

TUGAS AKHIR – TL184834

**ANALISIS PENGARUH *HOLDING TIME ANNEALING* DAN
QUENCHANT SOLUTION TREATMENT DENGAN *DIRECT
QUENCH* PADA PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

FERDY ARMANSYAH
NRP. 0251184000017

Dosen Pembimbing
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.
NIP. 198805012019031008
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
NIP. 195809101986031002

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



TUGAS AKHIR – TL184834

**ANALISIS PENGARUH *HOLDING TIME ANNEALING* DAN
QUENCHANT SOLUTION TREATMENT DENGAN *DIRECT
QUENCH* PADA PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

FERDY ARMANSYAH
NRP. 0251184000017

Dosen Pembimbing
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.
NIP. 198805012019031008
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
NIP. 195809101986031002

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL184834

**ANALYSIS THE EFFECT OF HOLDING TIME ANNEALING
AND QUENCHANT ON SOLUTION TREATMENT WITH
DIRECT QUENCH IN Cu-16,8Zn-6,99Al ALLOY ON
MICROSTRUCTURE AND HARDNESS**

FERDY ARMANSYAH
NRP. 02511840000017

Advisor
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.
NIP. 198805012019031008
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
NIP. 195809101986031002

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

(This page is intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH *HOLDING TIME ANNEALING* DAN *QUENCHANT SOLUTION TREATMENT* DENGAN *DIRECT QUENCH* PADA PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al 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 : **FERDY ARMANSYAH**
NRP. 0251184000017

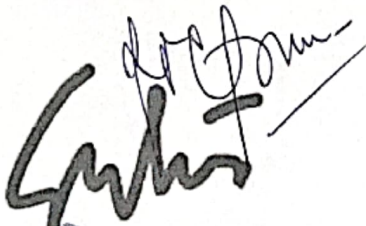
Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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



Pembimbing

2. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.



Ko-Pembimbing

3. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

Penguji

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



Penguji



SURABAYA

Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET


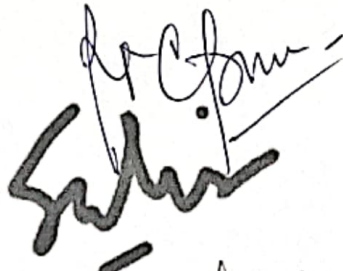
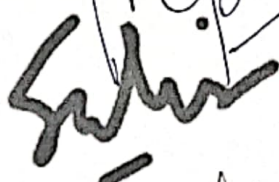

ANALYSIS THE EFFECT OF HOLDING TIME ANNEALING AND QUENCHANT ON SOLUTION TREATMENT WITH DIRECT QUENCH IN Cu-16,8Zn-6,99Al ALLOY ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS

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 : **FERDY ARMANSYAH**
NRP. 0251184000017

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.  Advisor
2. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.  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 : Ferdy Armansyah / 0251184000017
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing/NIP : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. / 198805012019031008

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh *Holding Time Annealing* dan *Quenchant Solution Treatment* dengan *Direct Quench* pada Paduan Cu-16,8Zn-6,99Al 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.

Mengetahui
Dosen Pembimbing

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

Surabaya, 13 Juli 2022

Mahasiswa

(Ferdy Armansyah)
NRP. 0251184000017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

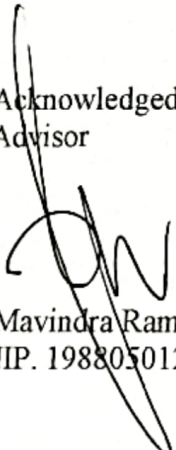
The undersigned below:

Name of student/NRP : Ferdy Armansyah / 0251184000017
Departement : Material and Metallurgical Engineering ITS
Advisor/NIP : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. / 198805012019031008

Hereby declare that the Final Project with the title of "Analysis The Effect of Holding Time Annealing and Quenchant on Solution Treatment With Direct Quench 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.

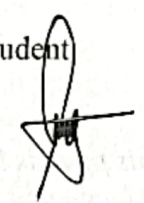
If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Acknowledged
Advisor


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

Surabaya, July 13th 2022

Student


(Ferdy Armansyah)
NRP. 0251184000017

(This page is intentionally blank)

ANALISIS PENGARUH *HOLDING TIME ANNEALING* DAN *QUENCHANT SOLUTION TREATMENT* DENGAN *DIRECT QUENCH* PADA PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN

Nama Mahasiswa / NRP : Ferdy Armansyah/0251184000017
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing 1 : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T./198805012019031008
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc./195809101986031002

Abstrak

Shape Memory Alloy (SMA) adalah salah satu *Shape Memory Material* (SMM) yang mempunyai salah satu sifat yaitu *shape memory effect*. Sifat tersebut adalah kemampuan logam paduan ketika diberikan pembebanan pada temperatur ruang dan dipanaskan hingga temperatur austenisasinya. Ketika didinginkan kembali mempunyai fasa martensit kembali dan bentuk paduannya kembali ke bentuk semula. Salah satu SMA yang umum digunakan adalah Cu-Zn-Al. sehingga pada penelitian dengan menggunakan paduan Cu-Zn-Al dengan melakukan analisis pada *holding time* proses *annealing* dan media pendingin pada *solution treatment* untuk mengetahui struktur mikro, kekerasan dan *shape memory effect*. Perlakuan panas yang akan diberikan adalah *homogenization*, *annealing*, dan *solution treatment* dengan metode *direct quench*. Dengan variasi yang digunakan pada *holding time* untuk proses *annealing* adalah selama 1 jam, 2 jam, dan 4 jam. Media pendingin yang akan digunakan adalah *brine* dan oli. Dan akan dilakukan pengujian pada *shape memory alloy* yaitu pengujian komposisi, metalografi, *X-Ray Diffraction*, kekerasan, *Differential Scanning Calorimetry* dan *shape memory effect*. Pada hasil pengujian metalografi terdapat fasa yang terbentuk yaitu α , β , dan γ dan tidak terbentuknya *twinned martensite* (β'). Hal ini diakibatkan temperatur transformasi martensit (M_s) dibawah temperatur ruang. Dan pada hasil pengujian metalografi, nilai diameter ukuran butir dapat dianalisis. Nilai diameter butir terkecil dan terbesar secara berturut-turut adalah spesimen DQBR1H dengan nilai 111,37 μm dan A4H dengan nilai 181,4 μm . Pada pertumbuhan butir *holding time annealing* berpengaruh pada pertumbuhan butir, dengan semakin lama *holding time* yang diberikan maka semakin besar ukuran butir yang dapat dihasilkan. Dan untuk nilai kekerasan terendah dan tertinggi secara berturut-turut adalah spesimen A4H dengan nilai $240 \pm 4,58$ VHN dan DQBR1H $284 \pm 1,73$ VHN. Pada media pendingin, *brine* mempunyai *cooling rate* yang lebih tinggi dibanding media oli. Hal ini berpengaruh pada *cooling rate* yang semakin tinggi semakin halus butir yang terbentuk pada struktur mikro dan semakin tinggi nilai kekerasan yang dihasilkan.

Kata Kunci: *Annealing, Cu-Zn-Al, Kekerasan, Media Pendingin, Shape Memory Alloy (SMA), Shape Memory Effect (SME), Struktur Mikro, Solution Treatment.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF HOLDING TIME ANNEALING AND
QUENCHANT ON SOLUTION TREATMENT WITH DIRECT QUENCH IN Cu-
16,8Zn-6,99Al ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS**

Student Name / NRP : Ferdy Armansyah/02511840000017
Departement : Materials and Metallurgical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T./198805012019031008
Co Advisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc./195809101986031002

Abstract

Shape Memory Alloy (SMA) is a Shape Memory Material (SMM) which has a shape memory effect. This property is the ability of the alloy metal when it is given a load at room temperature and heated to its austenization temperature. In cooling process, it has a martensite phase and the alloy will return back to its original shape. One of the SMAs material that commonly used is Cu-Zn-Al. The research is using Cu-Zn-Al alloys by analyzing the holding time of the annealing process and cooling media in the solution treatment to determine the microstructure, hardness and shape memory effect. The heat treatment process will apply homogenization, Annealing, and solution treatment with direct quench method. The research will use variations in the holding time for the annealing processes for 1 hour, 2 hours, and 4 hours. The research will use brine and oil as quenchant media. In the research will also uses test for Cu-Zn-Al including composition test, metallography, X-Ray Diffraction, hardness test, Differential Scanning Calorimetry test and shape memory effect test. The metallography test results, α , β , and γ are formed. And with no β' (twinned martensite) formed in microstructure. The results of metallography testing, the value of the diameter of the grain size can be analyzed with the smallest and largest grain diameters respectively were DQBR1H specimens with 111,37 μm and A4H with 181.4 μm . The longer holding time were given for grain growth, the larger the grain size that can be produced. And for the lowest and highest hardness values are respectively are A4H specimens with 240 ± 4.58 VHN and DQBR1H with $284 \pm 1,73$ VHN. For quenchant, brine has a higher cooling rate than oil media. This has an effect on the higher cooling rate, the finer the grains formed in the microstructure and the higher the hardness value produced.

