetarakan dengan suatu spektrum yang disebut termogram. Reaksi endoterm memiliki temperatur sampe lebih rendah daripada temperatur referen. Sedangkan untuk reaksi eksoterm temperatur sampel lebih tinggi daripada temperatur referen. Perbedaan temperatur antara kedua material tersebut terus dideteksi dan dicatat sebagai suatu puncak kurva (Zengin & Kayal, 2010).

## 2.7 Penelitian Sebelumnya

Pada tahun 2004, Asanovic dan kawan-kawan telah melakukan penelitian terkait efek dari *quenching* dan *aging* pada Cu-Zn-Al *shape memory alloys*. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan komposisi paduan Cu-Zn-Al, yaitu Cu-22,3%Zn-5,1%Al dengan spesimen berbentuk ingot berdimensi 14 mm x 65 mm x 100 mm. Adapun perlakuan panas yang dilakukan, yaitu *homogenizing* pada temperatur 800°C selama 2 jam. Kemudian sampel dilakukan *hot forged* dan *cold rolled* hingga ketebalan mencapai 0,3 mm. Selanjutnya dilakukan perlakuan panas *annealing* pada temperatur 500°C dan dilanjutkan dengan *solution treatment* pada temperatur 870°C ditahan selama 10 menit yang kemudian dilakukan proses *quenching* dengan dua metode, yaitu *step-quenching* dan *up-quenching*. Proses pendinginan dengan *up-quenching* dilakukan pendinginan secara cepat terlebih dahulu (*direct quenching*) dengan media air pada temperatur kamar. Kemudian dilakukan *up-quenching* menggunakan media *oil bath* pada temperatur 105°C selama 10 menit. Kemudian dilakukan pendinginan kembali dengan media air pada temperatur ruangan. Pada penelitian ini dilakukan *aging* dengan variasi temperatur 200°C, 300°C dan 400°C. Pada Gambar 2.13 di bawah ini ditunjukkan pengaruh waktu dan temperatur *aging* sebagai berikut.

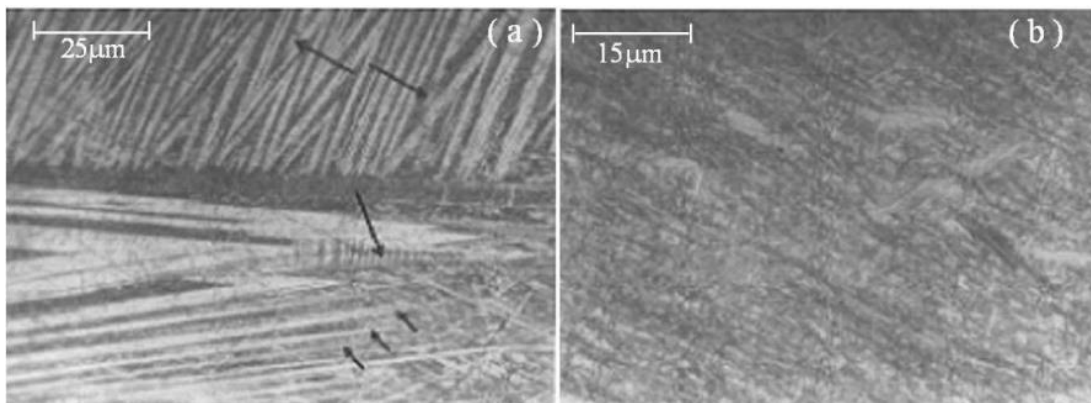


**Gambar 2. 13** Diagram waktu dan temperatur *aging* pada paduan Cu-22,3Zn-5,1Al; (a) Temperatur  $M_s$ ; (b) SM *recovery* (Asanovic, 2004)

Pada Gambar 2.13 (a) proses *aging* pada temperatur 200°C dan 400°C menurunkan nilai  $M_s$  seiring dengan penambahan waktu tahan atau *holding time*. Pada Gambar 2.13 (b) menunjukkan *shape memory recovery* pada paduan yang diberi perlakuan *aging* akan mengalami penurunan seiring dengan penambahan waktu tahan atau *holding time*. *Aging* dengan temperatur 400°C menyebabkan penurunan yang signifikan pada *yield stress* dan *tensile elongation*. Pada pengujian *shape memory recovery* dengan terbentuknya fasa  $\alpha$  lebih dari 20% akan mengakibatkan penurunan nilai *shape memory recovery* (Asanović et al., 2004).

Pada tahun 2010, Zengin dan kawan-kawan telah melakukan penelitian terkait struktur dan morfologi pada paduan Cu-Zn-Al *shape memory alloys*. Penelitian tersebut dilakukan

dengan menggunakan dua komposisi paduan Cu-Zn-Al, yaitu Cu-24,98%Zn-4,43%Al dan Cu-21,62%Zn-5,68%Al dengan spesimen berbentuk *wire*. Adapun perlakuan panas yang dilakukan, yaitu *solution treatment* pada temperatur 820°C ditahan selama 20 menit. Kemudian sampel didinginkan secara cepat atau *quenching* menggunakan media pendingin *iced brine*. Setelah proses *solution treatment* dilakukan, sampel paduan diberikan perlakuan panas berupa *artificial aging* pada temperatur 200°C ditahan selama 7 jam. Selanjutnya dilakukan pengujian metalografi dengan hasil dapat dilihat pada Gambar 2.14 sebagai berikut.

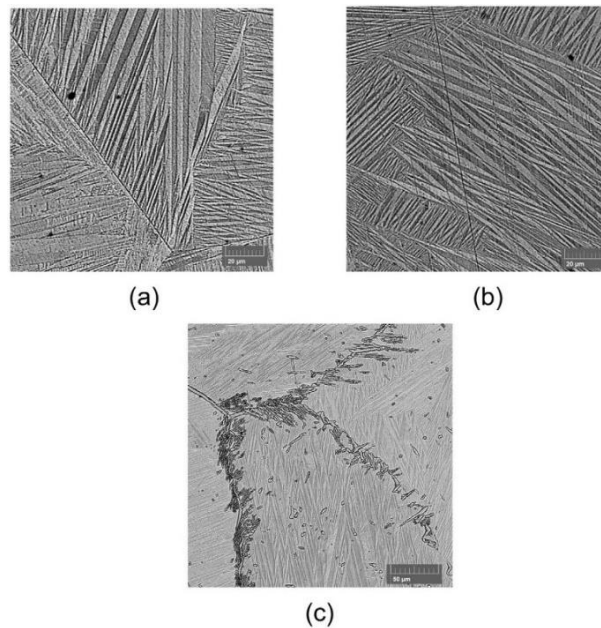


**Gambar 2.14** Struktur mikro dengan *aging* 200°C setelah *quenching*  
(a) Paduan Cu-24,98%Zn-4,43%Al selama 2 jam;  
(b) Paduan Cu-21,62%Zn-5,68%Al selama 7 jam (Zengin, 2010)

Pada Gambar 2.14 (a) diatas, paduan Cu-24,98%Zn-4,43%Al dengan perlakuan *aging* 200°C selama 2 jam setelah proses *quenching* menunjukkan fasa *twinned* martensit dengan 4 varian martensit pada stuktur mikro paduan. Beberapa plat didefinisikan sebagai martensit *lamellar*, yaitu yang ditandai anak panah di tengah. Fasa yang terbentuk di atas mikrografi merupakan martensit tipe-V. Struktur martensit yang ditandai dengan anak panah pendek di bawah mikrografi didefinisikan sebagai martensit jarum. Gambar 2.14 (b) paduan Cu-21,62%Zn-5,68%Al dengan perlakuan *aging* 200°C selama 7 jam setelah proses *quenching* memiliki bentuk struktur mikro berupa sedimen dari fasa  $\alpha$ . Hal ini terjadi karena pengaruh *holding time* yang cukup lama, yaitu 7 jam sehingga menimbulkan adanya reaksi difusi pada struktur mikro paduan dan membentuk sedimen fasa  $\alpha$  yang menutupi *twinned* martensit. Hal ini juga dikarenakan pada temperatur 200°C merupakan temperatur austenitik (Zengin & Kayal, 2010).

Pada tahun 2017, Bagherpour dan kawan-kawan telah melakukan penelitian terkait pengaruh komposisi paduan dan variasi metode perlakuan panas terhadap struktur mikro dan temperatur transformasi pada paduan Cu-Zn-Al. Penelitian tersebut dilakukan dengan dua komposisi Cu-Zn-Al yang berbeda-beda, yaitu Cu-25%Zn-4%Al dan Cu-30%Zn-4%Al. dengan spesimen berbentuk ingot berdiameter 0,5 mm. Adapun perlakuan panas yang dilakukan, yaitu *solution treatment* pada temperatur 850°C selama 30 menit. Selanjutnya dilakukan pendinginan dengan media pendingin air menggunakan tiga metode *quenching*, yaitu, *direct quenching*, *step-quenching* dan *up-quenching*. Untuk *up-quenching* dilakukan pendinginan cepat menggunakan media air pada temperatur ruangan, dilanjutkan dengan air mendidih pada temperatur 100°C selama 30 menit dan didinginkan kembali dengan media air pada temperatur ruangan. Hasil mikro struktur pada paduan dengan komposisi Cu-25%Zn-4%Al, pada *direct* dan *up-quenching* diperoleh struktur mikro berupa fasa *full martensite*. Sedangkan untuk *step-quenching* terdapat presipitat  $\alpha$  yang terbentuk. Pada paduan dengan

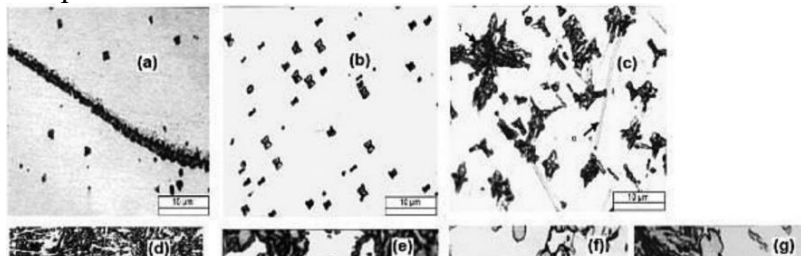
komposisi Cu-30%Zn-4%Al hanya terbentuk fasa induk. Hasil struktur mikro pada paduan Cu-25%Zn-4%Al dapat dilihat pada Gambar 2.15 berikut.



**Gambar 2.15** Hasil struktur mikro (a) *direct quenching*; (b) *up-quenching*; (c) *step-quenching* (Bagherpour, 2017)

Temperatur transformasi martensit ( $M_s$  dan  $M_f$ ) dari paduan Cu-25%Zn-4%Al dapat diperoleh dengan menggunakan metode pengujian DSC berturut-turut adalah  $30^\circ\text{C}$  dan  $60^\circ\text{C}$  (Bagherpour et al., 2017).

Pada tahun 2021, Alaneme dan kawan-kawan telah melakukan penelitian terkait fenomena *aging* martensit dalam paduan berbasis Cu terhadap efek pada *structural transformation*, *mechanical*, dan *shape memory properties*. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan komposisi Cu-19Zn-6Al. Adapun perlakuan panas yang dilakukan, yaitu *homogenizing* pada temperatur  $700^\circ\text{C}$  selama 2 jam. Dilanjutkan dengan proses *annealing* pada temperatur  $500^\circ\text{C}$  selama 3 jam dan dilanjutkan dengan *solution treatment* dengan pendinginan menggunakan metode *up-quenching* pada temperatur  $100^\circ\text{C}$  selama 30 menit pada media air. Perlakuan *aging* diberikan pada penelitian ini dengan variasi rentang temperatur  $200^\circ\text{C}$ - $500^\circ\text{C}$ . Hasil mikro struktur pada spesimen setelah diberikan *aging* pada rentang temperatur  $200^\circ\text{C}$ - $500^\circ\text{C}$  dapat dilihat pada Gambar 2.16 berikut.



**Gambar 2.16** Struktur mikro hasil *aging* (a)  $250^\circ\text{C}$  selama 5 jam; (b)  $250^\circ\text{C}$  selama 8 jam; (c)  $250^\circ\text{C}$  selama 22 jam; (d)  $250^\circ\text{C}$  selama 30 jam; (e)  $440^\circ\text{C}$  selama 10 menit; (f)  $475^\circ\text{C}$  selama 7 menit; (g)  $475^\circ\text{C}$  selama 10 menit (Alaneme, 2021)

Pada Gambar 2.16 di atas, untuk poin a, terdapat presipitat  $\gamma$  pada batas butir. Pada poin b, terdapat presipitat  $\gamma$  yang berbentuk seperti kupu-kupu. Pada poin c, terdapat presipitat  $\gamma$  berwarna gelap menunjukkan bentuk dendrit. Pada poin d, dapat terlihat suatu pola kompleks yang terdapat fasa  $\alpha$  dan  $\gamma$ . Pada poin e, terdapat fasa  $\gamma$  berwarna abu-abu gelap dan fasa  $\alpha$  yang berwarna abu-abu terang. Pada poin f, menunjukkan struktur *globular eutectoid* pada batas butir dan pada poin g, menunjukkan bentuk laminar perlit dengan struktur *eutectoid* pada batas butir (Alaneme, 2021).

Pada tahun 2021, Asanovic dan kawan-kawan telah melakukan penelitian terkait efek dari komposisi kimia dan media pendingin pada *recoverable strain* pada paduan Cu-Zn-Al. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan tiga komposisi Cu-Zn-Al yang berbeda-beda, yaitu Cu-25,38%Zn-3,30%Al, Cu-22,30%Zn-5,10%Al dan Cu-21,60%Zn-5,64%Al dengan spesimen berbentuk ingot berdimensi 14 mm x 65 mm x 100 mm. Adapun perlakuan panas yang dilakukan, yaitu *homogenizing* pada temperatur 850°C selama 2 jam. Dilanjutkan dengan proses *annealing* pada temperatur 830°C selama 1 jam dan dilanjutkan dengan *solution treatment* pada temperatur 890°C ditahan selama 10 menit yang kemudian dilakukan proses *quenching* dengan tiga metode, yaitu *direct quenching*, *step-quenching* dan *up-quenching*. Pada *step* dan *up-quenching* digunakan *oilbath* pada temperatur 105°C selama 10 menit. Perlakuan *aging* diberikan pada penelitian ini dengan variasi temperatur 200°C, 300°C, 400°C dan 500°C. Pada hasil pengujian *shape memory recovery* dari beberapa variasi pendinginan, untuk paduan A dan B dengan *step-quenching* memiliki SM *recovery* terbaik berturut-turut sebesar 92-98% dan 91-94%. Pada paduan C diperoleh SM *recovery* terbaik dengan variasi *up-quenching* sebesar 85-87%. SM *recovery* semakin menurun dengan adanya perlakuan *aging*. SM *recovery* yang relatif tinggi terdeteksi pada proses *aging* dengan temperatur 200 °C selama 2 jam. SM *recovery* mulai menurun pada temperatur 300-500°C. Perlakuan *aging* pada *up-quenching* dengan paduan A dilakukan pada temperatur 400°C selama 50 menit (Asanović, 2021). Berdasarkan stuktur mikro pada Gambar 2.17 terdapat presipitan dengan bentuk *rod-like* yang terdeteksi sebagai fasa  $\alpha$ .