Keywords: *Annealing, Cu-Zn-Al, Hardness, Microstructure, Quenchant Media, Shape Memory Alloy (SMA), Shape Memory Effect (SME), Solution Treatment.*

(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 *Holding Time Annealing dan Quenchant Solution Treatment dengan Direct Quench* pada Paduan Cu-16,8Zn-6,99Al 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. Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. dan Bapak Ir. Rochman Rochiem, 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, 13 Juli 2022
Penulis

Ferdy Armansyah

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| LEMBAR PENGESAHAN..... | v |
| PERNYATAAN ORISINALITAS..... | ix |
| ABSTRAK..... | xiii |
| ABSTRACT..... | xv |
| KATA PENGANTAR..... | xvii |
| DAFTAR ISI..... | xix |
| DAFTAR GAMBAR..... | xxi |
| DAFTAR TABEL..... | xxiii |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah..... | 1 |
| 1.3 Batasan Masalah..... | 1 |
| 1.4 Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.5 Manfaat Penelitian..... | 2 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 3 |
| 2.1 <i>Shape Memory Alloy</i> | 3 |
| 2.1.1 <i>Shape Memory Effect</i> | 3 |
| 2.1.2 <i>One Way Shape Memory Effect</i> | 4 |
| 2.2 Paduan Cu-Zn-Al..... | 6 |
| 2.3 Diagram Fasa Cu-Zn-Al..... | 7 |
| 2.4 Perlakuan Panas..... | 10 |
| 2.4.1 <i>Homogenizing</i> | 11 |
| 2.4.2 <i>Annealing</i> | 11 |
| 2.4.3 <i>Solution Treatment</i> | 12 |
| 2.5 Pengujian..... | 12 |
| 2.5.1 Pengujian Komposisi..... | 12 |
| 2.5.2 Pengujian Metalografi..... | 13 |
| 2.5.3 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> | 14 |
| 2.5.4 Pengujian Kekerasan..... | 15 |
| 2.5.5 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> | 16 |
| 2.5.6 Pengujian <i>Shape Memory Effect</i> | 17 |
| 2.6 Penelitian Sebelumnya..... | 17 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... | 23 |
| 3.1 Diagram Alir..... | 23 |
| 3.2 Bahan Penelitian..... | 24 |
| 3.3 Alat Penelitian..... | 25 |
| 3.4 Kurva Variabel Penelitian..... | 29 |
| 3.5 Prosedur Penelitian..... | 31 |
| 3.5.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Homogenizing</i> | 31 |
| 3.5.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Annealing</i> | 31 |
| 3.5.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Solution Heat Treatment</i> | 31 |
| 3.6 Pengujian..... | 31 |
| 3.6.1 Pengujian Komposisi Kimia..... | 31 |
| 3.6.2 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> | 32 |
| 3.6.3 Pengujian Metalografi..... | 32 |
| 3.6.4 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> | 32 |
| 3.6.5 Pengujian Kekerasan..... | 32 |

| | | |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.6.6 | <i>Pengujian Shape Memory Effect</i> | 32 |
| 3.7 | Jadwal Penelitian..... | 32 |
| 3.8 | Rancangan Penelitian..... | 33 |
| BAB IV | Analisis data dan pembahasan | 35 |
| 4.1 | Hasil Pengujian Komposisi Kimia Cu-16,8Zn-6,99Al..... | 35 |
| 4.2 | Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> Cu-16,8Zn-6,99Al..... | 35 |
| 4.3 | Hasil Pengujian Metalografi Cu-16,8Zn-6,99Al..... | 39 |
| 4.4 | Hasil Pengujian Kekerasan Cu-16,8Zn-6,99Al..... | 44 |
| 4.5 | Hasil Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> Cu-16,8Zn-6,99Al..... | 46 |
| 4.6 | Hasil Pengujian <i>Shape Memory Effect</i> Cu-16,8Zn-6,99Al..... | 48 |
| BAB V | Kesimpulan dan saran | 51 |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 51 |
| 5.2 | Saran..... | 51 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 53 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1 | Aplikasi SMA <i>thermostat radiator</i> pada kendaraan mobil dengan bagian (a) katup utama, (b) <i>return spring</i> , (c) subkatup, (d) kerangka thermostat, (e) <i>push rod</i> , (f) <i>spring seat</i> , (g) <i>memory alloy</i> .(Clithy, 2020)..... | 3 |
| Gambar 2.2 | Alur <i>shape memory effect</i> (SME) secara mikroskopis (Zanaboni, 2008) | 4 |
| Gambar 2.3 | Fasa pada SMA dan struktur kristal pada OWSME, TWSME, dan SE (Mohd Jani et al., 2014)..... | 5 |
| Gambar 2.4 | Plot Tegangan-Regangan-Temperatur menunjukkan Superelastisitas dan <i>Shape Memory Effect</i> (Oliveira et al., 2017) | 6 |
| Gambar 2.5 | Mekanisme <i>one-way shape memory effect</i> (OWSME) secara makroskopis (Zanaboni, 2008) | 6 |
| Gambar 2.6 | Diagram fasa biner Cu-Zn (A. S. M. International, 1989) | 8 |
| Gambar 2.7 | Diagram fasa biner dengan penambahan aluminium dengan komposisi 4% dan 6% (A. S. M. International, 1989) | 9 |
| Gambar 2.8 | Diagram fasa terner Cu-Zn-Al (A. S. M. International, 1989)..... | 9 |
| Gambar 2.9 | Diagram fasa terner isothermal pada temperatur (a) 500°C dan (b) 700°C (A. S. M. International, 1989) | 10 |
| Gambar 2.10 | Mekanisme kerja spark OES (Widyastuti et al., n.d.) | 13 |
| Gambar 2.11 | Skema radiasi Sinar-X pada benda kerja (Widyastuti et al., n.d.)..... | 14 |
| Gambar 2.12 | Difraksi bragg oleh bidang kristal(Widyastuti et al., n.d.) | 15 |
| Gambar 2.13 | Indentasi pengujian kekerasan vickers (Roell, 2011)..... | 16 |
| Gambar 2.14 | Kurva <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC) untuk benda kerja <i>Shape Memory Alloy</i> (SMA) (Jiang et al., 2018). | 17 |
| Gambar 2.15 | Struktur mikro Cu-21.6Zn-5.6Al dengan perlakuan <i>direct quench</i> (Asanovic et al., 2021)..... | 18 |
| Gambar 2.16 | Hasil pengujian struktur mikro dengan alat uji SEM pada gambar (a) dengan media pendingin <i>iced brine water</i> dan gambar (b) dengan pendinginan tungku (Aldirmaz et al., 2013)..... | 18 |
| Gambar 2.17 | Struktur mikro pada CuZnAlZr dengan perbesaran 50µm (Wang et al., 1991)..... | 19 |
| Gambar 2.18 | Fasa pada struktur mikro untuk media pendingin (a) <i>Brine</i> (b) Air dan (c) Oli (Sampath, 2007). | 20 |
| Gambar 2.19 | Struktur mikro spesimen Cu-21Zn-5Al dengan perlakuan <i>annealing</i> pada temperatur 550 °C dan <i>direct quenching</i> pada media <i>brine</i> (Rizki et al., 2020)..... | 21 |
| Gambar 2.20 | Struktur Mikro Spesimen Cu-11,9Zn-6,72Al dengan Metode (a) <i>Direct Quench</i> Media Pendingin <i>Brine</i> (b) <i>Direct Quench</i> Media Pendingin <i>Iced Water</i> (c) <i>Step Quench</i> Media Pendingin <i>Brine</i> (d) <i>Step Quench</i> Media Pendingin <i>Iced Water</i> (Masrul et al., 2021)..... | 22 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir | 24 |
| Gambar 3.2 | Produk cor spesimen Cu-Zn-Al (dokumentasi pribadi) | 25 |
| Gambar 3.3 | Gerinda tangan (dokumentasi pribadi) | 26 |
| Gambar 3.4 | Gerinda duduk (dokumentasi pribadi)..... | 26 |
| Gambar 3.5 | Timbangan digital (dokumentasi pribadi) | 26 |
| Gambar 3.6 | Alat <i>wire cut</i> (dokumentasi pribadi)..... | 27 |
| Gambar 3.7 | Alat uji OES (dokumentasi pribadi) | 27 |
| Gambar 3.8 | Alat uji kekerasan Vickers (dokumentasi pribadi) | 27 |
| Gambar 3.9 | Mikroskop Optik (dokumentasi pribadi) | 28 |

| | | |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 3.10 | <i>Heat temperature furnace</i> (dokumentasi pribadi)..... | 28 |
| Gambar 3.11 | Alat uji SME (dokumentasi pribadi)..... | 29 |
| Gambar 3.12 | Kurva Variabel Penelitian..... | 30 |
| Gambar 4.1 | Hasil pengujian XRD proses <i>solution treatment</i> dengan media pendingin <i>brine</i> dan variasi waktu tahan <i>annealing</i> | 36 |
| Gambar 4.2 | Hasil pengujian XRD proses <i>solution treatment</i> dengan media pendingin oli dan variasi waktu tahan <i>annealing</i> | 38 |
| Gambar 4.3 | Hasil metalografi spesimen <i>as cast</i> Cu-16,8Zn-6,99Al dengan perbesaran 100x dan menggunakan larutan etsa FeCl ₃ .6H ₂ O..... | 40 |
| Gambar 4.4 | Hasil metalografi spesimen dengan waktu tahan anil (a) 1 jam (b) 2 jam (c) 4 jam Cu-16,8Zn-6,99Al dengan perbesaran 100x dan menggunakan larutan etsa FeCl ₃ .6H ₂ O..... | 41 |
| Gambar 4.5 | Hasil metalografi spesimen <i>solution treatment</i> dengan media pendingin <i>brine</i> untuk waktu tahan anil (a) 1 jam, (b) 2 jam, (c) 4 jam dengan perbesaran 100x dan menggunakan larutan etsa FeCl ₃ .6H ₂ O | 42 |
| Gambar 4.6 | Hasil metalografi spesimen <i>solution treatment</i> dengan media pendingin oli untuk waktu tahan anil (a) 1 jam, (b) 2 jam, (c) 4 jam dengan perbesaran 100x dan menggunakan larutan etsa FeCl ₃ .6H ₂ O..... | 43 |
| Gambar 4.7 | Grafik hasil pengujian kekerasan Cu-16,8Zn-6,99Al..... | 45 |
| Gambar 4.8 | Grafik hasil pengujian DSC pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al..... | 47 |
| Gambar 4.9 | Spesimen uji <i>shape memory effect</i> | 48 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 | Komposisi paduan Cu-Zn-Al (A. International, 1998)..... | 7 |
| Tabel 2.2 | Sifat paduan Cu-Zn-Al (A. International, 1998) | 7 |
| Tabel 2.3 | Temperatur pemanasan proses <i>annealing</i> untuk paduan tembaga (A. International, 1991) | 11 |
| Tabel 3.1 | Jadwal Penelitian | 32 |
| Tabel 3.2 | Rancangan Penelitian | 33 |
| Tabel 4.1 | Hasil pengujian komposisi kimia | 35 |
| Tabel 4.2 | Posisi 2 θ fasa yang teridentifikasi Cu-16,8Zn-6,99Al dengan media pendingin <i>brine</i> dan variasi waktu tahan <i>annealing</i> | 36 |
| Tabel 4.3 | Posisi 2 θ fasa yang teridentifikasi Cu-16,8Zn-6,99Al dengan media pendingin oli dan variasi waktu tahan <i>annealing</i> | 38 |
| Tabel 4.4 | Ukuran butir spesimen pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al..... | 44 |
| Tabel 4.5 | Hasil pengujian kekerasan Cu-16,8Zn-6,99Al | 45 |
| Tabel 4.6 | Temperatur transformasi paduan Cu-16,8Zn-6,99Al | 48 |
| Tabel 4.7 | Hasil pengujian <i>shape memory effect</i> Cu-16,8Zn-6,99Al | 48 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi saat ini yang terus berkembang pesat memiliki dampak yang signifikan untuk dunia industri. Dimana beberapa kondisi saat ini yang mengharuskan teknologi berkembang untuk memudahkan aktivitas sehari-hari. Dari setiap teknologi yang berkembang didukung dengan kemampuan dari bahan atau material penyusunnya. Salah satu jenis material yang dikembangkan adalah *Shape Memory Alloy* (SMA). *Shape memory alloy* telah diaplikasikan pada beberapa bidang dan atau unit di industri seperti aktuator, robotika, biomedis, dirgantara, dan otomotif (Khulief, 2020). Salah satu contoh dari aplikasi *shape memory alloy* adalah pada thermostat radiator. Dimana *thermostat radiator* dapat membantu membuka dan menutup jalur dari air pendingin pada ke radiator. Sehingga temperatur dapat tetap terjaga dan tidak melebihi 85°C dan mencegah timbulnya *overheating* pada mesin serta dapat membantu kerja mesin untuk mencapai temperatur operasinya (Clithy, 2020).

Shape memory alloy termasuk ke dalam material cerdas karena memiliki sifat *Shape Memory Effect* (SME). Dimana *shape memory effect* adalah kemampuan material untuk mengingat kembali bentuk awalnya sebagai bentuk respon terhadap proses pemanasan setelah diberikan beban untuk deformasi. Hal ini dapat terjadi karena adanya transformasi fasa tanpa terjadinya difusi dan bersifat *reversible*. Umumnya paduan yang digunakan untuk membentuk *shape memory alloy* adalah Nickel-Titanium dan Paduan Cu. Nickel-Titanium yang umumnya digunakan baik dengan komposisi 45-55%, 50-50%, dan 55-45%. Paduan Nickel-Titanium memiliki stabilitas termal dan sifat mekanik yang baik. Namun di sisi lain mempunyai biaya produksi yang mahal. Dan untuk logam paduan tembaga (*Cu-based*) umumnya yang digunakan adalah Cu-Zn-Al, Cu-Al-Mn, Cu-Al-Be, dan lain-lain. Logam paduan *Cu-based* mempunyai temperatur transformasi yang luas, biaya produksi yang murah, dan dapat diberikan perlakuan *cold work*. Terdapat kekurangan pada paduan *Cu-based* yaitu tidak stabil pada temperatur yang tinggi.

Pada tahun 2020, Rizki telah melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur untuk proses *annealing* dan media pendingin pada proses *heat treatment*. Hasil yang ditunjukkan adalah semakin tinggi temperatur yang diberikan untuk proses *annealing* maka semakin panjang laju pendinginannya dan semakin sedikit fasa martensit yang terbentuk. Dan untuk media pendingin, *brine* memberikan fasa martensit paling besar yaitu 61,8% dan nilai *recovery* 38,3%. Sedangkan untuk *dry ice* lebih cenderung ke fasa α sebesar 55,3% dengan nilai *recovery* 10%. Hal ini dapat disebabkan karena wujud padat yang tidak merata sehingga membuat proses pendinginan pada spesimen tidak merata (Rizki et al., 2020). Pada penelitian ini, akan dilakukan analisis pengaruh *holding time* untuk proses *annealing* dan media pendingin untuk proses *solution treatment*. Pada penelitian ini, pengujian yang akan dilakukan adalah komposisi kimia, metalografi, *Differential Scanning Calorimetry*, *X-ray Diffraction*, kekerasan, dan *shape memory effect*.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi *holding time* pada proses *annealing* pada paduan Cu-Zn-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan?
2. Bagaimana pengaruh variasi media pendingin pada proses *solution treatment* pada paduan Cu-Zn-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pengaruh lingkungan selama proses perlakuan panas dimulai dari pemanasan dan diakhiri dengan pendinginan diabaikan.
2. 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 *annealing* pada paduan Cu-Zn-Al terhadap struktur mikro, dan kekerasan.
2. Menganalisis pengaruh variasi media pendingin pada proses *solution treatment* pada paduan Cu-Zn-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh *holding time annealing* dan media pendingin *solution treatment* pada *shape memory alloy* terhadap paduan Cu-Zn-Al struktur mikro dan kekerasan. Diharapkan bahwa dengan adanya laporan ini dapat diaplikasikan di industri dan dapat membuka gerbang pemahaman baru kepada Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS dalam *ranah shape memory alloy*.

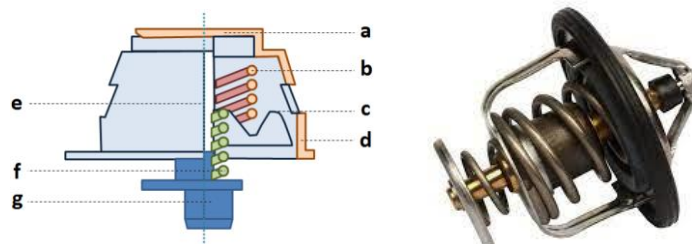
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Shape Memory Alloy*

Shape Memory Alloy (SMA) adalah salah satu jenis *smart material* yang dimana merupakan logam paduan yang memiliki kemampuan untuk mengembalikan bentuk seperti ke bentuk awal setelah dipanaskan hingga temperatur tertentu. Kemampuan paduan untuk mengingat ke bentuk awalnya dapat terjadi jika paduan ini diberikan beban deformasi, dan paduan ini akan mengembalikan bentuknya seperti semula setelah dipanaskan. Kemampuan mengingat ini disebut *Shape Memory Effect* (SME). Sifat SMA dapat diperlihatkan pada sejumlah paduan logam akibat adanya transformasi fasa yang bersifat *reversible* antara fasa martensit dan fasa austenit tanpa adanya difusi (*diffusionless*) pada proses (Mehrpooya et al., 2018).