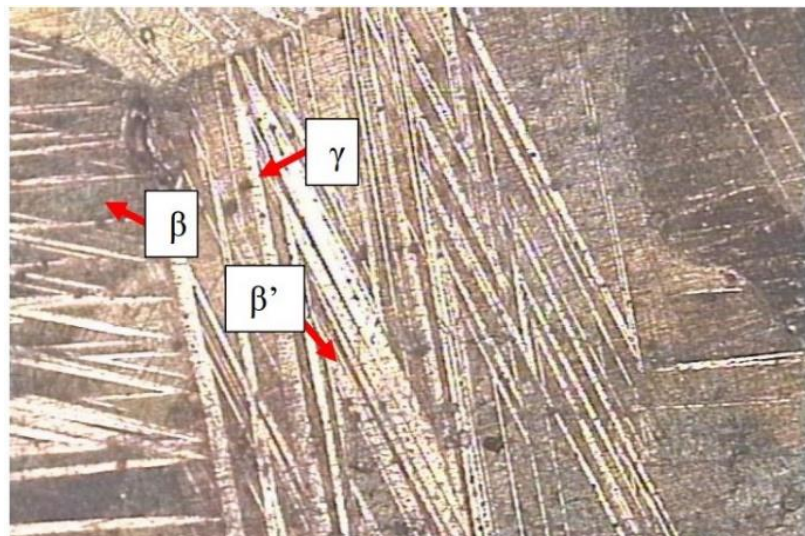


**Gambar 2. 17** Struktur mikro paduan A *up-quenching* dengan *aging* pada 400°C selama 50 menit (Asanovic, 2021)

Pada tahun 2022, Mahesa telah melakukan penelitian terkait pengaruh variasi temperatur *up-quenching* dan *holding time artificial aging* pada paduan Cu-Zn-Al terhadap struktur mikro, kekerasan dan *shape memory effect*. Penelitian tersebut menggunakan komposisi paduan Cu-Zn-Al, yaitu Cu-14,6%Zn-7,41%Al. Perlakuan panas yang digunakan pada penelitian ini

adalah *homogenizing* pada temperatur 850°C selama 2 jam dan dilanjutkan dengan *annealing* pada temperatur 500°C selama 4 jam. Variasi temperatur *up-quenching* pada penelitian ini menggunakan temperatur 55°C dan 105°C selama 10 menit setelah proses *solution treatment* pada temperatur 850°C selama 10 menit. Kemudian dilakukan *aging* pada temperatur 400°C selama 5, 50 dan 95 menit. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah OES, XRD, metalografi, kekerasan, DSC dan SME. Pengujian OES komposisi yang dihasilkan adalah *balance* Cu-14,6 wt%Zn – 7,41 wt%Al. Untuk pengujian XRD, pada *solution treatment up-quenching* pada temperatur 105°C *oilbath* tanpa *artificial aging* tidak menunjukkan fasa  $\alpha$ -brass. Kemudian terbentuk fasa  $\beta$ -brass yang terletak pada posisi  $2\theta$  43,4655° yang memiliki struktur kristal kubik. Terdapat fasa  $\gamma$ -brass (Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>) yang terletak pada posisi  $2\theta$  45,7260° yang memiliki struktur kristal kubik dan (Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>) yang terletak pada posisi 63,9392° dan 80,2283° yang memiliki struktur kristal kubik. Untuk *artificial aging* pada 400°C dengan variasi *holding time* 5, 50 dan 95 menit terdapat fasa  $\alpha$ -brass, untuk UQ105A pada posisi  $2\theta$  42,3747° dan  $2\theta$  49,3478°, UQ105B pada posisi  $2\theta$  49,2940°, dan UQ105B pada posisi  $2\theta$  49,2791°. Fasa  $\beta$ -brass dengan struktur kristal kubik pada UQ105A terdapat pada posisi  $2\theta$  43,4937°, UQ105B pada posisi  $2\theta$  30,2485°, UQ105C pada posisi  $2\theta$  30,2687°. Fasa  $\gamma$ -brass dengan bentuk kristal kubik, pada UQ105A terdapat pada posisi  $2\theta$  87,9494° dan (Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>) terletak pada posisi 63,3214°, 72,8511°, dan 80,2414°, UQ105B pada posisi  $2\theta$  87,8077° dan (Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>) terletak pada posisi 42,6519°, 44,1063°, 63,9745°, 72,8200°, dan 80,1033°, UQ105C pada posisi  $2\theta$  87,9158° dan (Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>) terletak pada posisi 42,7847°, 44,1814°, 64,0217°, 72,7751°, dan 81,1482°. Dengan adanya ketiga fasa tersebut mempengaruhi sifat *shape memory effect* pada paduan *shape memory*. Pada pengujian metalografi pada spesimen dengan proses *solution treatment up-quenching* pada temperatur 55°C media *oilbath* menghasilkan fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$  dan  $\gamma$ . Sedangkan fasa yang terbentuk pada temperatur 105°C menghasilkan fasa  $\beta$ ,  $\beta'$  dan  $\gamma$ . Dapat dilihat pada Gambar 2.18. Pada spesimen ini tidak terbentuk fasa  $\alpha$ , dikarenakan *holding time* pada *solution treatment* selama 10 menit fasa  $\alpha$  berhasil melarut sempurna menjadi fasa  $\beta$ .

Untuk pengujian kekerasan digunakan pengujian vickers dengan standar ASTM E92-17 didapatkan nilai kekerasan paling tinggi adalah pada spesimen *up-quenching* 105°C dengan perlakuan *aging* temperatur 400°C selama 95 menit sebesar  $326,33 \pm 1,25$  VHN dan nilai kekerasan paling kecil adalah spesimen *up-quenching* 55°C tanpa *aging*, yaitu sebesar  $221,67 \pm 1,25$  VHN. Untuk pengujian DSC, diperoleh nilai  $M_s$  adalah 35°C dan  $M_f$  berada pada temperatur dibawah 30°C. Untuk pengujian *shape memory effect* nilai *recovery* paling besar terdapat pada spesimen *up-quenching* 105°C tanpa *artificial aging*, yaitu sebesar 90%.

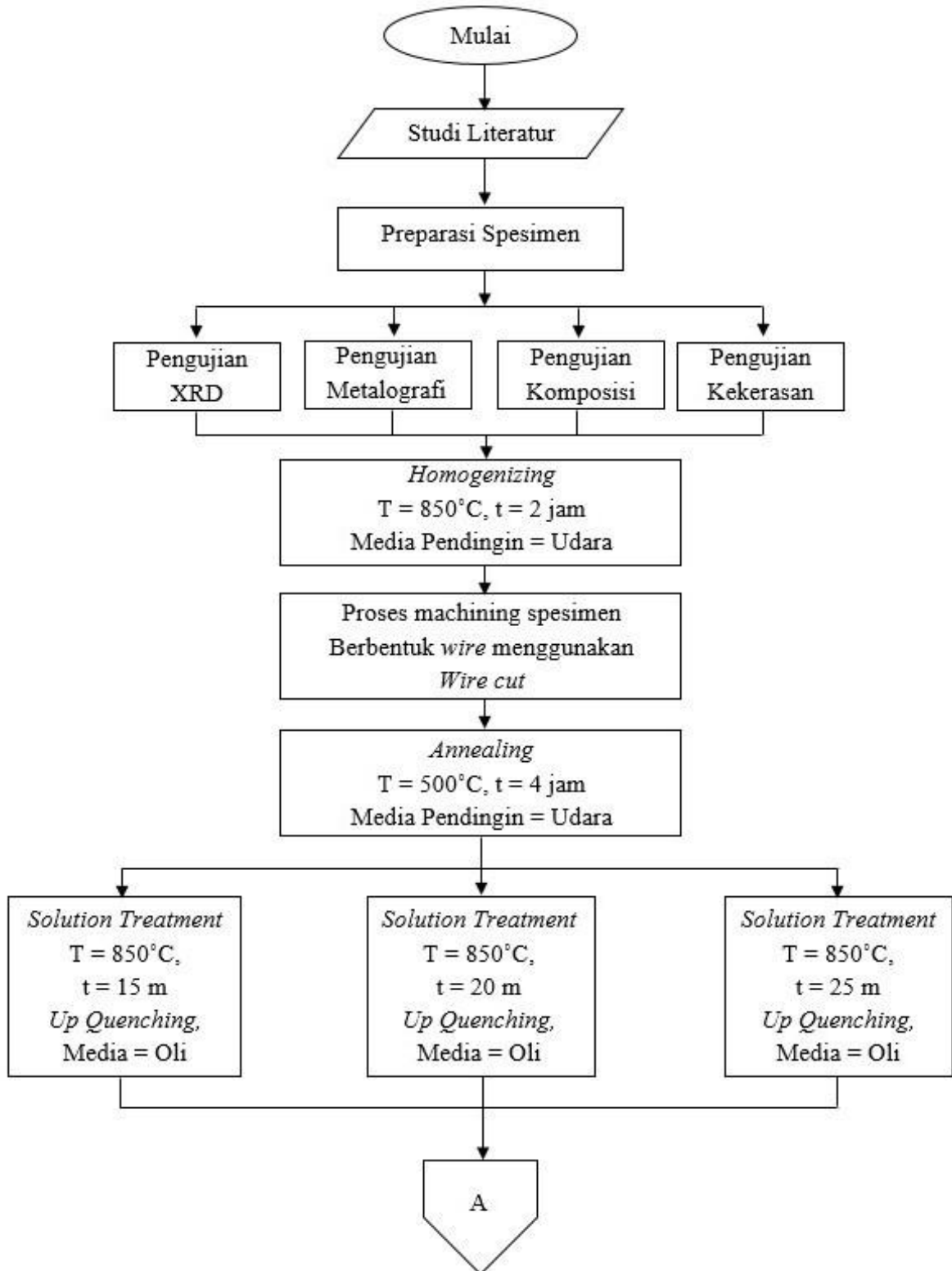


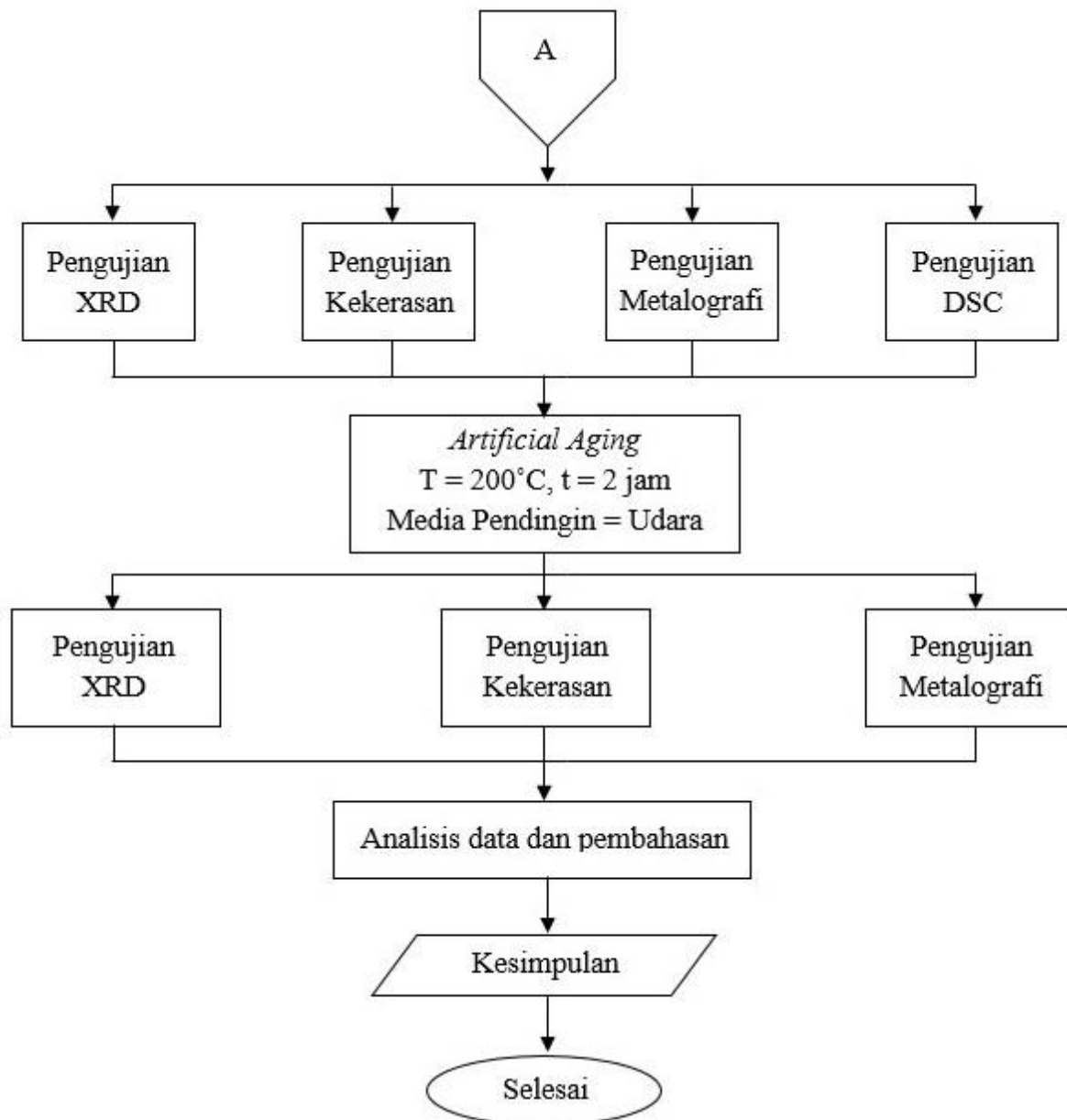
**Gambar 2. 18** Hasil metalografi *solution treatment up-quenching* pada temperatur 105°C pada media *oilbath* (Mahesa, 2022)

Sedangkan nilai *recovery* paling rendah yaitu spesimen *up-quenching* 55°C dengan *holding time artificial aging* 400°C selama 95 menit, yaitu sebesar 25%. Berdasarkan hasil pengujian SME tersebut, semakin bertambahnya *holding time* pada proses *artificial aging* akan menyebabkan nilai *recovery* semakin berkurang (Mahesa, 2022).

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian





**Gambar 3. 1** Diagram alir penelitian

### 3.2 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut, yaitu gelas ukur yang digunakan untuk mengukur bahan larutan etsa, *beaker glass* digunakan sebagai wadah dalam mencampurkan bahan larutan etsa, gerinda tangan digunakan untuk memotong spesimen dalam proses preparasi spesimen, mesin *grinding* dan *polishing* yang digunakan untuk melakukan proses *grinding* dan *polishing* pada spesimen yang digunakan pada pengujian metalografi, kertas abrasive digunakan dalam melakukan proses *grinding*, *burner furnace* yang digunakan untuk melakukan proses perlakuan panas dengan memanaskan spesimen pada temperatur tertentu, *wire cut* digunakan saat melakukan proses preparasi spesimen paduan Cu-Zn-Al, mikroskop optik digunakan saat pengujian metalografi untuk menganalisa struktur mikro



---

spesimen dan yang terakhir adalah *water bath* digunakan dalam proses *up-quenching* berfungsi untuk menginkubasi sapel uji di dalam media pendingin dan temperatur tertentu.

### 3.3 Alat Pengujian

Adapun alat pengujian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Alat Pengujian Komposisi  
Alat yang digunakan untuk menguji komposisi kimia yang terkandung pada spesimen dilakukan di LPPM.
2. Alat Pengujian Kekerasan  
Alat ini digunakan untuk mengukur nilai kekerasan spesimen sebelum dan sesudah perlakuan panas dilakukan. Alat uji kekerasan yang digunakan pada penelitian ini merupakan milik Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.
3. Alat Pengujian XRD  
Alat ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk pada spesimen uji dengan cara menembakkan spesimen yang akan diuji dengan menggunakan sinar-X. Alat uji XRD yang digunakan bertipe PAN Analytical XRD yang merupakan milik Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material ITS.
4. Alat Pengujian DSC  
Alat ini digunakan untuk mengetahui temperatur transformasi fasa pada spesimen. Alat ini mendeteksi perubahan kalor secara endotermik maupun eksotermik yang menambahkan awal dan akhir perubahan fasa pada temperatur tertentu.