SMA pertama kali diperkenalkan pada tahun 1932 oleh Arne Lander dengan melakukan pengujian pada paduan Emas dan Cadmium (AuCd). Penelitian ini terus berlanjut hingga pada tahun 1971 di Amerika Serikat, *Naval Ordnance Laboratories* melakukan penelitian pada paduan Nikel Titanium (NiTi) dimana paduan ini juga dikenal dengan istilah nitinol. Hingga saat ini paduan pada SMA yang mempunyai aplikasi yang cukup luas adalah pada paduan NiTi, *Cu-Based*, dan *Fe-Based*. Aplikasi pada SMA umumnya digunakan pada *micro-electromechanical systems* (MEMS), *aerospace mini actuators*, Biomedis, dan otomotif (Mohd Jani et al., 2014) (Wu et al., 2019).

Salah satu aplikasi SMA yang dapat dilakukan pada bidang otomotif. Dimana dalam otomotif mobil terdapat sebuah *thermostat radiator*. *Thermostat radiator* berfungsi untuk mengatur cairan yang terdapat pada mesin mobil sehingga mampu mencegah terjadinya *overheat* dan menjaga kestabilan temperatur pada mesin mobil. Temperatur optimal untuk menjalankan mesin pada mobil adalah 60-85°C. Sehingga dibutuhkan *thermostat radiator* untuk menjaga agar tidak melebihi temperatur tersebut. Ketika temperatur sebenarnya adalah lebih tinggi dari temperatur ini, maka *memory alloy* akan menekan *push rod*, *return spring* dan *spring seat* untuk membuka jalan sirkulasi ke sistem pendingin air. ketika temperatur rendah, *return spring* akan lebih besar dari *memory alloy* dan akan menekan *spring seat*, mematikan sistem pendingin air yang bersirkulasi. *Thermostat Radiator* memiliki keunggulan umur panjang dan pengendalian yang stabil (Wayman, 1980). Berikut adalah gambar *Thermostat Radiator* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



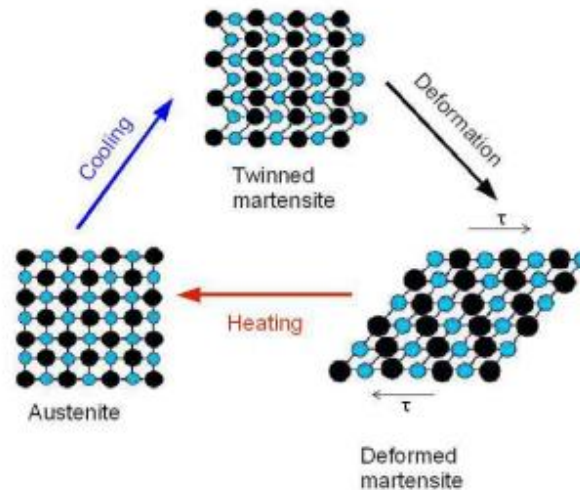
Gambar 2.1 Aplikasi SMA *thermostat radiator* pada kendaraan mobil dengan bagian (a) katup utama, (b) *return spring*, (c) subkatup, (d) kerangka thermostat, (e) *push rod*, (f) *spring seat*, (g) *memory alloy*. (Clithy, 2020)

2.1.1 *Shape Memory Effect*

Shape Memory Effect (SME) adalah sifat yang dimiliki pada *Shape Memory Alloy* (SMA). Pada Gambar 2.2 paduan pada temperatur rendah akan diberikan beban deformasi pada fasa

twinned martensite dan berubah menjadi fasa *detwinned martensite*. Selanjutnya paduan tersebut dipanaskan pada temperatur di atas A_f . Maka paduan tersebut akan kembali

ke bentuk semula dan terjadinya perubahan fasa kembali ke fasa induk yaitu fasa austenite. Dan Ketika didinginkan akan Kembali ke fasa *twinned martensite*. (Auricchio & Lubliner, 1997) (Machado & Lagoudas, 2008)

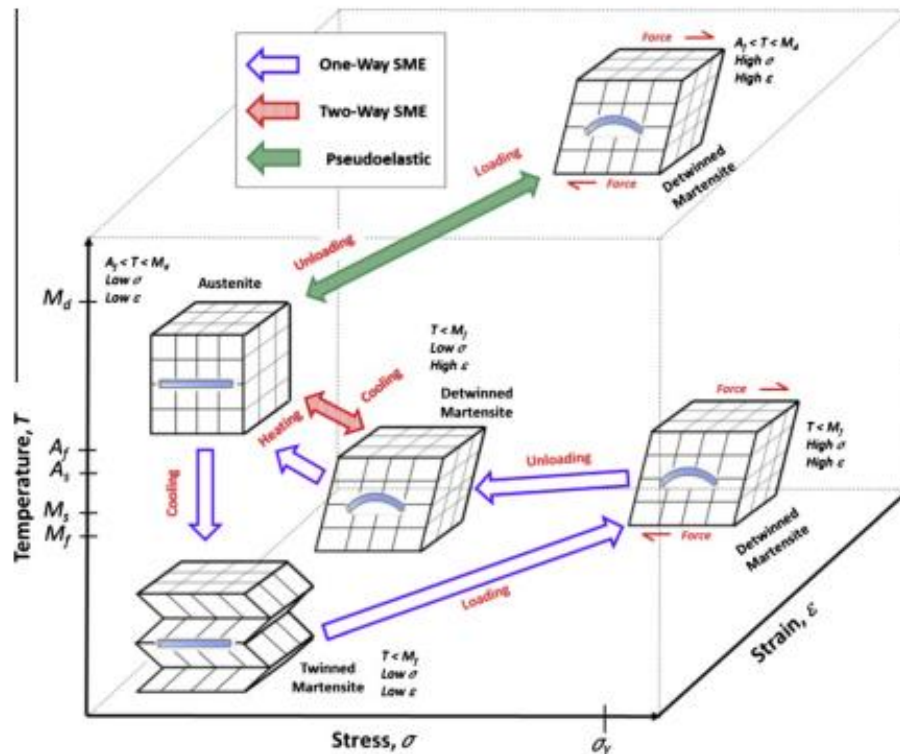


Gambar 2.2 Alur *shape memory effect* (SME) secara mikroskopis (Zanaboni, 2008)

Shape Memory Effect (SME) dapat diamati pada kisaran komposisi tertentu yang dimana mengandung 10- 30% komposisi Zn dan 5-10% komposisi Al pada paduan Cu-Zn-Al (A. International, 1998). Pada komposisi tersebut paduan dan temperturnya, akan terdapat tiga fasa ekuilibrium dapat terbentuk yaitu α , β dan γ . Namun, hanya pada fasa β yang menunjukkan *shape memory effect*. Fasa β pada paduan Cu-Zn-Al akan muncul secara acak pada temperatur tinggi dengan struktur kristal yang berbentuk *Body Centered Cubic* (BCC). Paduan Cu-Zn-Al jika diberikan proses *quenching* untuk menjaga fasa β untuk transformasi lebih lanjut menjadi martensit. (Stošić et al., 2017)

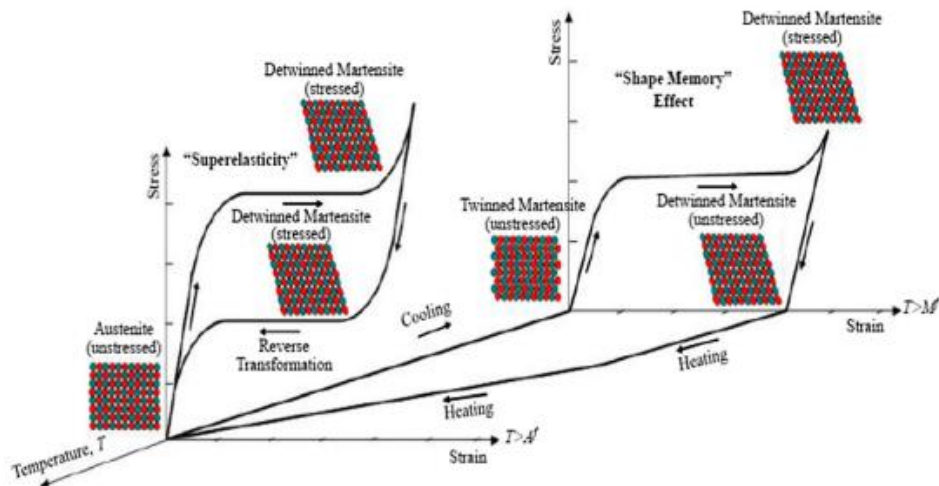
2.1.2 One Way Shape Memory Effect

Shape Memory Effect mempunyai tiga jenis yaitu *One-way Shape Memory Effect* (OWSME), *Two-Way Shape Memory Effect* (TWSME), dan *Pseudoelasticity* atau Superelastisitas (SE). Dimana OWSME merupakan mempertahankan kondisi terdeformasinya setelah beban eksternal diberikan, dan kemudian pulih ke bentuk aslinya pada pemanasan. Pada TWSME dapat kembali ke bentuk semula akibat pemanasan dan pendinginan, dan perubahan bentuk dapat terjadi tanpa adanya tahanan eksternal. SMA ini mempunyai sifat untuk mengingat 2 bentuk, sehingga perlu dilatih agar mendapatkan kemampuan untuk mengingat bentuk. Sedang pada SE pembebanan diberikan pada temperatur di antara A_f dan M_d , dengan M_d adalah temperatur tertinggi di atas A_f dimana martensit tidak akan mengalami tegangan. SMA akan kembali ke bentuknya semula tanpa adanya aktivasi termal. Hal ini disebabkan kristal austenit yang tidak stabil ketika beban dilepaskan dan ia kembali ke bentuk martensitnya. Proses pada OWSME, TWSME dan SE seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.3. (Mohd Jani et al., 2014)



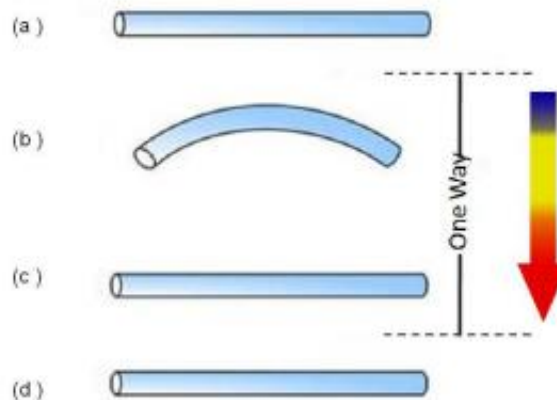
Gambar 2.3 Fasa pada SMA dan struktur kristal pada OWSME, TWSME, dan SE (Mohd Jani et al., 2014)

Berdasarkan Gambar 2.4 untuk OWSME, fasa *twinned martensite* terbentuk di temperatur kamar (di bawah M_f). Saat paduan diberikan beban hingga terdeformasi, fasa *twinned martensite* akan menjadi *detwinned martensite* akibat menerima regangan inelastis. Setelah spesimen dipanaskan dan mencapai temperatur di atas A_f , regangan inelastis dipulihkan karena sebelumnya struktur martensit telah direorientasi oleh tegangan. Hal ini pengembalian ke fasa austenit dapat memberikan efek regangan transformasi yang memiliki besaran yang sama tetapi arah yang berlawanan dengan regangan inelastis sehingga SMA kembali ke bentuk aslinya pada fasa austenitik, dan bentuk ini akan bertahan hingga pendinginan selesai, sehingga fasa paduan kembali menjadi *twinned martensite*. (Xu et al., 2019)



Gambar 2.4 Plot Tegangan-Regangan-Temperatur menunjukkan Superelastisitas dan *Shape Memory Effect* (Oliveira et al., 2017)

Pada Gambar 2.5 terlihat mekanisme untuk OWSME secara makroskopis. Dimana pada bagian (a) paduan memiliki fasa *twinned martensite* secara menyeluruh. Pada bagian (b) pembebanan eksternal diberikan pada temperatur kamar dan membentuk fasa *detwinned martensite*. Pada bagian (c) paduan dipanaskan hingga diatas A_f hingga kembali ke fasa induk atau fasa austenit. Dan pada bagian (d) dilakukan pendinginan hingga temperatur kamar dengan kembali ke fasa *twinned martensite*. (Zanaboni, 2008)



Gambar 2.5 Mekanisme *one-way shape memory effect* (OWSME) secara makroskopis (Zanaboni, 2008)

2.2 Paduan Cu-Zn-Al

Material paduan memiliki kelebihan yaitu dapat memperbaiki sifat-sifatnya, salah satunya adalah sifat mekanik sifat ulet dan ketahanan terhadap fraktur intergranular merupakan sifat yang dimiliki oleh paduan Cu-Zn. Dan yang lebih baik jika dibandingkan dengan paduan tembaga lainnya. Paduan dapat menjadi fasa martensit pada temperatur yang terletak di temperatur kamar. Untuk penambahan unsur seperti aluminium pada paduan Cu-Zn dapat merubah temperatur transformasi paduan menjadi lebih tinggi. Berikut adalah Komposisi paduan Cu-Zn-Al seperti yang terdapat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi paduan Cu-Zn-Al (A. International, 1998)

| Unsur | Komposisi (%) |
|----------------|---------------|
| Cu (Tembaga) | Balance |
| Zn (Seng) | 10-30 |
| Al (Aluminium) | 5-10 |

Penambahan dengan komposisi pada rentang aluminium pada rentang tersebut dapat mengubah temperatur M_s menjadi sekitar -180°C hingga 100°C . Namun terdapat kondisi dimana fasa induk mempunyai kecenderungan kuat untuk mengalami dekomposisi ke fasa kesetimbangan ketika diberikan perlakuan panas. Oleh karena itu, biasanya temperatur operasi dari paduan ini biasanya dibatasi maksimal pada 100°C . Temperatur transformasi dari paduan cukup sensitif terhadap perubahan komposisi, dan pada unsur tembaga dapat menguap pada proses peleburan. Dan untuk paduan Cu-Zn-Al sensitif terhadap perlakuan panas sehingga laju pendinginan pada proses *quenching* dapat menyebabkan disosiasi fase atau perubahan temperatur transformasi. Terdapat rentang operasional tegangan pada paduan menunjukkan *Shape Memory Effect* dan pseudoelastisitas yang baik, tetapi regangan transformasi dibatasi sekitar 3-4%. Berikut adalah sifat paduan Cu-Zn-Al yang terdapat pada Tabel 2.2. (A. International, 1998)

Tabel 2.2 Sifat paduan Cu-Zn-Al (A. International, 1998)

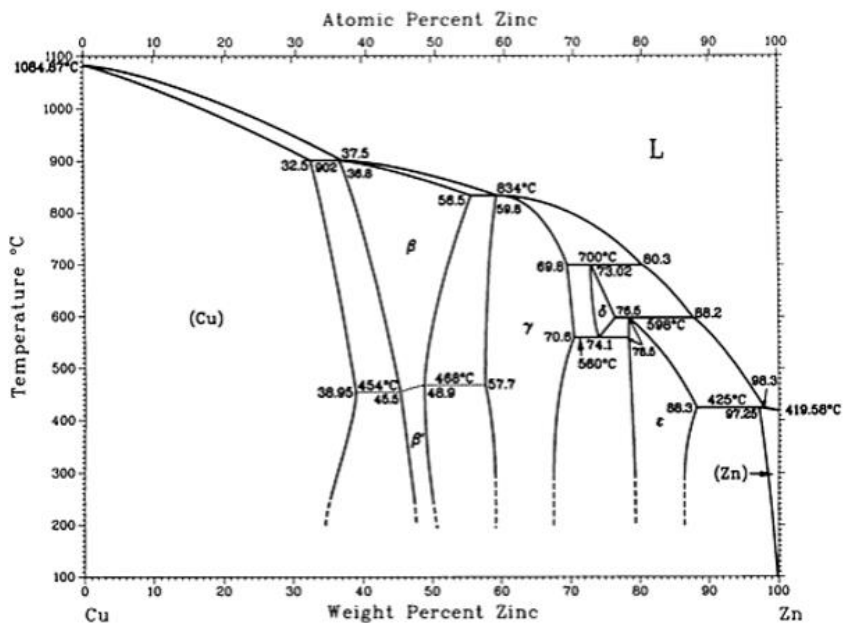
| Sifat | Nilai |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Temperatur Leleh ($^\circ\text{C}$) | 950 – 1020 |
| Densitas (g/cm^3) | 7.64 |
| Resistivitas ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$) | 8.5-9.7 |
| Konduktivitas Termal ($\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$) | 120 |
| Kapasitas Panas ($\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$) | 400 |
| Temperatur Transformasi ($^\circ\text{C}$) | <120 |
| <i>Recoverable Strain</i> (%) | 4 |
| <i>Hysteresis</i> ($\Delta^\circ\text{C}$) | 15-25 |
| <i>Modulus Young</i> (GPa) | 72 (β -fasa), 70 (martensit) |
| <i>Yield Strength</i> (MPa) | 350 (β -fasa), 80 (martensit) |
| <i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa) | 600 |

Shape Memory Alloy (SMA) yang berbasis tembaga bersifat metastabil, diperlukannya perlakuan *solution heat treatment* pada daerah fasa induk β dan pendinginan terkendali untuk mempertahankan fasa induk β -nya. Proses *solution heat treatment* yang terlalu lama perlu dihindari untuk mencegah penguapan seng dan penumbuhan butir. Paduan Cu-Zn-Al ketika diberikan proses *quenching* secara cepat dan langsung ke fasa martensit, sangat rentan terhadap efek stabilisasi martensit. Hal ini menyebabkan temperatur dari *reverse transformation* meningkat. Untuk paduan dengan temperatur M_s di atas temperatur ruangan, diperlukannya pendinginan yang lambat atau proses *step-quench* pada fasa induk β . (A. International, 1998)