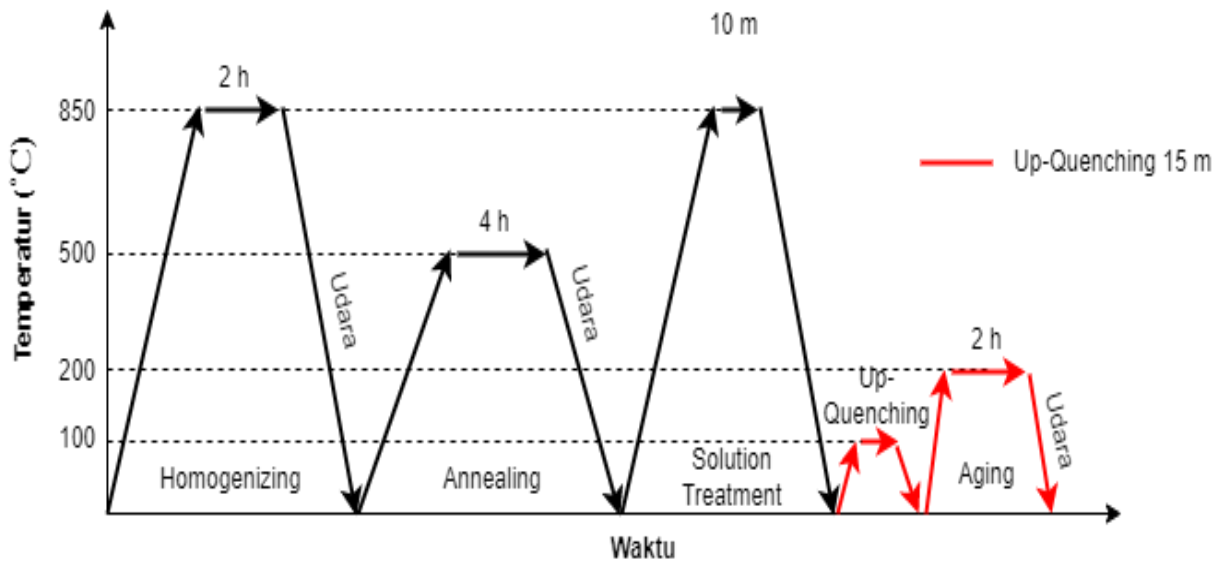
### 3.4 Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

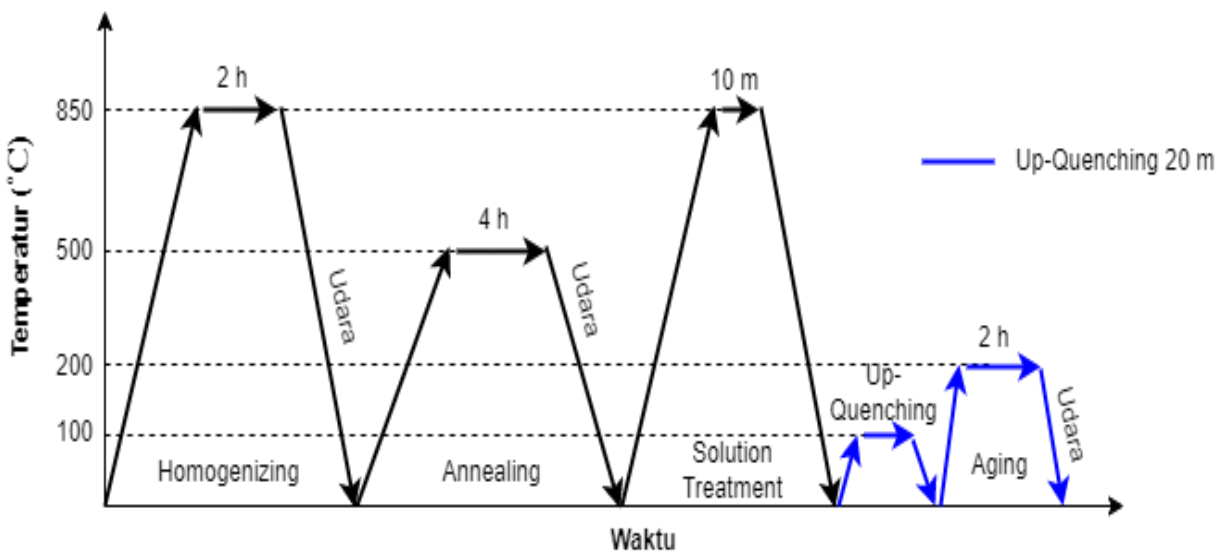
1. Paduan Cu-Zn-Al  
Paduan Cu-Zn-Al yang telah melalui proses pengecoran, dengan komposisi sesuai dengan *ASM Handbook Vol. 2 Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*.
2. Bahan Etsa  
Bahan etsa yang digunakan pada penelitian ini adalah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Alaneme tahun 2018, yaitu:
  - a. 5 gram  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
  - b. 10 ml HCL
  - c. 95 ml Metanol
3. Oli  
Oli pada penelitian ini digunakan sebagai media pendingin. Oli yang digunakan adalah oli SAE 30W.

### 3.5 Kurva Perlakuan Panas

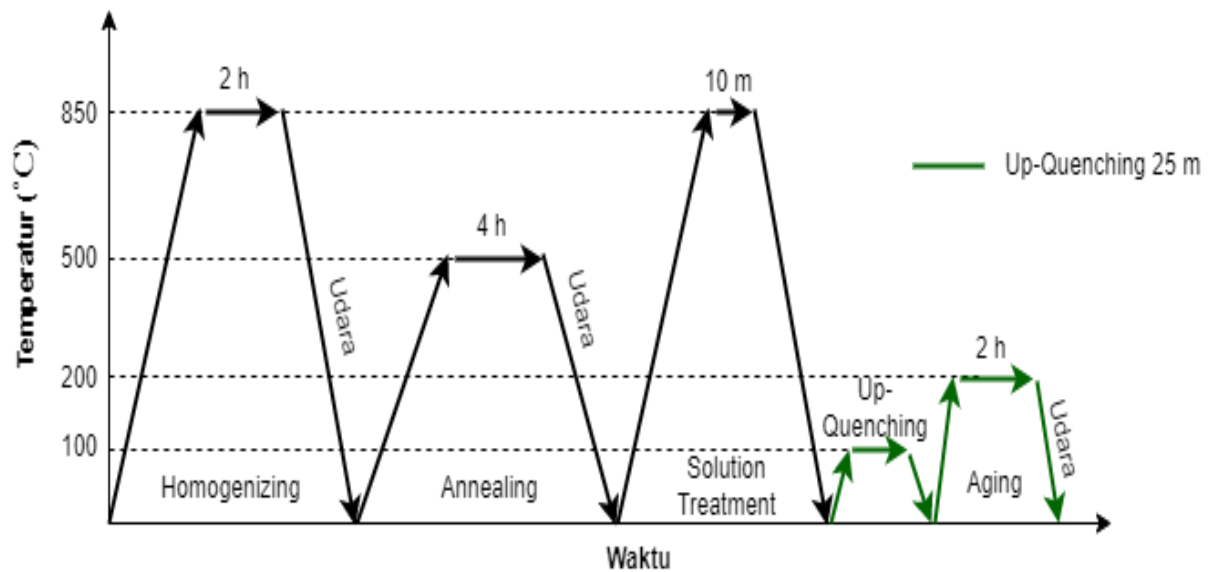
Adapun kurva perlakuan panas yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan *homogenizing*, *annealing*, *solution treatment* dengan variasi *holding time up-quenching* dan *artificial aging* seperti yang tertera pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 Kurva perlakuan panas *up-quenching* 15 menit



Gambar 3. 3 Kurva perlakuan panas *up-quenching* 20 menit



Gambar 3. 4 Kurva perlakuan panas *up-quenching* 25 menit

### 3.6 Prosedur Penelitian

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

#### 3.6.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Homogenizing*

Adapun prosedur proses perlakuan panas *homogenizing* pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Spesimen uji disiapkan.
2. *Electric Furnace* disiapkan untuk proses perlakuan panas.
3. Spesimen uji dimasukkan ke dalam *electric furnace*, kemudian dipanaskan hingga temperatur  $850^{\circ}\text{C}$  dan ditahan selama 2 jam.
4. Spesimen uji dikeluarkan dari *electric furnace* dan didinginkan dengan media pendingin udara.

#### 3.6.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Annealing*

Adapun prosedur proses perlakuan panas *annealing* pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Spesimen uji disiapkan.
2. *Electric Furnace* disiapkan untuk proses perlakuan panas.
3. Spesimen uji dimasukkan ke dalam *electric furnace*, kemudian dipanaskan hingga temperatur  $500^{\circ}\text{C}$  dan ditahan selama 4 jam.
4. Spesimen uji dikeluarkan dari *electric furnace* dan didinginkan dengan media pendingin udara.

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

Adapun prosedur proses perlakuan panas *solution treatment* pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Spesimen uji disiapkan.
2. *Electric Furnace* disiapkan untuk proses perlakuan panas.
3. Spesimen uji dimasukkan ke dalam *electric furnace*, kemudian dipanaskan hingga

temperatur 850°C dan ditahan selama 10 menit.

4. Spesimen uji dikeluarkan dari *electric furnace* dan dimasukkan ke dalam media pendingin air.
5. Spesimen diambil dari media pendingin, kemudian dilakukan *up-quench* pada temperature 100°C dengan *oilbath* ditahan selama 15 menit dan dimasukkan ke dalam media pendingin air.
6. Langkah 1-5 diulangi, dengan waktu tahan pada *up-quench* yang berbeda, yaitu 20 menit dan 25 menit.

#### 3.6.4 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Artificial Aging*

Adapun prosedur proses perlakuan panas *solution treatment* pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Spesimen uji disiapkan.
2. *Electric Furnace* disiapkan untuk proses perlakuan panas.
3. Spesimen uji dimasukkan ke dalam *electric furnace*, kemudian dipanaskan hingga temperatur 200°C dan ditahan selama 2 jam.
4. Spesimen uji dikeluarkan dari *electric furnace* dan dibiarkan dingin di udara.

### 3.7 Proses Pengujian

Prosedur pengujian pada penelitian ini menggunakan enam pengujian, antara lain: pengujian komposisi menggunakan pengujian komposisi, pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro dari paduan, pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada paduan, pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers untuk mengetahui kekerasan pada paduan, pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) untuk mengetahui temperatur As, Af, Ms dan Mf pada paduan Cu-Zn-Al.

#### 3.7.1 Pengujian Komposisi

Pengujian dari komposisi kimia adalah dengan *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Pengujian ini digunakan untuk mendapatkan konsentrasi unsur dari spesimen. OES menggunakan radiasi elektromagnetik dalam sistemnya, radiasi tersebut dapat diabsorpsi dan diemisikan dari atom spesiman.

#### 3.7.2 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro dari spesimen uji dilakukan melalui pengamatan menggunakan *Metallurgical Microscope* OLYMPUS BX51MRF. Sebelum diamati, spesimen uji diberikan etsa sesuai dengan *ASM Metal Handbook volume 9*.

#### 3.7.3 Pengujian *X-Ray Diffraction*

Prinsip kerja pada pengujian XRD adalah perbedaan intensitas sinar-X antara material yang dipancarkan sinar-X dengan intensitas sinar yang ditransmisikan. Sinar yang ditransmisikan akan memiliki intensitas yang lebih rendah dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan adanya penyerapan oleh material tersebut. Berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan data fasa yang terbentuk dari paduan hasil coran.

---

### 3.7.4 Pengujian Kekerasan

Pada penelitian ini dilakukan pengujian kekerasan untuk mengetahui kekerasan paduan sebelum dan setelah proses perlakuan panas *solution treatment* dan *artificial aging*. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Vickers sesuai dengan standar ASTM E92-17. Spesimen dipreparasi hingga permukaannya halus, kemudian dilakukan indentasi dengan indenter berbentuk piramida intan dengan sudut  $136^\circ$  dan beban 30 kgf serta waktu tahan selama 10 detik.

### 3.7.5 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry*

Pengujian *Differential Scanning Calorimeter* atau yang biasa disingkat dengan DSC, merupakan sebuah alat yang dapat mengukur kalor yang terserap atau dikeluarkan dari sebuah material saat material tersebut dipanaskan dan didinginkan pada rentang temperatur transformasi. Sampel material yang diuji berukuran sangat kecil (beberapa milligram). Puncak endoterm dan eksoterm muncul saat sampel menyerap atau mengeluarkan energy akibat adanya transformasi. Sehingga, dapat diukur temperatur awal, akhir, serta puncak dari perubahan fasa material yang diuji. Pada paduan *Shape Memory Alloy* (SMA), pengujian DSC bertujuan untuk mencari transformasi temperatur  $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$  dan  $A_f$ .

### 3.8 Jadwal Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama 4 bulan, yaitu dimulai pada Februari 2022 sampai Juni 2022 dengan jadwal penelitian yang digunakan adalah pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

**Tabel 3. 1** Jadwal penelitian

Kegiatan	Bulan																		
	Maret				April				Mei				Juni						
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			
Studi Literatur																			
Bimbingan																			
Persiapan Alat dan Bahan																			
Pengujian Komposisi																			
Perlakuan Panas																			
Pengujian XRD																			
Pengujian Metalografi																			
Pengujian DSC																			
Pengujian Kekerasan																			
Penyusunan Laporan Akhir																			

### 3.9 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.2 Untuk mendapatkan data yang komprehensif. Sebagai berikut:

**Tabel 3. 2** Rancangan penelitian

Nama Spesimen	Perlakuan Panas		Metode Pengujian				
	<i>Holding Time Up Quenching</i>	<i>Artificial Aging</i>	OES	XRD	Metalografi	Kekerasan	DSC
<i>As Cast</i>	-	-	✓	✓	✓	✓	-
<i>As Cast (Homogenizing)</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>As Cast (Annealing)</i>	-	-	-	-	-	-	-
UQ15	15 Menit		-	✓	✓	✓	-
UQ20	20 Menit		-	✓	✓	✓	-
UQ25	25 Menit		-	✓	✓	✓	✓
UQ15A	15 Menit		-	✓	✓	✓	-
UQ20A	20 Menit	200°C / 2 jam / Udara	-	✓	✓	✓	-
UQ25A	25 Menit		-	✓	✓	✓	-

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Hasil pengujian komposisi kimia pada spesimen paduan Cu-16,8Zn-6,99Al diperoleh dengan menggunakan pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Pengujian komposisi kimia dilakukan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Berikut adalah hasil komposisi yang didapat dari pengujian ini ditunjukkan pada Tabel 4.1.

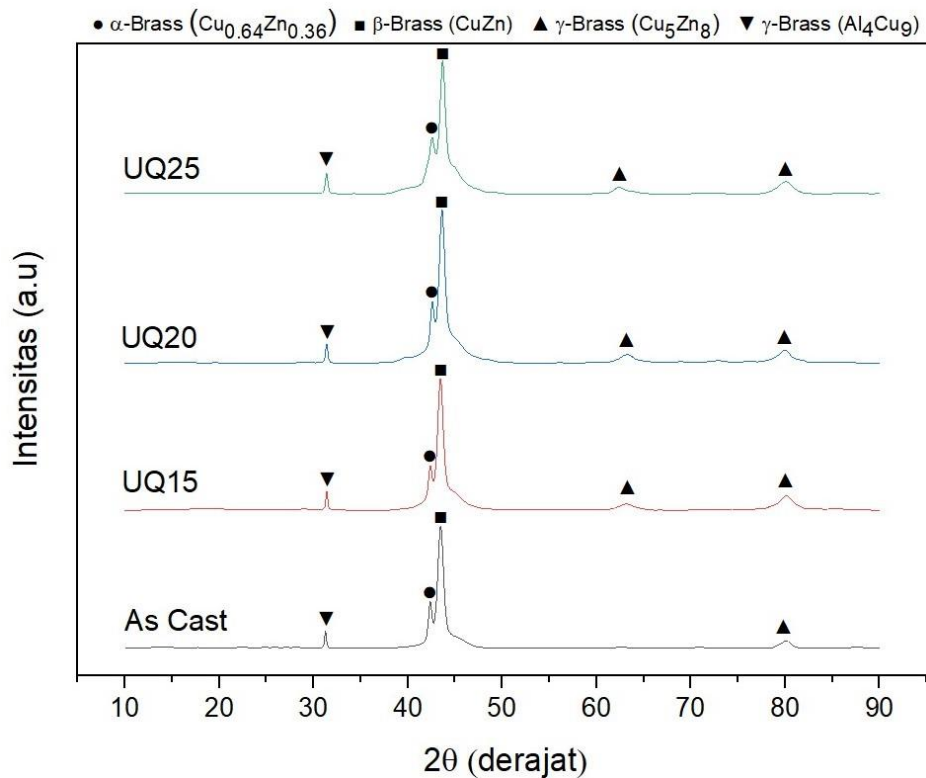
**Tabel 4. 1** Hasil pengujian komposisi paduan Cu-Zn-Al

Keterangan	Komposisi		
	Cu (%)	Zn (%)	Al (%)
<i>ASM Handbook</i> Vol.2	<i>Balance</i>	10-30	5-10
Hasil Pengujian OES	<i>Balance</i>	16,8	6,99

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia tersebut, maka paduan Cu-Zn-Al dinamakan Cu-16,8Zn-6,99Al. Komposisi tersebut termasuk ke dalam *range* komposisi *shape memory alloy* Cu-Zn-Al sesuai dengan *ASM Handbook* Vol.2.