2.3 Diagram Fasa Cu-Zn-Al

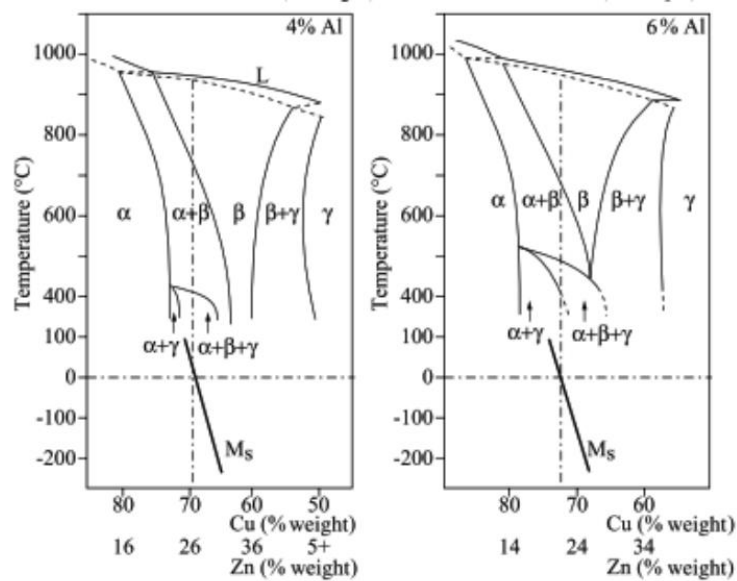
Diagram fasa adalah bentuk grafik yang mewakili fasa pada sistem paduan logam dengan fungsi komposisi dan temperatur. Diagram fasa terdiri dari tiga jenis yaitu diagram fasa *unary* adalah diagram fasa yang terdiri dari satu unsur logam, diagram fasa *binary* yang terdiri dari dua unsur logam, sedangkan diagram fasa *ternary* adalah diagram fasa yang terdiri dari 3 unsur logam (Groover, 2010). Pada diagram fasa paduan Cu-Zn-Al berbentuk diagram terner yang

dimana berasal dari diagram biner untuk paduan Cu-Zn, Cu-Al, Zn-Al. Pada Gambar 2.6 menunjukkan pada pendinginan ekuilibrium, tembaga dapat melarutkan seng hingga 32,5% pada temperatur solidus yaitu 902°C dengan dan porsinya akan maksimal sebanyak 39% pada temperatur 454°C. Sementara di temperatur ruang untuk logam tembaga dapat melarutkan seng sebanyak 39% apabila didinginkan dengan laju pendinginan yang ekuilibrium. Seperti yang terdapat pada Gambar 2.6, ditunjukkan bahwa temperatur M_s dari paduan Cu-Zn-Al sesuai dengan kandungan paduan yg diinginkan. Larutan padat (*Solid Solution*) yang terbentuk direpresentasikan dengan sebagai fasa α yang memiliki sifat yang lunak dan tangguh. Karena transformasi pada larutan padat tidak teratur, maka pembentukan fasa α rentan terhadap fenomena *coring*. Jika komposisi seng melebihi dari 39% maka pada saat dilakukan pendingin lambat akan terbentuk fasa *intermediate* β' di struktur mikro. Fasa β' memiliki sifat yang keras namun tangguh. Dapat bersifat plastis bila berubah menjadi fasa β pada temperatur 454°C. (A. S. M. International, 1989)



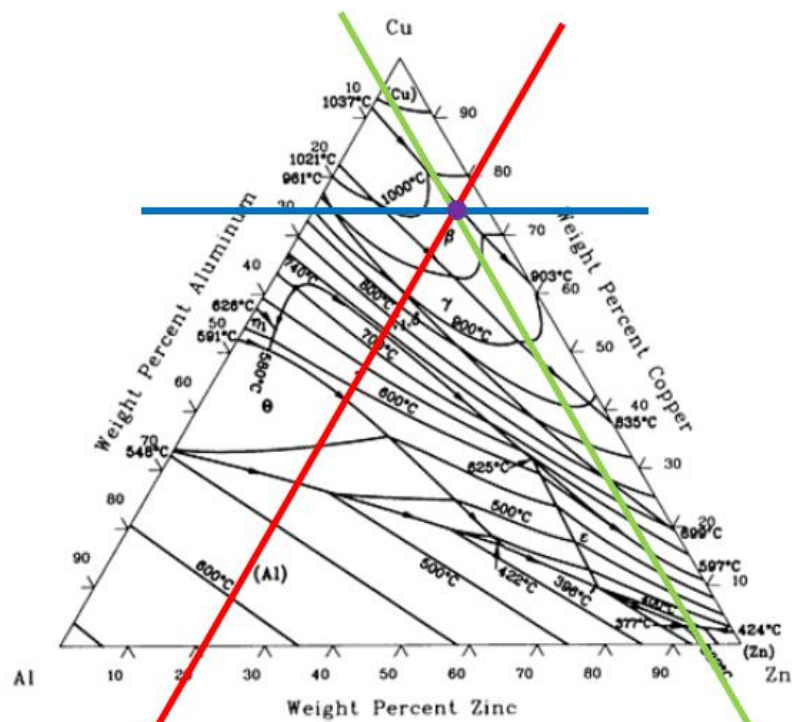
Gambar 2.6 Diagram fasa biner Cu-Zn (A. S. M. International, 1989)

Selanjutnya dapat diamati pada diagram fasa biner Cu-Zn dengan diberikan penambahan unsur aluminium. Penambahan aluminium sebagai stabilisasi fasa β yang mempunyai tujuan untuk meningkatkan kestabilan dari fasa β yang berakibat pada meningkatnya temperatur transformasi martensit. dengan penambahan unsur aluminium sebesar 6% dan kandungan Zn sebesar 22%, maka fasa β dapat stabil pada rentang temperatur pada perkiraan di antara 690°C - 950°C. Sehingga paduan ini dapat menjadi lebih mudah ketika diberikan perlakuan homogenisasi. Dan ketika diberikan proses *quenching* pada β tidak perlu terlalu sulit. Selanjutnya pada penambahan unsur aluminium sebesar 4% dengan kandungan Zn sebesar 28% juga dapat menstabilkan fasa β pada rentang temperatur pada perkiraan di antara 720°C - 950°C. Berikut 2.7 yang menunjukkan diagram terner Cu-Zn-Al dengan kandungan 4% dan 6% aluminium.



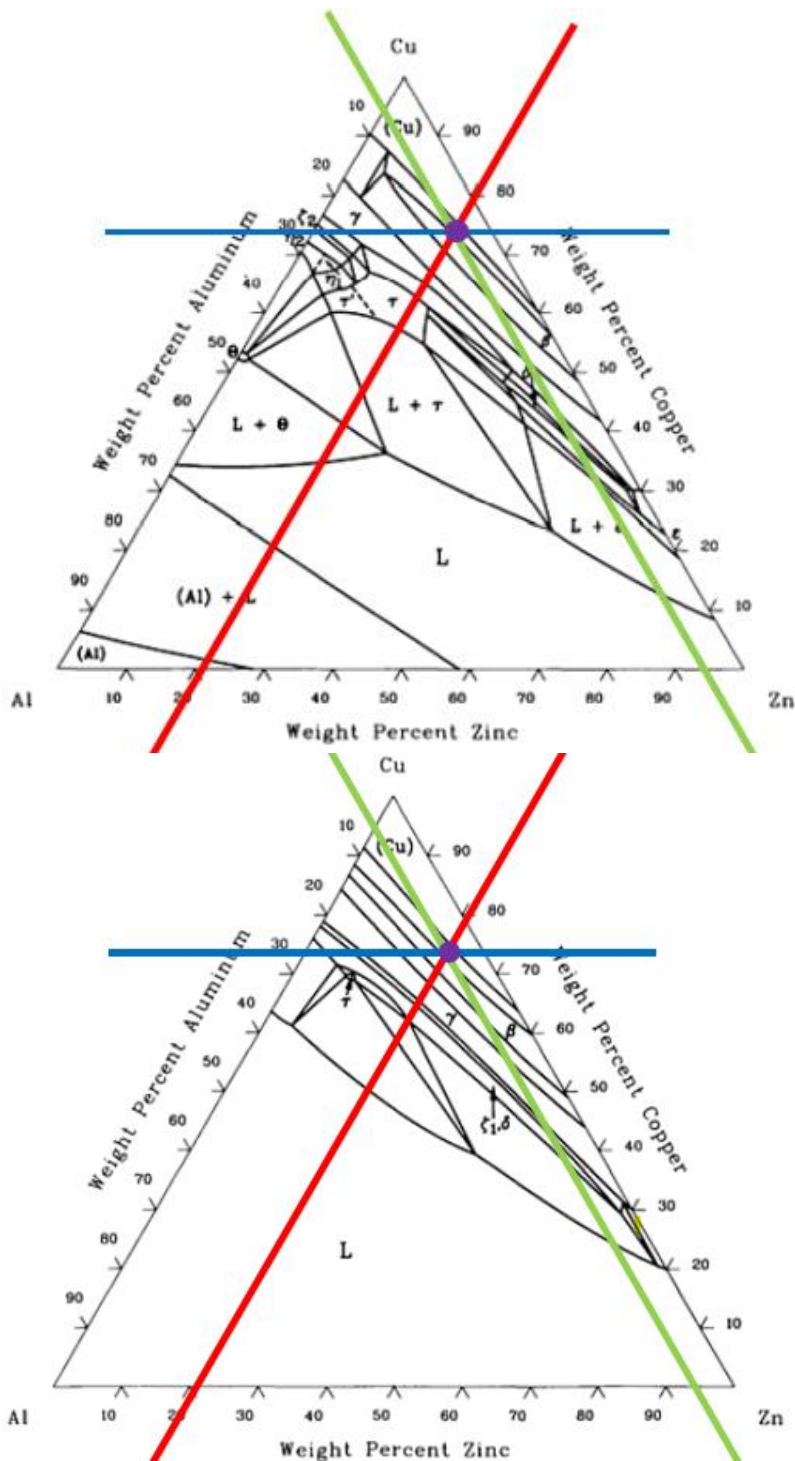
Gambar 2.7 Diagram fasa biner dengan penambahan aluminium dengan komposisi 4% dan 6% (A. S. M. International, 1989)

Pada Gambar 2.8 terdapat diagram fasa terner untuk paduan Cu-Zn-Al untuk proyeksi liquidus, dimana untuk ketiga unsur tersebut terletak pada bagian masing-masing. Untuk sisi kiri terdapat persentasi aluminium (Al), pada sisi bawah terdapat persentasi seng (Zn), dan pada sisi kanan terdapat persentasi tembaga (Cu). Ditentukan terlebih dahulu untuk komposisi dan ditarik garis lurus di setiap persentasi unsur, lalu ketiga garis tersebut akan membentuk titik potong. *Shape memory effect* dapat terbentuk pada paduan Cu-Zn-Al memiliki komposisi yang terdapat pada Tabel 2.1. (A. S. M. International, 1989)



Gambar 2.8 Diagram fasa terner Cu-Zn-Al (A. S. M. International, 1989)

Berikut terdapat Gambar 2.9 yang menunjukkan diagram fasa ternel secara isothermal.



Gambar 2.9 Diagram fasa terner isothermal pada temperatur (a) 500°C dan (b) 700°C (A. S. M. International, 1989)

2.4 Perlakuan Panas

Perlakuan panas melibatkan beberapa proses pemanasan sampai pendinginan pada material untuk mengubah struktur mikro dari material tersebut. Dimana struktur mikro dapat berpengaruh pada sifat mekanik dari benda tersebut. (Groover, 2010)

Proses perlakuan panas merupakan yang proses yang penting. Perlakuan panas pada temperatur tinggi dapat memberikan sifat *Shape Memory Effect* (SME). Oleh karena itu, untuk

mendapatkan tekstur dan ukuran butir yang besar, cara mengontrol deformasi dan proses perlakuan panas menjadi penting pada produk SMA *Cu-based*. Ukuran dan tekstur butir rekristalisasi berkorelasi dengan tingkat deformasi, orientasi dan ukuran butir, temperatur *annealing* dan elemen mikro paduan. (Liu et al., 2017)

2.4.1 Homogenizing

Homogenizing merupakan proses perlakuan panas yang digunakan untuk menghomogenkan paduan dengan meningkatkan keseragaman komposisi kimia dan struktur mikro. Perlakuan panas ini merupakan prosedur umum dalam pengecoran. *Homogenizing* dapat diaplikasikan pada paduan dengan rentangan soldifikasi yang luas, contohnya adalah nikel titanium (NiTi) atau paduan tembaga lainnya. Hal ini membuat proses *homogenizing* dapat digunakan untuk meningkatkan keuletan. Proses *homogenizing* juga dapat menghilangkan segregasi kimia atau metalurgi yang biasanya diketahui sebagai *coring*. Waktu dan temperatur untuk proses *homogenizing* bervariasi ditentukan oleh paduan, ukuran butir, dan derajat *homogenizing* yang diinginkan. Waktu tahan bervariasi dari 3 hingga 10 jam. Untuk temperatur yang digunakan di atas temperatur *annealing* (50°C) dari garis solidus. (A. International, 1991)

2.4.2 Annealing

Annealing adalah perlakuan panas dengan tujuan melunakkan dan meningkatkan keuletan pada logam dan paduan. Proses *annealing* umumnya dapat diaplikasikan pada hasil produk pengecoran. Proses tersebut mencakup pemanasan, *holding*, dan pendinginan, dan deskripsi proses yang tepat harus mencakup laju pemanasan, temperatur, waktu pada temperatur, atmosfer, dan laju pendinginan di mana masing-masing dapat mempengaruhi hasil. Pada proses *annealing* terjadi pertumbuhan butir yang dapat menyebabkan ukuran butir akan semakin besar, keuletan meningkat serta kekerasan dan kekuatan akan semakin menurun. Hal ini dapat berpengaruh pada tingginya temperatur pemanasan dan waktu tahan pada proses *annealing*. (A. International, 1991)

Salah satu jenis *annealing* yang dapat digunakan adalah proses *stress-relief annealing*. Proses ini digunakan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terdapat pada benda kerja. Proses ini membantu untuk mengurangi terjadinya distorsi dan variasi dimensi yang mungkin terjadi pada bagian yang memiliki tegangan. (Groover, 2010)

Pada temperatur ruangan, proses *annealing* dapat membuat fasa martensit pada paduan untuk meningkatkan tegangan namun menurunkan nilai *Ultimate Tensile Strength*, dengan semakin tingginya temperatur *annealing* yang digunakan maka akan membuat paduan semakin ulet (Tadayyon et al., 2016). Tabel 2.3 menunjukkan temperatur pemanasan untuk paduan tembaga.

Tabel 2.3 Temperatur pemanasan proses *annealing* untuk paduan tembaga (A. International, 1991)

| <i>Alloy</i> | <i>Common Name</i> | Temperatur Pemanasan (°C) |
|--------------|------------------------|---------------------------|
| C23000 | <i>Red Brass</i> | 425 - 725 |
| C24000 | <i>Low Brass</i> | 425 - 700 |
| C26000 | <i>Cartridge Brass</i> | 425 - 750 |
| C26800 | | |
| C27000 | <i>Yellow Brass</i> | 425 - 700 |
| C27400 | | |
| C28000 | <i>Muntz Metal</i> | 425 - 600 |
| C68700 | <i>Aluminium Brass</i> | 425 - 600 |

2.4.3 Solution Treatment

Solution treatment adalah proses perlakuan panas yang memiliki tujuan untuk memperoleh fasa tunggal dan untuk melarutkan fasa dan presipitat yang terdapat paduan. Proses perlakuan panas dimulai dengan memanaskan paduan pada temperatur di atas garis solvus, kemudian ditahan untuk beberapa waktu (*holding*) pada temperatur tersebut, dan selanjutnya dilakukan proses pendinginan cepat (*rapid cooling*) dengan media pendingin tertentu untuk mencegah terbentuknya presipitat pada paduan. (A. International, 1991)

Media pendingin adalah bahan yang digunakan pada perlakuan panas untuk proses pendinginannya. Dimana media pendingin dapat membantu untuk mengendalikan laju pendinginan pada logam. Sehingga dapat mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekaniknya. Oli dapat digunakan untuk menjadi media pendingin pada proses *solution treatment*. Terdapat beberapa jenis oli yang umum digunakan seperti oli mesin dan oli pelumas pada roda gigi. Proses *quench* dengan oli dapat diaplikasikan logam untuk pembentukan fasa martensit. Dimana ketika viskositas pada oli dapat berpengaruh untuk menurunkan laju pendinginan (*Cooling rate*). Terdapat beberapa cara untuk menaikkan laju pendinginan yaitu dengan memberikan agitasi, memanaskan oli diatas temperatur kamar, dan yang terakhir dapat diemulsikan dengan air. (S.H. Avner, 1974)

Brine dapat digunakan sebagai media pendingin pada proses perlakuan panas untuk logam *ferrous* dan *non-ferrous*. Komposisi yang umumnya digunakan untuk *brine* adalah air dengan campuran garam. Dengan menggunakan media pendingin *brine* akan membuat laju pendinginan menjadi tinggi dan proses pendinginan dapat dilakukan secara merata. Selain itu media *brine* dapat digunakan untuk menghindari *vapour blanket stage* pada saat proses pendinginan berlangsung. (Pizetta Zordão et al., 2019)

2.5 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian, yaitu pengujian komposisi, pengujian metalografi, pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), Pengujian Kekerasan, Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), dan pengujian *Shape Memory Effect* (SME).