### 4.2 Hasil Pengujian XRD Cu-16,8Zn-6,99Al Alloy

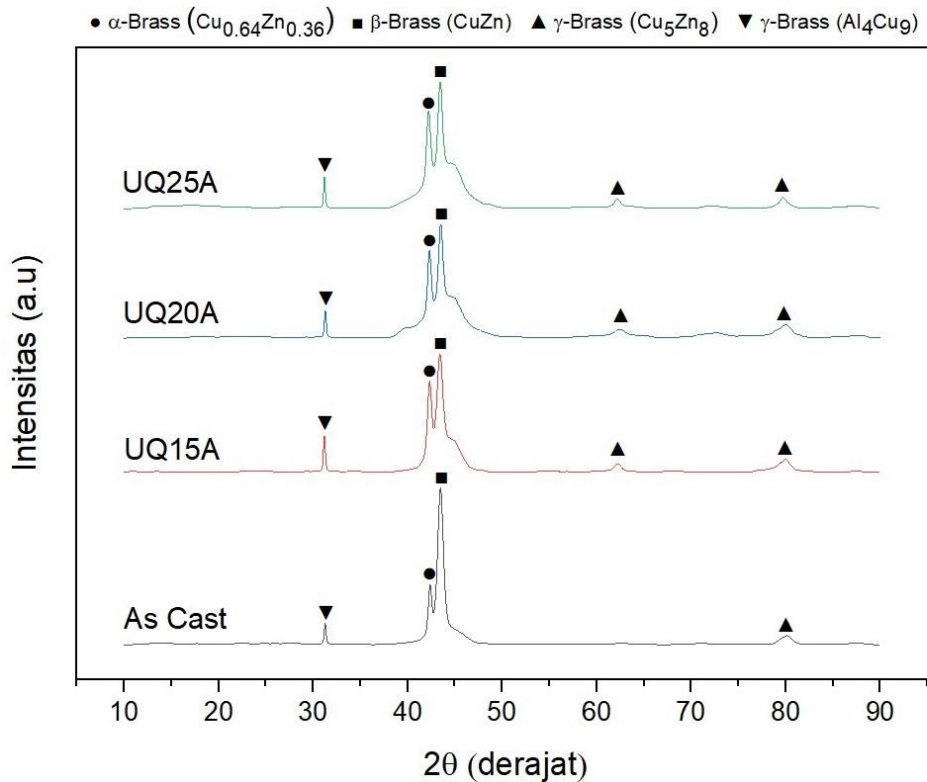
Hasil pengujian XRD pada spesimen paduan Cu-16,8Zn-6,99Al diperoleh dengan menggunakan pengujian *X-Ray Diffraction* PANalytical milik Divisi Karakteristik Material DTMM ITS. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan fasa dan senyawa yang terbentuk serta struktur Kristal dari paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. Terdapat beberapa sampel spesimen yang diuji XRD, diantaranya *As Cast*; spesimen dengan perlakuan *solution treatment* metode *holding time up-quenching* dengan media pendingin berupa oli, yaitu UQ15, UQ20, UQ25; dan spesimen dengan perlakuan *solution treatment* metode *holding time up-quenching* media pendingin *oilbath* yang diberi perlakuan *artificial aging* pada temperatur 200°C dengan *holding time* 2 jam, yaitu UQ15A, UQ20A, dan UQ25A. Hasil pengujian kemudian dilakukan analisa menggunakan aplikasi *High Score Plus* untuk membandingkan *peak* dengan database dari *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Berikut adalah hasil pengujian XRD spesimen *As Cast* dan spesimen dengan perlakuan *solution treatment* metode *holding time up-quenching* dengan media pendingin berupa oli, yaitu UQ15, UQ20, dan UQ25 ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut.



**Gambar 4. 1** Hasil pengujian XRD dengan perlakuan *solution treatment* metode *holding time up-quenching*

Dari hasil pengujian XRD pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2, dapat dilihat bahwa pada spesimen *as cast* mempunyai *peak* yang teridentifikasi sebagai fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ . Fasa  $\alpha$  ( $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$ ) ditunjukkan oleh *peak* yang terletak pada sudut  $2\theta$   $42,325^\circ$ . Hal ini sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333. Fasa  $\alpha$  ini memiliki struktur kristal berbentuk kubik. Fasa  $\beta$  (CuZn) juga ditunjukkan pada hasil XRD spesimen *as cast* pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. *Peak* fasa  $\beta$  ini teridentifikasi pada sudut  $2\theta$   $43,473^\circ$ . Hal ini sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231. Struktur kristal dari fasa ini adalah kubik. Selain fasa  $\alpha$  dan  $\beta$ , fasa  $\gamma$  juga teridentifikasi pada hasil pengujian XRD. Fasa  $\gamma$  yang terbentuk adalah fasa  $\gamma_1$  ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) dan  $\gamma_2$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ ). *Peak* fasa  $\gamma_1$  ini teridentifikasi pada sudut  $2\theta$   $79,417^\circ$ . Hal tersebut sesuai dengan kode referensi 00-025-1228. Sementara *peak* fasa  $\gamma_2$  berada pada sudut  $2\theta$   $30,801^\circ$  sesuai dengan kode referensi 00-024-0003. Fasa  $\gamma$  ini memiliki struktur kristal kubik.

Untuk spesimen UQ15, UQ20, dan UQ25, hasil pengujian XRD memperlihatkan *peak* yang teridentifikasi menunjukkan adanya fasa  $\alpha$  ( $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$ ) ditunjukkan oleh *peak* yang terletak pada sudut  $2\theta$   $42,325^\circ$ . Hal ini sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333. Fasa  $\alpha$  ini memiliki struktur kristal berbentuk kubik. Fasa  $\beta$  (CuZn) juga ditunjukkan pada hasil XRD pada Gambar 4.1 *peak* fasa  $\beta$  ini teridentifikasi pada sudut  $2\theta$   $43,473^\circ$  Hal ini sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231. Fasa  $\beta$  ini memiliki struktur kristal berbentuk kubik. Fasa  $\gamma$  yang terbentuk adalah fasa  $\gamma_1$  ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) dan  $\gamma_2$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ ). *Peak* fasa  $\gamma_1$  ini teridentifikasi pada sudut  $2\theta$   $79,417^\circ$ . Hal tersebut sesuai dengan kode referensi 00-025-1228. Sementara *peak* fasa  $\gamma_2$  berada pada sudut  $2\theta$   $30,801^\circ$  sesuai dengan kode referensi 00-024-0003. Fasa  $\gamma$  ini memiliki struktur kristal kubik.



**Gambar 4. 2** Hasil pengujian XRD dengan perlakuan *artificial aging*

Dari hasil pengujian XRD pada Gambar 4.2, dapat dilihat bahwa pada spesimen *artificial aging* mempunyai *peak* yang teridentifikasi sebagai fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ . untuk spesimen UQ15A, UQ20A, dan UQ25A, hasil pengujian XRD memperlihatkan *peak* yang teridentifikasi menunjukkan adanya fasa  $\alpha$  ( $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$ ) ditunjukkan oleh *peak* yang terletak pada sudut  $2\theta$   $42,325^\circ$ . Hal ini sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333. Fasa  $\alpha$  ini memiliki struktur kristal berbentuk kubik. Fasa  $\beta$  (CuZn) juga ditunjukkan pada hasil XRD pada Gambar 4.1 *peak* fasa  $\beta$  ini teridentifikasi pada sudut  $2\theta$   $43,473^\circ$  Hal ini sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231. Fasa  $\beta$  ini memiliki struktur kristal berbentuk kubik. Fasa  $\gamma$  yang terbentuk adalah fasa  $\gamma_1$  ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) dan  $\gamma_2$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ ). *Peak* fasa  $\gamma_1$  ini teridentifikasi pada sudut  $2\theta$   $79,417^\circ$ . Hal tersebut sesuai dengan kode referensi 00-025-1228. Sementara *peak* fasa  $\gamma_2$  berada pada sudut  $2\theta$   $30,801^\circ$  sesuai dengan kode referensi 00-024-0003. Fasa  $\gamma$  ini memiliki struktur kristal kubik.

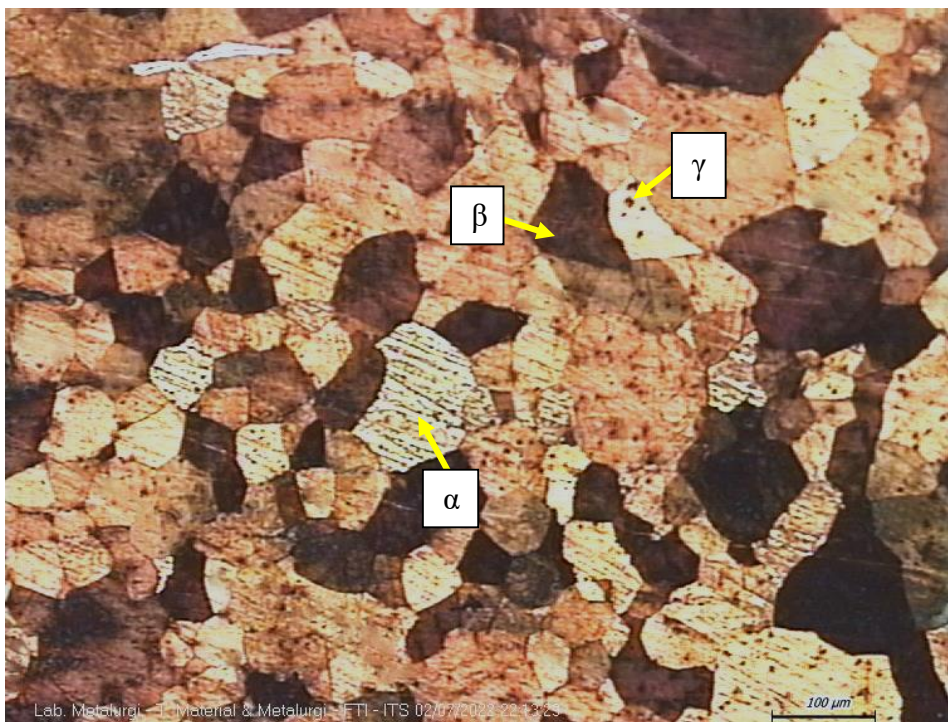
Berdasarkan Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 untuk pengujian XRD pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al terdapat 3 fasa yang teridentifikasi, yaitu fasa  $\alpha$  ( $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$ ), fasa  $\beta$  (CuZn), fasa  $\gamma_1$  ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) dan fasa  $\gamma_2$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ ). Fasa  $\gamma$  ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) terbentuk akibat dekomposisi fasa  $\beta$  pada temperatur  $427^\circ\text{C}$  diagram biner Cu-Zn dengan laju pendinginan lambat. Sementara untuk fasa  $\gamma$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ ) terbentuk akibat dekomposisi fasa  $\beta$  pada temperatur  $565^\circ\text{C}$  diagram biner Cu-Al dengan laju pendinginan lambat (K. & Wayman, 1998). Selaras dengan penelitian Rizkivany pada 2020, adanya fasa  $\beta$  yang terdapat pada spesimen *as cast* dalam kondisi tanpa diberi perlakuan merupakan hasil dari kondisi pendinginan yang tidak ekuilibrium pada proses pengecoran (Ramadhani et al., 2020).

Untuk memperoleh fasa tunggal  $\beta$  pada temperatur kamar dibutuhkan perlakuan panas lanjutan seperti *solution treatment*. *Solution treatment* dilakukan dengan memanaskan spesimen dan ditahan dalam waktu tertentu pada temperatur di atas temperatur austenit untuk melarutkan dan memperoleh fasa tunggal  $\beta$ . Kemudian dilakukan pendinginan secara cepat agar fasa  $\beta$  bertransformasi menjadi fasa  $\beta'$  atau martensit (Institution Organization, 1991). Pada

penelitian ini proses *solution treatment* pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al berfungsi untuk menghasilkan fasa tunggal  $\beta$ , namun pada semua spesimen masih terdapat *peak* fasa  $\alpha$  dan fasa  $\gamma$ . Hal ini disebabkan karena fasa ini belum sepenuhnya larut dalam fasa  $\beta$  akibat faktor saat proses pemanasan, seperti waktu tahan yang terlalu singkat dan juga akibat proses pendinginan yang kurang cepat. Namun, dapat dilihat pada Gambar 4.1 hasil pengujian XRD terlihat bahwa pendinginan cepat dengan metode *up-quenching* tidak cukup cepat untuk mencegah munculnya fasa lain selain fasa  $\beta$ .

### 4.3 Hasil Pengujian Metalografi

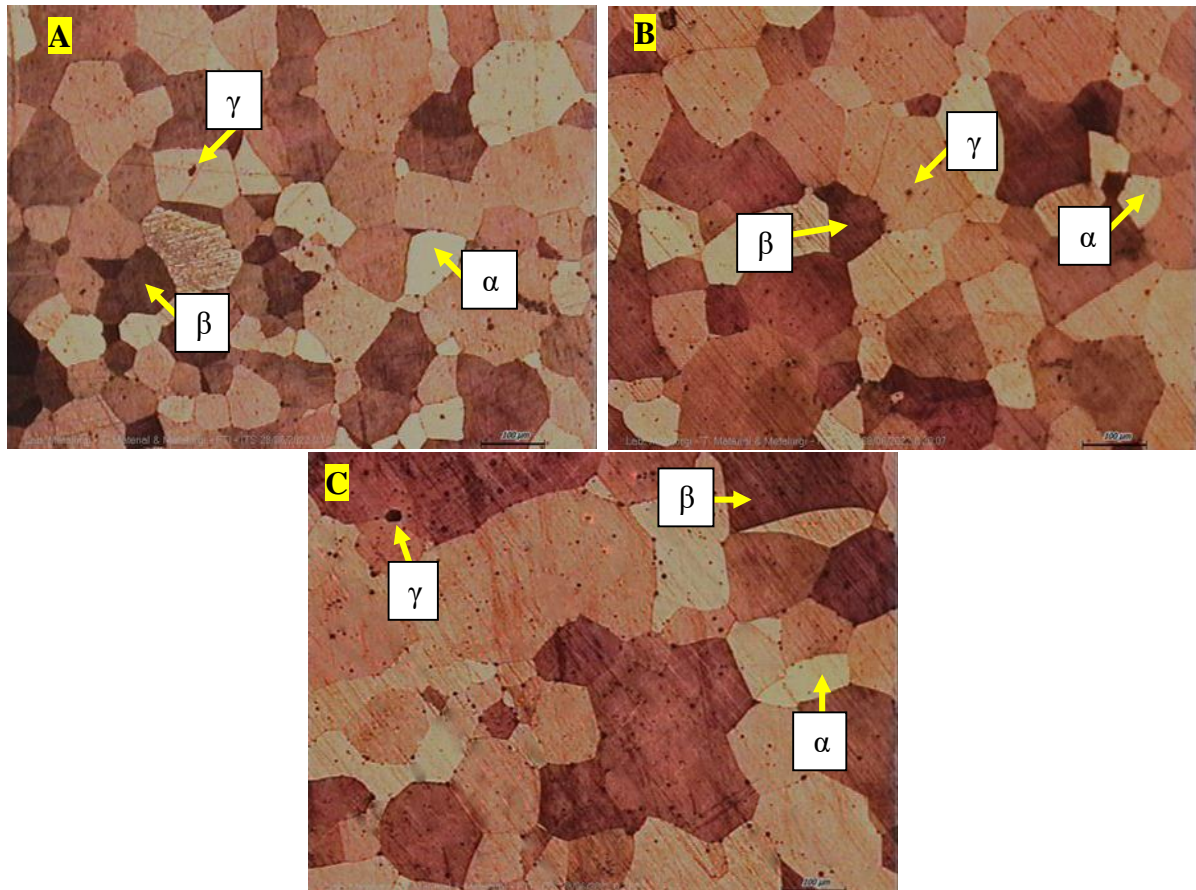
Hasil pengujian metalografi pada spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al diperoleh menggunakan alat uji *Metallurgical Microscope OLYMPUS BX51M-RF* yang dilakukan di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk pada setiap spesimen. Terdapat beberapa sampel spesimen yang diuji metalografi, diantaranya *As Cast*; spesimen dengan variasi *holding time up-quenching solution treatment* dengan media pendingin berupa oli, yaitu UQ15, UQ20, UQ25; dan spesimen dengan variasi *holding time up-quenching solution treatment* media pendingin oli yang diberi perlakuan *artificial aging* pada temperatur 200°C dengan *holding time* 2 jam, yaitu UQ15A, UQ20A, dan UQ25A. Selanjutnya spesimen yang akan diuji metalografi dilakukan preparasi spesimen melalui proses *grinding* dan *polishing* kemudian diberi pengetsaan dengan cara dicelup pada larutan etsa khusus paduan Cu-Zn dengan komposisi 6,5 gr FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O, 48 ml *methanol*, dan 1 ml HCl. Berikut merupakan hasil pengujian metalografi yang telah dilakukan pada spesimen *as cast* paduan Cu-16,8Zn-6,99Al dapat dilihat pada Gambar 4.3.



**Gambar 4. 3** Hasil metalografi *as cast* Cu-16,8Zn-6,99Al perbesaran 100x

Gambar 4.3 di atas menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen *as cast* paduan Cu-16,8Zn-6,99Al dengan perbesaran 100x. Dapat dilihat pada gambar tersebut spesimen *as cast* terdapat 3 fasa yang terbentuk, yaitu  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ . Fasa-fasa ini juga

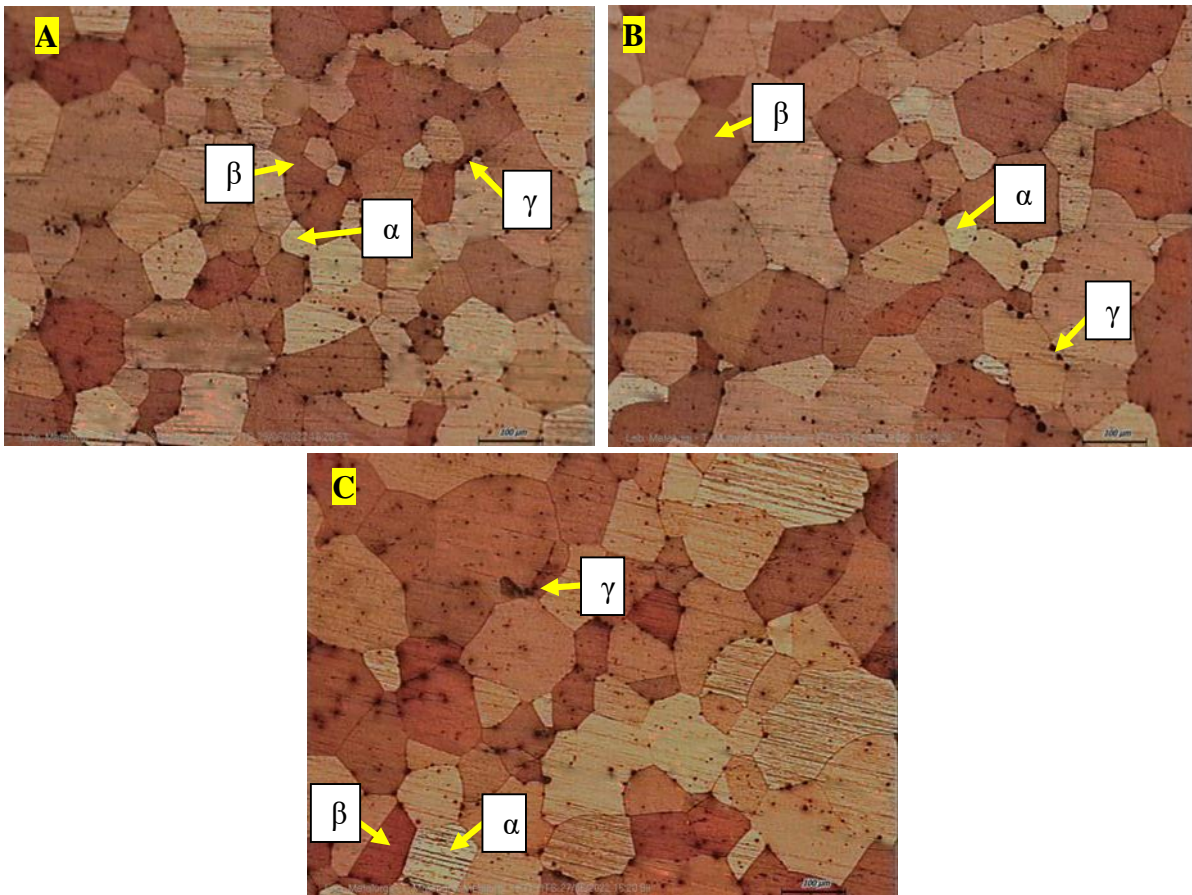
teridentifikasi pada pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD). Masing-masing fasa memiliki karakteristik yang berdeda-beda. Fasa  $\alpha$  memiliki warna yang terang, fasa  $\beta$  memiliki warna gelap, dan fasa  $\gamma$  yang diduga presipitat memiliki bentuk bulat berwarna hitam. Berdasarkan hasil pengamatan, dapat diketahui bahwa fasa  $\beta$  merupakan fasa yang lebih dominan dibandingkan dengan fasa  $\alpha$  dan fasa  $\gamma$ . Hal ini juga dapat dilihat pada grafik pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) pada spesimen *as cast* dimana *peak* fasa  $\beta$  yang memiliki intensitas lebih tinggi sehingga spesimen *as cast* bersifat keras juga sesuai dengan hasil pengujian kekerasan. Terdapatnya fasa  $\gamma$  yang terbentuk mengindikasikan awal dari terbentuknya presipitat yang akan tumbuh akibat proses *aging* (Asanović et al., 2004).



**Gambar 4. 4** Hasil pengujian metalografi pada spesimen *holding time up-quenching solution treatment*; (a) UQ15; (b) UQ20; (c) UQ25

Pada Gambar 4.4 di atas menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen *holding time up-quenching solution treatment* paduan Cu-16,8Zn-6,99Al dengan waktu tahan 15 menit, 20 menit, dan 25 menit dengan perbesaran 100x. Dapat dilihat bahwa pada hasil pengujian metalografi untuk spesimen *solution treatment*, terdapat fasa  $\alpha$ , fasa  $\beta$ , dan fasa  $\gamma$ . Sama halnya dengan fasa yang teridentifikasi pada spesimen *as cast*. Fasa-fasa tersebut juga teridentifikasi sesuai hasil pengujian XRD. Dapat dilihat pada Gambar 4.3 hasil pengujian metalografi pada spesimen *solution treatment* tidak ditemukan adanya fasa  $\beta'$  yang mengidentifikasi fasa *twinned martensite* yang terbentuk. Hal ini sesuai dengan penelitian oleh Sampath 2007 menunjukkan pada Cu-16,8Zn-6,99Al alloy memiliki transformasi temperatur martensit yang berada di bawah temperatur ruang (Sampath, 2007). Hal ini membuat proses pendinginan tidak mencapai *critical cooling rate* pembentukan martensit. Hal ini selaras dengan hasil pengujian DSC yang tidak memiliki *peak* transformasi martensit yang terbentuk dan dengan

menggunakan dua persamaan perhitungan temperatur transformasi *martensite start* diperoleh temperatur transformasi berada di bawah  $0^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 4. 5** Hasil pengujian metalografi pada spesimen *artificial aging*;  
(a) UQ15A; (b) UQ20A; (c) UQ25A

Pada Gambar 4.5 di atas menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen *artificial aging* temperatur  $200^{\circ}\text{C}$  pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al dengan waktu tahan 2 jam dengan perbesaran 100x. Dapat dilihat bahwa pada hasil pengujian metalografi untuk spesimen *solution treatment*, terdapat fasa  $\alpha$ , fasa  $\beta$ , dan fasa  $\gamma$ . Sama halnya dengan fasa yang teridentifikasi pada spesimen *as cast*. Fasa-fasa tersebut juga teridentifikasi sesuai hasil pengujian XRD. Dapat dilihat pada Gambar 4.4 hasil pengujian metalografi pada spesimen *artificial aging* tidak ditemukan adanya fasa  $\beta'$  yang mengidentifikasi fasa *twinned martensite* yang terbentuk. Hal tersebut serupa dengan spesimen *solution treatment* disebabkan karena temperatur transformasi martensit berada dibawah temperatur ruang (Sampath, 2007). Hal ini selaras dengan hasil pengujian DSC yang tidak memiliki *peak* transformasi martensit yang terbentuk dan dengan menggunakan dua persamaan perhitungan temperatur transformasi *martensite start* diperoleh temperatur transformasi berada di bawah  $0^{\circ}\text{C}$ . Pada spesimen *artificial aging*, fasa  $\gamma$  tumbuh di batas butir hal ini terjadi dikarenakan proses pemanasan yang relatif lama pada proses *artificial aging* yang memungkinkan terbentuknya fasa  $\gamma$  yang lebih banyak. Munculnya fasa  $\gamma$  pada proses *artificial aging* juga terjadi pada penelitian Saha 2019, terdapatnya presipitat ini menimbulkan terjadinya fenomena *pinning* di perbatasan antar fasa. Hal ini selaras dengan hasil pengujian kekerasan pada spesimen *artificial aging* yang meningkat dibandingkan dengan spesimen *solution treatment* (Saha et al., 2019).

**Tabel 4. 2** Ukuran butir spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al

Spesimen	Diameter Butir ( $\mu\text{m}$ )
UQ15	121,152
UQ20	132,644
UQ25	140,493
UQ15A	122,907
UQ20A	132,470
UQ25A	142,255

Tabel 4.2 menunjukkan ukuran butir pada spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al untuk spesimen *holding time up-quenching solution treatment* dan *artificial aging*. Dapat dilihat pada spesimen *solution treatment*, yaitu UQ15, UQ20, dan UQ25 menunjukkan diameter batas butir yang semakin bertambah besar seiring dengan bertambahnya waktu tahan *up-quenching*. Hal ini sesuai dengan percobaan Stosic pada 2017 yang menunjukkan bahwa dengan bertambahnya waktu tahan *up-quenching*, batas butir pada spesimen semakin bertambah besar (Stosic, 2017). Fenomena ini berkaitan dengan pertumbuhan butir, yaitu semakin tinggi temperatur pemanasan dan waktu pemanasan maka energi yang didapat selama pertumbuhan butir semakin besar dan didapatkan ukuran butir yang lebih besar (Rohmah, 2021).

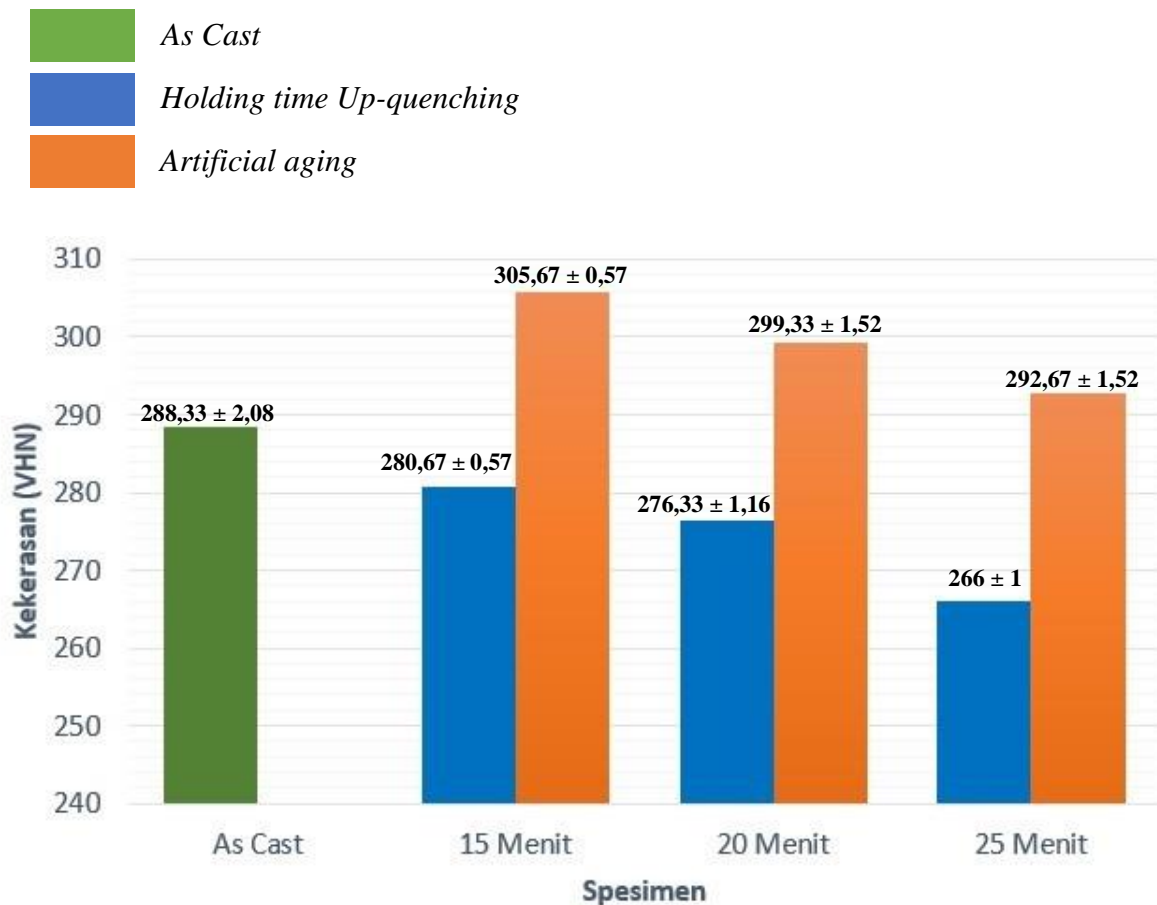
Dapat dilihat pada Tabel 4.2, untuk spesimen *artificial aging*, yaitu UQ15A, UQ20A, dan UQ25A menunjukkan ukuran butir yang relatif sama dan tidak mengalami pertumbuhan yang signifikan dibandingkan spesimen *solution treatment*. Hal ini sesuai dengan penelitian oleh Saha pada 2019 untuk paduan Cu-Zn-Al, tidak adanya pertumbuhan butir pada spesimen *artificial aging* yang signifikan disebabkan oleh mekanisme *pinning* akibat terbentuknya fasa  $\gamma$  yang diduga berupa presipitat saat mekanisme *artificial aging* (Saha et al., 2019).

#### 4.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan pada spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al diperoleh menggunakan metode pengujian *Vickers*. Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS menggunakan alat *Universal Hardness Testing HBRV* dengan indenter berbentuk *pyramid* dan diberikan pembebanan sebesar 30 kgf selama 10 detik. Standar yang digunakan pada pengujian ini adalah ASTM E92-17. Terdapat beberapa sampel spesimen yang diuji kekerasan, diantaranya *As Cast*; spesimen perlakuan *solution treatment* metode *holding time up-quenching* dengan media pendingin oli, yaitu UQ15, UQ20, UQ25; dan spesimen dengan perlakuan *artificial aging* pada temperatur 200°C dengan *holding time* 2 jam, yaitu UQ15A, UQ20A, dan UQ25A. Pada pengujian kekerasan ini dilakukan indentasi pada spesimen uji sebanyak 3 titik indentasi di area yang berbeda. Kemudian dilakukan perhitungan rata-rata nilai kekerasan dari 3 titik indentasi tersebut. Pada Tabel 4.3 Merupakan hasil pengujian kekerasan.

**Tabel 4. 3** Nilai kekerasan paduan Cu-16,8Zn-6,99Al

Spesimen	Nilai Kekerasan (VHN)
<i>As Cast</i>	288,33 $\pm$ 2,08
UQ15	280,67 $\pm$ 0,57
UQ20	276,33 $\pm$ 1,16
UQ25	266 $\pm$ 1
UQ15A	305,67 $\pm$ 0,57
UQ20A	299,33 $\pm$ 1,52
UQ25A	292,67 $\pm$ 1,52



**Gambar 4. 6** Grafik nilai kekerasan paduan Cu-16,9Zn-6,88Al

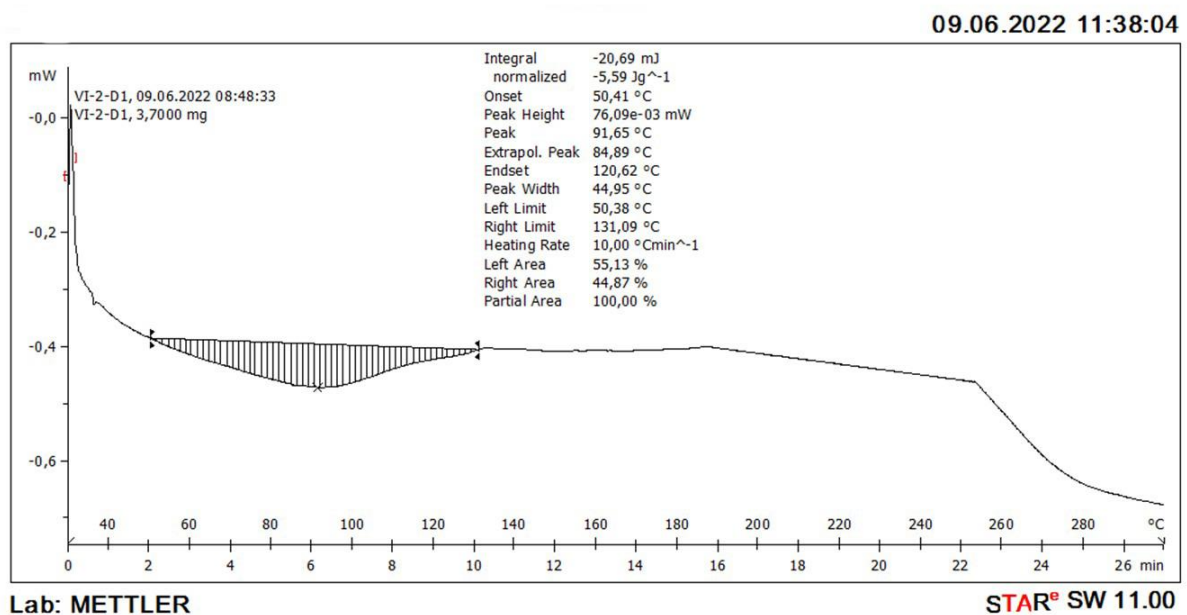
Berdasarkan hasil pengujian kekerasan pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.6 di atas, diperoleh nilai kekerasan dari tiap-tiap spesimen. Dapat dilihat untuk spesimen *as cast* (spesimen sebelum diberi perlakuan panas) memiliki kekerasan sebesar  $288,33 \pm 2,08$  VHN dan nilai kekerasan tertinggi dimiliki oleh spesimen proses *solution treatment up-quenching* variasi *holding time* 15 menit dengan proses *artificial aging* pada temperatur  $200^{\circ}\text{C}$  selama 2 jam sebesar  $305,67 \pm 1,73$  VHN. Dilihat pada grafik kekerasan, terjadi penurunan kekerasan dari spesimen *as cast* menuju spesimen *solution treatment up-quenching* variasi *holding time* 15 menit sebesar  $280,67 \pm 0,57$  VHN. Selanjutnya terjadi penurunan kekerasan seiring dengan meningkatnya *holding time* pada spesimen *up-quenching*. Untuk spesimen UQ20 memiliki nilai kekerasan sebesar  $276,33 \pm 1,16$  VHN dan untuk UQ25 nilai kekerasannya sebesar  $266 \pm 1$  VHN. Berdasarkan pada grafik di atas, menurunnya kekerasan pada spesimen *solution treatment* terjadi akibat adanya pengaruh ukuran butir pada spesimen. Semakin besar butir maka nilai kekerasan akan menurun (Matyunin et al., 2019). Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan Matyunin 2019 mengenai efek perubahan ukuran butir terhadap nilai kekerasan pada logam berbasis *copper*. Sementara itu, terjadinya penurunan nilai kekerasan pada spesimen *solution treatment* seiring dengan meningkatnya *holding time up-quenching* terjadi akibat *grain growth* yang membesar seiring meningkatnya waktu tahan. spesimen dengan ukuran butir yang lebih kecil memiliki nilai kekerasan yang lebih besar (Newey, 1990). Hal ini selaras dengan hasil metalografi pada spesimen UQ15, UQ20, dan UQ25 dimana mikro struktur pada spesimen UQ15 memiliki ukuran butir yang lebih kecil dibandingkan dengan spesimen *solution treatment* lainnya dapat dilihat pada Tabel 4.2.



Kemudian, spesimen dengan tambahan perlakuan *artificial aging* memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi daripada spesimen *solution treatment up-quenching* tanpa perlakuan *artificial aging*. Nilai kekerasan tertinggi yang diperoleh dari pengujian spesimen *artificial aging* adalah  $305,67 \pm 0,57$  untuk spesimen UQ15A. *Artificial aging* merupakan suatu proses *solution heat treatment* yang dapat meningkatkan kekerasan serta kekuatan dari suatu material. Meningkatnya kekerasan pada spesimen terjadi karena pada proses *artificial aging* terjadi proses *precipitation hardening* yang membentuk presipitat sehingga meningkatkan sifat mekanik seperti kekerasan spesimen. Fenomena kenaikan nilai kekerasan pada spesimen *artificial aging* ini selaras dengan penelitian Saha pada 2019 untuk paduan Cu-Zn-Al yang meningkat akibat terbentuknya fasa  $\gamma$  (Saha, 2019).

#### 4.5 Hasil Pengujian *Differential Scanning Calorimetry*

Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) bertujuan untuk mengetahui temperatur transformasi paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. Pengujian DSC dilakukan di Laboratorium CDEA Farmasi Universitas Surabaya. Parameter uji yang diberikan adalah menggunakan rentang temperatur antara  $30^{\circ}\text{C}$  -  $300^{\circ}\text{C}$  dengan kenaikan  $10^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ . Berikut dapat dilihat hasil pengujian DSC paduan Cu-16,8Zn-6,99Al pada Gambar 4.7 di bawah ini.



**Gambar 4.7** Hasil pengujian DSC

Gambar 4.7 menunjukkan hasil pengujian DSC dari paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. Dapat dilihat bahwa reaksi endotermis terjadi, yang ditunjukkan dari *peak* yang terbentuk pada temperatur  $50,38^{\circ}\text{C}$ . Temperatur transformasi didapatkan dari *peak* tersebut yaitu *Austenite Start* ( $A_s$ ) dan *Austenite Finish* ( $A_f$ ).  $A_s$  diperoleh pada temperatur  $50,38^{\circ}\text{C}$ , sedangkan  $A_f$  diperoleh pada temperatur  $131,09^{\circ}\text{C}$ . Namun pada grafik tersebut, tidak ditunjukkan adanya reaksi eksotermis yang menunjukkan adanya temperatur transformasi untuk martensit pada rentang temperatur pengujian DSC antara  $30^{\circ}\text{C}$  -  $300^{\circ}\text{C}$ . Hal ini juga sesuai dengan pengujian metalografi yang tidak ditemukannya martensit pada temperatur kamar. Ini dikarenakan temperatur transformasi *Martensite Start* ( $M_s$ ) paduan di bawah temperatur  $0^{\circ}\text{C}$ . Hal ini dibuktikan dengan Persamaan 4.1 di bawah menurut *ASM Metal Handbook Vol. 2* untuk mencari temperatur  $M_s$ .

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 66,9 (\text{at. \%Zn}) - 90,65 (\text{at. \%Al}) \dots\dots\dots(4.1)$$

Untuk menyelesaikan persamaan tersebut, diperlukan konversi wt.% menjadi at.%. Selanjutnya dapat dimasukkan ke dalam persamaan untuk mendapatkan nilai  $M_s$  sebagai berikut.

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 66,9 (14,98) - 90,65 (15,10)$$

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 1002,16 - 1368,82$$

$$M_s (\text{°C}) = -158,98$$

Selain dengan Persamaan 4.1 temperatur transformasi *Martensite Start* ( $M_s$ ) juga dapat dihitung melalui Persamaan 4.2 di bawah ini menurut Duerig T.W (Duerig & Melton, 1990).

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 66,9 [1,355(\text{at. \%Al}) + 1(\text{at. \%Zn})] \dots\dots\dots(4.2)$$

Untuk menyelesaikan persamaan tersebut, diperlukan konversi wt.% menjadi at.%. Selanjutnya dapat dimasukkan ke dalam persamaan untuk mendapatkan nilai  $M_s$  sebagai berikut.

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 66,9[1,35510 + 1(14,98)]$$

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 66,9[35,3979]$$

$$M_s (\text{°C}) = -156,12$$

**Tabel 4. 4** Transformasi temperature paduan Cu-16,8Zn-6,99Al

Spesimen	$M_s$ (°C)	$A_s$ (°C)	$A_f$ (°C)
Cu-16,8Zn-6,99Al	-158,98	50,38	131,09

Berdasarkan persamaan di atas, dapat diketahui temperatur transformasi martensit pada spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al berada di bawah temperatur kamar, yaitu pada rentang temperatur -158,98°C hingga -156,12°C. Hal ini sesuai dengan standar *ASM Metal Handbook Vol. 2* dimana rentang temperatur transformasi *shape memory alloy* pada rentang temperatur -180°C hingga 200°C.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variasi perlakuan *holding time* pada proses *up-quenching* untuk paduan Cu-16,8Zn-6,99Al berpengaruh pada ukuran butir. Semakin lama *holding time* pada proses *up-quenching* semakin besar ukuran butir yang terbentuk pada struktur mikro. Ukuran butir terbesar yang diperoleh adalah pada spesimen UQ25 sebesar 140,493  $\mu\text{m}$  dan untuk ukuran butir terkecil terdapat pada spesimen UQ15 sebesar 121,152  $\mu\text{m}$ . Dengan meningkatnya ukuran butir pada spesimen, maka akan mengurangi nilai kekerasannya. Untuk nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada spesimen UQ15 sebesar  $280,67 \pm 0,57$  VHN dan kekerasan terkecil pada spesimen UQ25 sebesar  $266 \pm 1$ . Semakin lama waktu tahan pada proses *up-quenching* semakin rendah nilai kekerasan yang dihasilkan.
2. Proses *artificial aging* berpengaruh pada struktur mikro paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. *Artificial aging* menunjukkan pertumbuhan fasa  $\alpha$  dan fasa  $\gamma$ . Fasa  $\gamma$  semakin tumbuh di daerah batas butir pasca diberikan perlakuan *artificial aging* dan menyebabkan kekerasan paduan bertambah. Nilai kekerasan tertinggi pada spesimen UQ15A yaitu sebesar  $305,67 \pm 0,57$  VHN dengan ukuran butir 122,907  $\mu\text{m}$ .

### 5.2 Saran

Adapun saran dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan komposisi unsur paduan Cu-Zn-Al lebih teliti agar mendapatkan temperatur transformasi yang sesuai.
2. Melakukan penuangan pada  *mold* dengan waktu yang cepat untuk mendapatkan hasil pengecoran yang baik.
3. Menggunakan *furnace* dengan temperatur yang stabil supaya diperoleh data yang sesuai.
4. Temperatur dan *holding time* pada proses *solution treatment* perlu dioptimalkan guna memperoleh fasa tunggal  $\beta$ .
5. Melakukan preparasi pengujian XRD lebih teliti agar hasil pengujiannya lebih akurat.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Alaneme. (2021). *Martensite aging phenomena in Cu-based alloys: Effects on structural transformation, mechanical and shape memory properties: A critical review*. 12. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00760>
- Asanović, V. (2021). *Effect of chemical composition and quenching media on recoverable strain in Cu e Zn e Al alloys*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.098>
- Asanović, V., Delijić, K., & Leka, Z. (2004). Aging effects in Cu-Zn-Al shape memory alloy. *Materials Science Forum*, 453–454, 187–192. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.453-454.187>
- Avner, S. H. (n.d.). *INTRODUCTION TO PHYSICAL Second Edition*.
- 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), 1–6. [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(1\).01008](https://doi.org/10.21272/jnep.9(1).01008)
- Baldwin, W. (2004). *Metallography and Microstructures 2004 ASM*.
- Callister, W. . (2010). *Materials Science and Engineering An Introduction*.
- Callister, W. . (2014). *Materials science*.
- D.E.Hodgson. (1990). Shape Memory Alloys (SMAs). *Smart Structures Theory*, 2, 194–304. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139025164.004>
- Duerig, T. W., & Melton, K. N. (1990). Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. In *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-04566-5>
- Edition, F., & Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing*.
- Furuya, Y., & Shimada, H. (1991). Shape memory actuators for robotic applications. *Materials and Design*, 12(1), 21–28. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(91\)90088-L](https://doi.org/10.1016/0261-3069(91)90088-L)
- Gouda, E. S. (2014). Classifications, Characterization and Applications of Metallic Alloys. *International Journal of Physics and Astronomy*, 2(2), 17–34.
- Institution Organization, A. (1989). *ASM METALS HANDBOOK VOLUME 3 Alloy Phase Diagrams*.
- International, A. (1991). *ASM Handbook Volume 4 Heat Treating*. 289–322. <https://doi.org/10.1201/9781315120577>
- Institution Organization, A. (1991). *The Materials Information Company*.
- International, A. (1998). *ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. 157(7), 583–588. <https://doi.org/10.1007/s004310050884>
- International, A. (2004). *ASM Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures Handbook*. 9, 2733. <http://www.worldcat.org/oclc/42469467>
- Ishihara, M., Sato, H., Tateishi, H., Kawagoe, T., Shimatani, Y., Kurisu, S., & Sakai, K. (1995). Intraortic Balloon Pumping as Adjunctive Therapy to Rescue Coronary Angioplasty After Failed Thrombolysis in Anterior Wall Acute Myocardial Infarction. *American Journal of Cardiology*, 76(1–2), 73–75. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(99\)80805-4](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(99)80805-4)
- K., O., & Wayman, C. M. (1998). General applications of SMA's and smart materials. *Shape Memory Materials*, 220–241.
- Kaufman. (2003). *Characterization of Material Volume 2*.
- Machado, L. G., & Lagoudas, D. C. (2008). *Modeling of SMAs*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8>
- Matyunin, V. M., Abusaif, N., & Marchenkov, A. Y. (2019). Influence of grains and grain boundaries on hardness values. *Journal of Physics: Conference Series*, 1399(4). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044002>

- Mehaddene, T. (2006). *Interplay of structural instability and lattice dynamics in Ni<sub>2</sub>MnAl shape memory alloys*.
- Muzakir, A. (2012). *Karakterisasi Material ; Rifan Hardian*.
- Ramadhani, M., Rochiem, R., & Rizkivany, L. (2020). Pengaruh Holding Time Proses Solution Treatment dan Variasi Media Pendingin pada Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys terhadap Efek Shape Memory dan Struktur Mikro. *Jurnal Teknik ITS*, 9(1). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i1.52139>
- Roell. (2009). Vickers hardness test. *Dictionary of Gems and Gemology*, 907–907. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-72816-0\\_22946](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72816-0_22946)
- Rohmah, M.-. (2021). Pengaruh Penempatan Dan Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik Dan Ketahanan Korosi Pada Modifikasi Baja Laterit a-588. *Metalurgi*, 36(1), 33. <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v36i1.579>
- Saha, G., Ghosh, M., Antony, A., & Biswas, K. (2019). Ageing Behaviour of Sc-Doped Cu–Zn–Al Shape Memory Alloys. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(2), 1569–1581. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3621-4>
- Sampath, V. (2007). Effect of thermal processing on microstructure and shape-memory characteristics of a copper-zinc-aluminum shape-memory alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(1), 9–14. <https://doi.org/10.1080/10407780601015808>
- Sreekumar, M., Nagarajan, T., Singaperumal, M., Zoppi, M., & Molfino, R. (2007). Critical review of current trends in shape memory alloy actuators for intelligent robots. *Industrial Robot*, 34(4), 285–294. <https://doi.org/10.1108/01439910710749609>
- Stosic. (2017). *Effects of Composition and Thermal Treatment of Cu-Al-Zn Alloys with Low Content of Al on their Shape-memory Properties 2*. *Experimental Procedure*. 20(5), 1425–1431.
- Zengin, R., & Kayal, N. (2010). *Structural and Morphological Investigations on Shape Memory CuZnAl Alloys*. 118(4).

## 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
0,7621	0,168	0,0699

#### 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

$$\begin{aligned}
 \text{Densitas rata-rata} &= \text{densitas Cu} \times \% \text{Cu} + \text{densitas Zn} \times \% \text{Zn} + \text{densitas Al} \times \% \text{Al} \\
 &= 6,918 + 1,136 + 0,186 \text{ g/cm}^3 \\
 &= 8,239 \text{ g/cm}^3
 \end{aligned}$$

#### 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

$$\begin{aligned}
 \text{Massa Cu} &= \% \text{Cu} \times \text{massa target} \\
 \text{Massa Zn} &= \% \text{Zn} \times \text{massa target}
 \end{aligned}$$

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

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*

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

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 Emission 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

LAPORAN HASIL PENGUJIAN  
REPORT ON THE TEST RESULT

Nomor Number	: 0476 /PL19/BJP/2022
-----------------	-----------------------

<b>PELANGGAN / Customer</b>		
1. Nama Name	: RIZA MUHAMMAD ALIFANDI - T. MATERIAL ITS	
2. Alamat Address	: Kampus ITS Sukolilo, Surabaya	
<b>BENDA UJI / Test Specimen</b>		
1. Tanggal Diterima Date of Received	: April 18, 2022	
2. Spesimen Uji Test Specimen	: CuZnAl Alloy	
3. Identifikasi Material Identification of Material	: -	
4. Proses Las /Posisi Las/Juru Las Weld Process/Position/Welder	: -	
5. Proyek Project	: -	
<b>PENGUJIAN / Testing</b>		
1. Tanggal Pengujian Date of Testing	: April 20, 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 Ketidak pastian Number of uncertainty	: -	-
7. Keterelusuran Traceability	: LK-022-IDN	-
<b>HASIL PENGUJIAN / Result of Testing</b>	: (Terlampir) (Attached)	
<b>DITERBITKAN TANGGAL Date of Issue</b>	: April 20, 2022	

Kalab. Uji Bahan  
Head of DT & NDT Laboratory



Hendri Budi Kumiyanto, SST., MT  
NIP. 199003072019031010

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 diujikan dalam pengujian ini  
This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above

Halaman  
1 dari 2



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)

**LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN**  
ATTACHMENT OF THE TEST RESULT

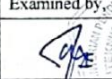
Nomor Number	: 0476 /PL19/BJP/2022
-----------------	-----------------------

No. SPK. 19-IV/PL19/BJP/2022

F.08-LUB-PPNS

CHEMICAL COMPOSITION TEST									
Identification	COMPOSITION (%)								
	Element	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
	Value	73.6	16.8	1.69	0.181	0.0002	<0.0002	0.146	0.0836
	Element	Si	Mg	Cr	Al	S	As	Ag	Co
	Value	0.446	<0.0005	<0.0005	>3.00	0.0010	0.0030	0.0147	0.0055
	Element	Bi	Cd	Sb	Zr	-	-	-	-
	Value	0.0111	0.0029	0.0299	0.0002	-	-	-	-

Surabaya, April 20, 2022

Examined by	Verified by
 Mulya Pur	 Hendri Budi K

**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 disumunkan 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  
2 dari 2



**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA  
LABORATORIUM UJI BAHAN**

**OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY RESULT**


No. SPK : 19-IV/PL19/BJP/2022 Penandaan : -  
Pelanggan : Riza M. Alifandi - T. Material ITS Material : CuZnAl  
Proyek : - Dimensi : 29x27x24mm  
Kepala Lab. : Hendri Budi K., S.ST., M.T. Heat No. : -  
Program : CU\_200 Keterangan : -

	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
1	73.6	16.8	1.72	0.187	0.0006	< 0.0002	0.148	0.0815
2	73.7	16.7	1.72	0.169	< 0.0001	< 0.0002	0.143	0.0838
3	73.5	16.9	1.62	0.187	< 0.0001	< 0.0002	0.147	0.0856
Ave	73.6	16.8	1.69	0.181	0.0002	< 0.0002	0.146	0.0836

	Si	Mg	Cr	Al	S	As	Ag	Co
1	0.453	< 0.0005	< 0.0005	> 3.00	0.0010	0.0033	0.0145	0.0064
2	0.444	< 0.0005	< 0.0005	> 3.00	0.0009	0.0032	0.0133	0.0044
3	0.441	< 0.0005	< 0.0005	> 3.00	0.0012	0.0023	0.0162	0.0056
Ave	0.446	< 0.0005	< 0.0005	> 3.00	0.0010	0.0030	0.0147	0.0055

	Bi	Cd	Sb	Zr
1	0.0030	0.0035	0.0430	< 0.0002
2	0.0188	0.0028	0.0191	< 0.0002
3	0.0115	0.0026	0.0277	0.0008
Ave	0.0111	0.0029	0.0299	0.0002

Surabaya, 4/20/2022

Diuji oleh:  Muharror

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

### 3. Hasil Uji Kekerasan

Keterangan	Indentasi (HV)			Rata-Rata (HV)	Standar Deviasi
	1	2	3		
As Cast	286	289	290	288,33	2,081
UQ15	281	281	280	280,67	0,577
UQ20	277	275	277	276,33	1,155
UQ25	267	265	266	266	1
UQ15A	305	306	306	305,67	0,577
UQ20A	301	298	299	299,33	1,527
UQ25A	294	293	291	292,67	1,527

### 4. PDF Card ICDD (XRD)

a.  $\alpha$ -brass ( $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$ ) ICDD 00-050-1333

#### **Name and formula**

Reference code: 00-050-1333

Compound name: Copper Zinc

Common name: a-brass

PDF index name: Copper Zinc

Empirical formula:  $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$

Chemical formula:  $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$

#### **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 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ): 8,44

Measured density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ): 8,43

Volume of cell ( $10^6 \text{ pm}^3$ ): 50,49

Z: 4,00

RIR: -

#### **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.

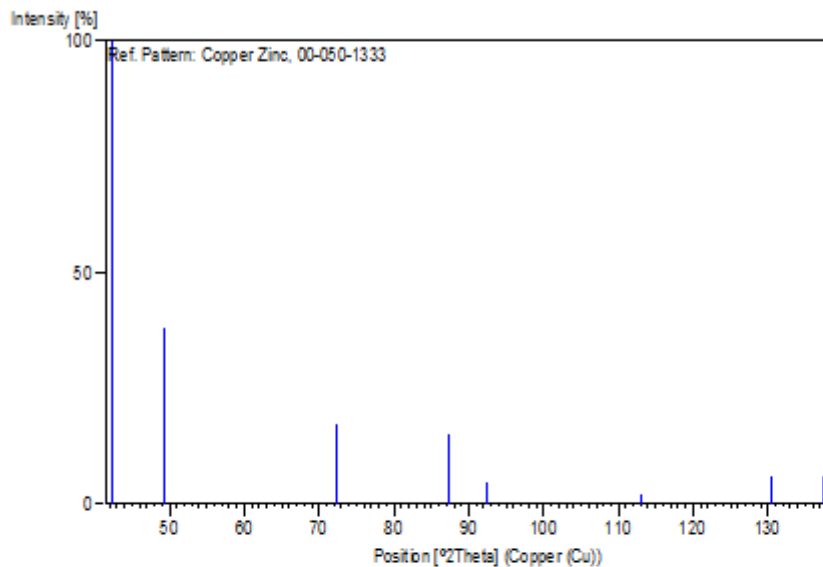
### References

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.  $\beta$ -brass (CuZn) ICDD 00-002-1231

### **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  
RIR: -

### **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.

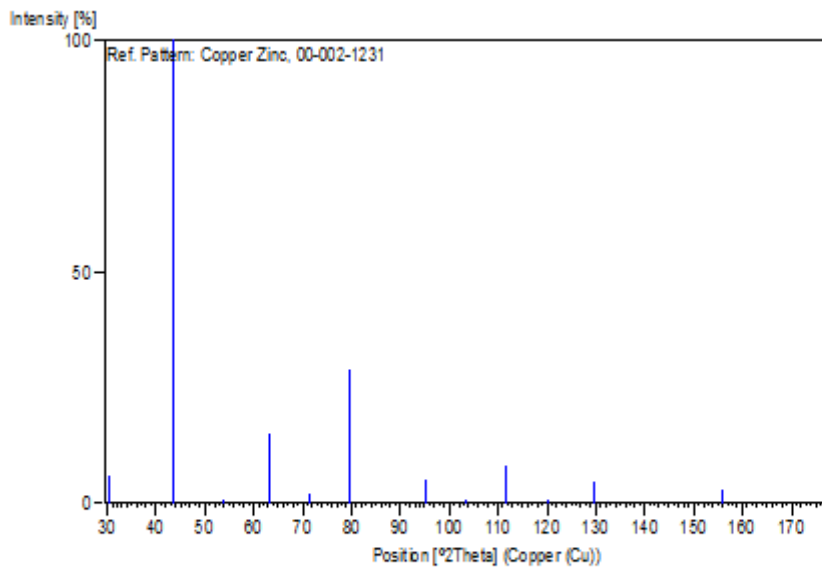
### **References**

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

#### **Name and formula**

Reference code: 00-025-1228

Compound name: Copper Zinc

Common name:  $\gamma$ -brass

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

RIR: -

### **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)

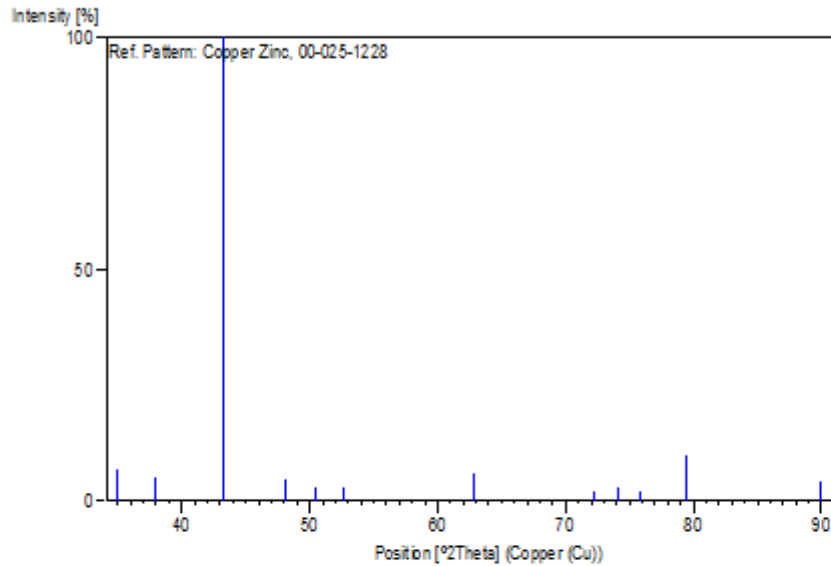
### **Peak list**

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.  $\gamma_2$ -brass ( $Al_4Cu_9$ )

#### Name and formula

Reference code: 00-024-0003

Compound name: Aluminum Copper  
PDF index name: Aluminum Copper

Empirical formula:  $Al_4Cu_9$   
Chemical formula:  $Cu_9Al_4$

#### 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  
 RIR: -

### **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**

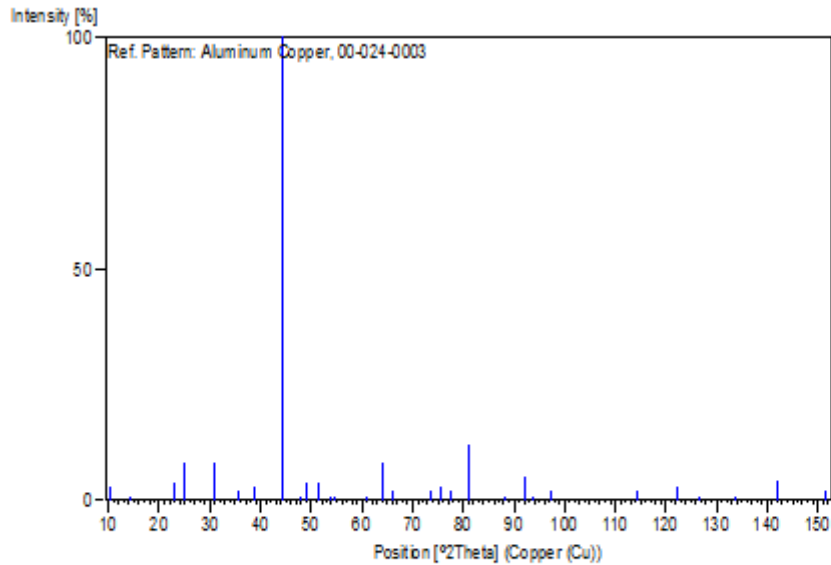
Primary reference: *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 11, 79, (1973)*  
 Unit cell: Heidenstam et al., *Acta Chem. Scand.*, **22**, 653, (1968)

### **Peak list**

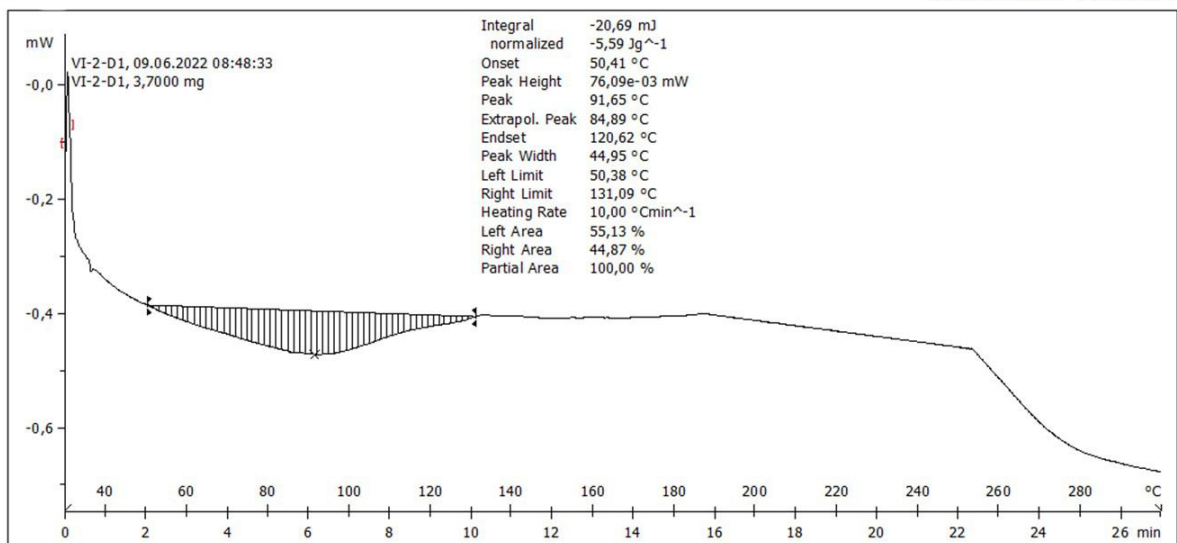
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	8,69881	10,161	3,0
2	1	1	0	6,15412	14,381	1,0
3	2	1	0	3,89030	22,841	4,0
4	2	1	1	3,55330	25,040	8,0
5	3	0	0	2,90060	30,801	8,0
6	2	2	2	2,51160	35,721	2,0
7	3	2	1	2,32590	38,681	3,0
8	3	3	0	2,05090	44,122	100,0
9	4	2	1	1,89900	47,862	1,0
10	3	3	2	1,85530	49,062	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



09.06.2022 11:38:04



Lab: METTLER

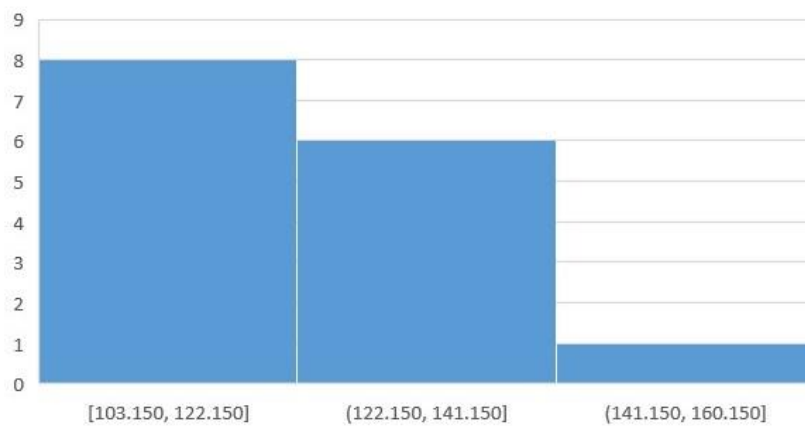
STAR<sup>®</sup> SW 11.00

5. Hasil Pengujian DSC Cu-16,8Zn-6,99Al

6. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen UQ15



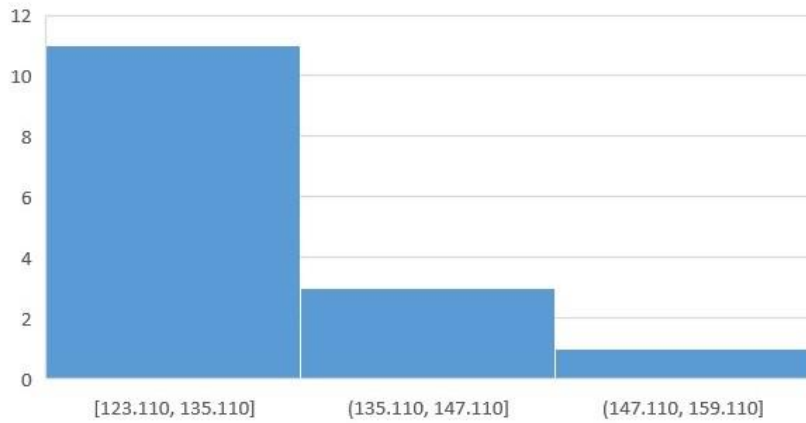
Persebaran Diameter Ukuran Butir



7. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen UQ20



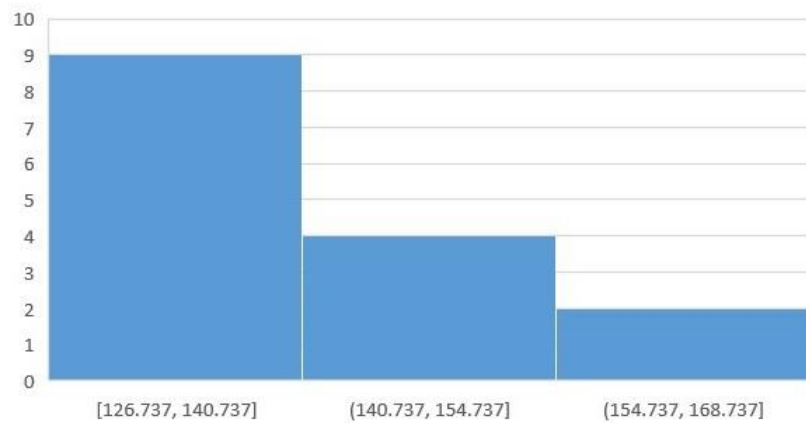
Persebaran Ukuran Diameter Butir



8. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen UQ25



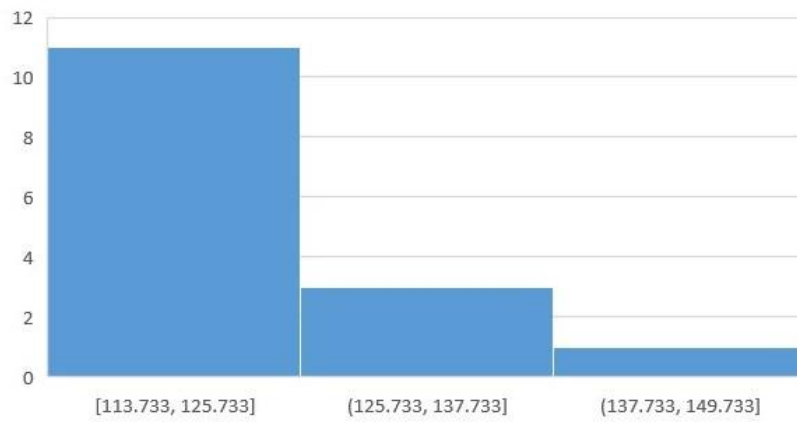
Persebaran Ukuran Diameter Butir



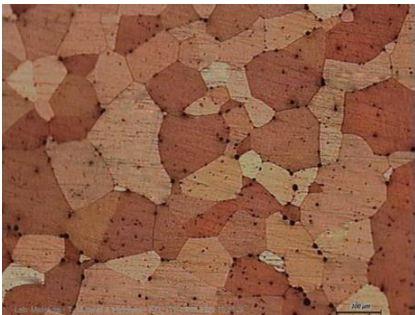
9. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen UQ15A



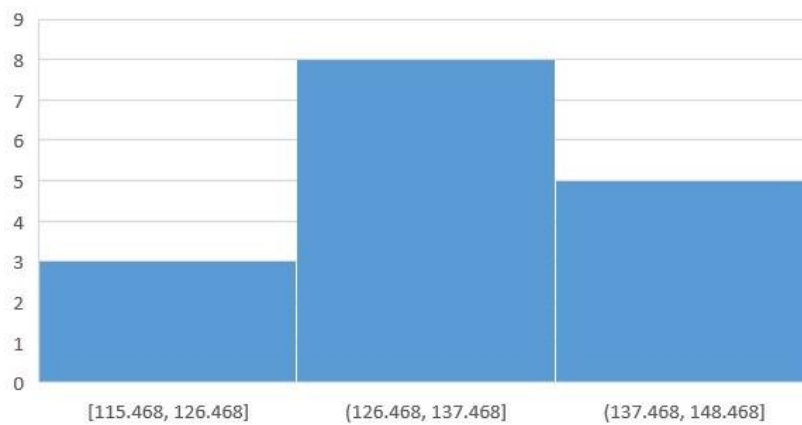
Persebaran Ukuran Diameter Butir



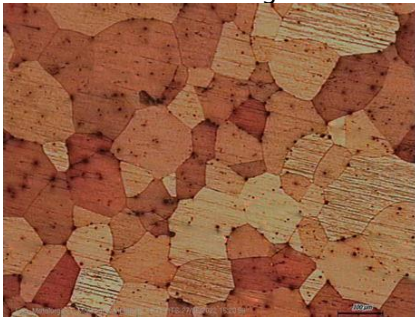
10. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen UQ20A



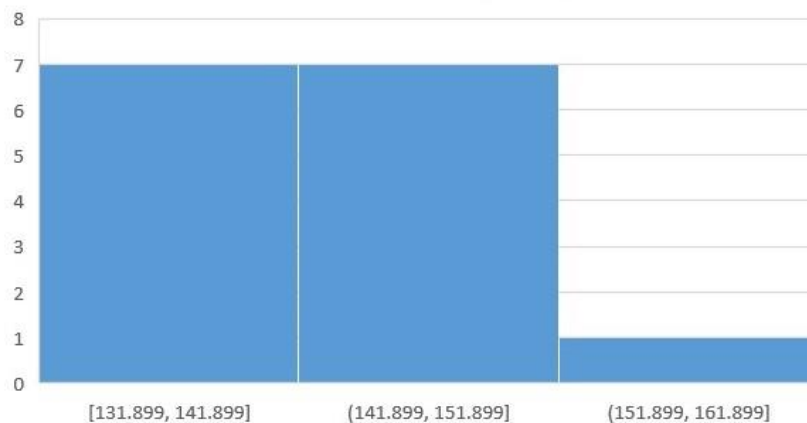
Persebaran Ukuran Diameter Butir



11. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen UQ25A



Persebaran Ukuran Diameter Butir



12. Perhitungan konversi wt% ke at% paduan Cu-16,8Zn-6,99Al

Massa Atom Cu = 63,546      Cu dalam wt% = 76,21  
 Massa Atom Zn = 65,38      Zn dalam wt% = 16,8  
 Massa Atom Al = 26,981      Al dalam wt% = 6,99

$$at\%Zn = \frac{wt\% \frac{Zn}{Massa} atom Zn}{\left( wt\% \frac{Cu}{Massa} atom Cu \right) + \left( wt\% \frac{Zn}{Massa} atom Zn \right) + \left( wt\% \frac{Al}{Massa} atom Al \right)} \times 100$$

$$at\%Zn = \frac{16,8/65,38}{(76,21/63,546) + (16,8/65,38) + (6,99/26,981)} \times 100$$

$$at\%Zn = \frac{16,8/65,38}{(76,21/63,546) + (16,8/65,38) + (6,99/26,981)} \times 100$$

$$at\%Zn = 14,98$$

$$at\%Al = \frac{wt\% \frac{Al}{Massa} atom Al}{\left( wt\% \frac{Cu}{Massa} atom Cu \right) + \left( wt\% \frac{Zn}{Massa} atom Zn \right) + \left( wt\% \frac{Al}{Massa} atom Al \right)} \times 100$$

$$at\%Zn = \frac{6,99/26,981}{(76,21/63,546) + (16,8/65,38) + (6,99/26,981)} \times 100$$

$$at\%Zn = 15,10$$

13. Perhitungan persamaan 4.1

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 66,9 (14,98) - 90,65 (15,10)$$

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 1002,16 - 1368,82$$

$$M_s (\text{°C}) = -158,98$$

14. Perhitungan persamaan 4.2

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 66,9[1,35510 + 1(14,98)]$$

$$M_s (\text{°C}) = 2212 - 66,9[35,3979]$$

$$M_s (\text{°C}) = -156,12$$



## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan mengerjakan laporan penelitian Tugas Akhir ini, penulis juga mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada pihak – pihak yang telah mendukung dan membantu, diantaranya:

1. Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan baik.
2. Yanda, Bunda, dan Dinda yang selalu memberikan dukungan doa, moril, dan materil untuk penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan baik.
3. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing I Tugas Akhir yang telah membimbing dengan sabar, membantu, memberikan ilmu, dan saran yang membangun kepada Penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir.
4. Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing II Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, memberikan ilmu, dan memberikan motivasi demi kelancaran dalam pengerjaan Tugas Akhir kepada Penulis.
5. Bapak Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.(Eng)., Ph.D. selaku dosen wali Penulis yang telah membimbing selama masa perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
6. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS yang telah membantu proses Tugas Akhir sampai selesai.
7. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS yang telah memberikan ilmu selama masa perkuliahan.
8. Teman Fundichionco yang sudah *sharing* ilmu, saling menopang satu sama lain dengan sangat luar biasa dalam menghadapi kendala selama proses penelitian.
9. Teman-teman Forda Plat G Tegal yang senantiasa memberikan dukungan, momen, dan hiburan kepada Penulis.
10. Pak Chanan dan Cak Asman yang telah membantu pengerjaan secara teknis dan non-teknis dalam proses penelitian.
11. Departemen *Social and Human Empowerment* HMMT KONTRIBUSI 2020/2021 yang sudah menjadi tempat bagi menulis untuk mengabdikan dan berbagai ilmu kepada teman lainnya saat masa perkuliahan.
12. Keluarga besar MT20 yang selalu memberikan semangat dan hiburan kepada penulis serta menjadi tempat kembali dan rumah yang nyaman untuk Penulis.
13. MT18, MT19, MT21, dan MT22 yang memberikan banyak pelajaran berharga kepada penulis selama menjalani proses perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS

14. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu oleh penulis.

Penulis berharap penelitian ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca dan membutuhkan.

Surabaya, 14 Juli 2022

Penulis

Riza Muhammad Alifandi

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Tegal, 8 November 1999 sebagai anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dari SDN Mangkukusuman 1 Kota Tegal tahun 2006-2012. Dilanjutkan di SMPN 2 Tegal tahun 2012-2015. Dilanjutkan di SMAN 1 Tegal tahun 2015-2018. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan Pendidikan S-1 di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama berkuliah di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, penulis mengikuti kegiatan pelatihan PKTI TD, LKMM Pra TD, LKMM TD, dan LKMW TD. Penulis juga aktif dalam organisasi di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi ITS sebagai staff Departemen Sosial Masyarakat pada periode 2019/2020 dan sebagai Kepala Biro Kajian Strategis dan Literasi pada periode 2020/2021. Selain aktif di organisasi, penulis juga aktif dalam kepanitiaan sebagai staff Al-Khawarizmi Ramadhan di Kampus 41 2019/2020. Penulis juga memiliki pengalaman kerja praktik di PT. Barata Indonesia pada bulan Februari 2021. Selama kerja praktik, penulis ditempatkan pada bagian produksi dan *quality control*. Dalam kesempatan ini penulis belajar mengenai alur produksi dan inspeksi *quality control* pada proyek *radial gate* dan *penstock* bendungan. Untuk menyelesaikan Pendidikan S-1, penulis melakukan penelitian dalam bidang Metalurgi Manufaktur (pengecoran dan perlakuan panas) dengan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Pengaruh Variasi  *Holding Time Up-Quenching dan Artificial Aging pada Cu-16,8Zn-6,99Al Alloy Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan***” Penulis dapat dihubungi melalui alamat email : [rizaalifandi99@gmail.com](mailto:rizaalifandi99@gmail.com)