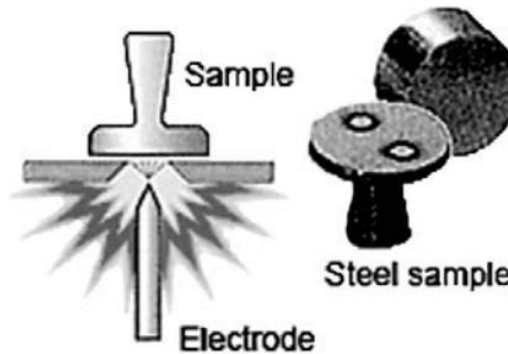
2.5.1 Pengujian Komposisi

Terdapat beberapa cara untuk melakukan pengujian komposisi, salah satunya adalah dengan menggunakan alat uji *Optical Emission Spectroscopy* (OES). OES adalah alat spektroskopi yang dapat digunakan mengukur secara kuantitatif emisi optik dengan eksitasi atom untuk menjelaskan analisis konsentrasi suatu unsur material. Analisis sampel pada OES didasarkan karena adanya pemecahan energi yang direpresentasikan dalam bentuk panjang gelombang dan melibatkan pergerakan elektron didalam suatu atom. (Twyman, 2015)

Dengan tujuan Pengujian OES adalah untuk menentukan komposisi unsur pada spesimen. Spesimen diberikan temperatur tinggi yang cukup untuk mengeksitasi atom dalam sampel dan atom akan menghasilkan pelepasan energi untuk kembali tempat untuk kembali. Intensitas cahaya pada pengujian OES dapat diemisikan pada panjang gelombang tertentu diukur dan dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur yang diinginkan. Terdapat beberapa jenis OES yang dapat digunakan seperti *Inductively Coupled Plasma* (ICP), *Direct Current Plasma* (DCP), *Microwave Plasma* (MP), *Microwave-induced Plasma* (MIP), *Microwave Plasma Torch* (MPT), *Glow Discharge* (GD), dan *Laser-induced Plasma* (LIP), dan Spark OES. (Widyastuti et al., n.d.)

Seperti yang terdapat pada Gambar 2.10, Spark OES menggunakan electric discharge sebagai energi untuk mengeksitasi spesimen. Dengan menggunakan elektroda dengan tegangan tinggi yang akan menghasilkan electrical discharge yang akan menyebabkan permukaan material menjadi panas. Atom menghasilkan garis-garis emisi yang unik. Garis-garis emisi

digunakan untuk mengetahui konsentrasi unsur di dalam specimen melalui intensitas dari cahaya. Pengujian Spark OES adalah metode yang efektif untuk untuk memproses paduan logam dan umumnya digunakan pada industri logam termasuk *die caster* dan *manufacturing*. (Widyastuti et al., n.d.)



Gambar 2.10 Mekanisme kerja spark OES (Widyastuti et al., n.d.)

2.5.2 Pengujian Metalografi

Metalografi adalah ilmu yang mempelajari tentang struktur mikro pada suatu logam dan karakteristiknya. Metalografi penting untuk mengetahui ukuran butir, distribusi fasa, dan untuk mengetahui adanya inklusi (kotoran) dalam suatu logam. Hasil dari metalografi tersebut dapat menjadi acuan untuk menentukan suatu material telah sesuai dengan spesifikasi atau untuk mengetahui proses yang sudah dialami oleh material. (Manurung, 2020)

Sebelum melakukan pengujian metalografi diperlukan preparasi pada benda kerja atau sampel. Proses preparasi dilakukan agar permukaan dari sampel merata secara keseluruhan agar sampel terlihat dan tergambar bentuk struktur mikro nya dari mikroskop sehingga cahaya yang berasal dari mikroskop akan memantul ke mata kita. Berikut merupakan tahap tahap dari preparasi spesimen untuk pengujian metalografi.

1. *Sectioning*

Sectioning adalah tahap pemilihan spesimen yang akan dilakukan uji penelitian. Dimana pemilihan sampel didasarkan pada tujuan pengamatan serta pengambilan sampel dilakukan di daerah di mana mikro struktur dan makro struktur akan diamati.

2. *Cutting*

Cutting atau pemotongan adalah proses pemotongan pada spesimen sesuai dengan standar yang diinginkan. Selama proses pemotongan terdapat gesekan antara spesimen dengan mesin pemotong yang dapat menimbulkan panas pada daerah yang terkena pemotongan dan dapat merubah struktur mikro dari spesimen tersebut. Namun hal ini dapat diatasi dengan pemberian *coolants* untuk menghilangkan sisa tegangan dari logam.

3. *Mounting*

Mounting adalah proses untuk mendapatkan bentuk spesimen yang sesuai untuk akan mempermudah pada proses preparasi selanjutnya.

4. *Grinding*

Grinding adalah proses untuk mendapatkan permukaan yang rata di spesimen. Proses *grinding* atau pengamplasan dapat dilakukan dimulai dari nomor mesh yang rendah (kasar) hingga ke yang tinggi (halus). Pemberian *coolants* diperlukan untuk memperkecil gesekan panas yang merubah struktur mikro.

5. *Polishing*

Polishing adalah proses preparasi spesimen dengan tujuan memperhalus dan mengkilatkan permukaan spesimen agar struktur mikro dapat terlihat pada mikroskop optik.

6. *Etching*

Etching adalah proses untuk memberikan kontras pada permukaan spesimen dengan cara mencelupkan spesimen tersebut ke dalam larutan etsa.

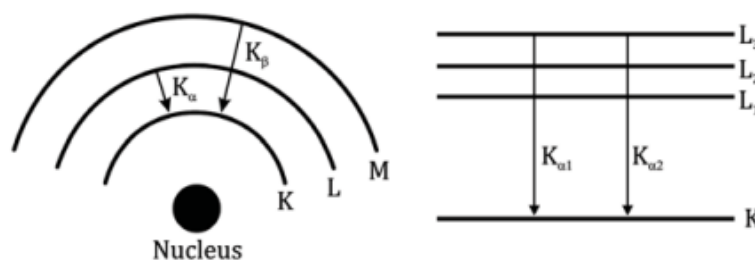
7. Observasi Mikroskopis

Observasi Mikroskopis adalah tahap terakhir dengan tujuan untuk mengetahui struktur mikro dari spesimen dengan menggunakan mikroskop optik. (A. International, 2004)

2.5.3 Pengujian X-Ray Diffraction

Pengujian *X-Ray Diffraction* atau XRD telah dilakukan untuk mengetahui sifat struktur material dalam skala atom. XRD adalah pengujian material yang dapat digunakan dalam analisis kualitatif mencakup identifikasi unsur material dan senyawa, dan juga secara kualitatif yang mencakup komposisi, ukuran kristal, tegangan sisa, dan lain-lain. XRD. dapat memenuhi banyak persyaratan penyelidikan struktural permukaan yang ideal. Pengujian XRD memiliki aplikasi yang luas untuk mempelajari struktur permukaan pada material. Terdapat instrumen yang XRD yang disebut *X-Ray Diffractometry*. *X-Ray Diffractometry* dengan menggunakan sinar-X untuk menganalisa material. Dimana sinar-X ini datang secara terus menerus yang berubah sudutnya sehingga menciptakan sebuah spektrum intensitas difraksi dengan sudut antara sinar datang dan sinar difraksi. (Feidenhans'1, 1989)

Sinar-X adalah sinar berenergi tinggi yang berasal dari radiasi elektromagnetik, dengan terjadinya tumbukan antara target benda kerja dengan sinar-X yang merubah energi kinetik menjadi radiasi sinar-X.



Gambar 2.11 Skema radiasi Sinar-X pada benda kerja (Widyastuti et al., n.d.).

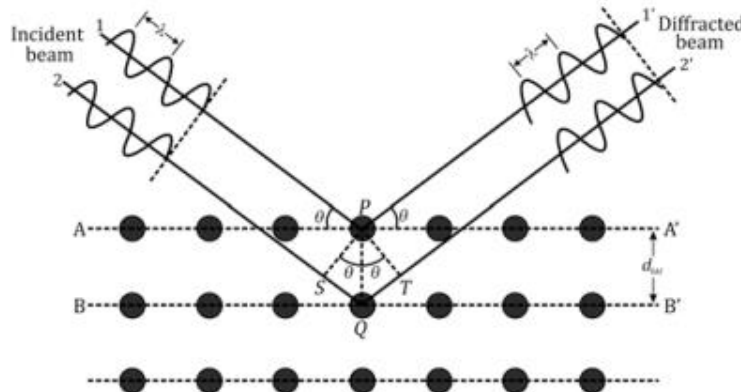
Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.11, Terdapat $K\alpha$ adalah perpindahan electron yang terjadi dari kulit L kekulit K. $K\alpha$ mempunyai karakteristik khusus sehingga dapat berpengaruh pada Panjang gelombang yang akan diberikan. Ketika $K\alpha$ memiliki kemiripan pada Panjang gelombang dapat disebut *K α Doublet*. Didalam pengujian XRD terdapat anoda difraktometer yang dapat menghantarkan elektron seperti anoda krom (Cr), tembaga (Cu), besi (Fe), molybdenum (Mo). Namun yang umum digunakan adalah Cu selain dapat menghindari terjadinya latar belakang pada sinar yang akan berflouresensi, Logam Cu juga lebih mudah untuk didinginkan.

Dengan pengujian XRD dapat menggunakan Hukum Bragg (*Bragg's Law*) dapat membantu untuk menentukan jarak antara bidang atom dari suatu kristal, sehingga dapat diketahui struktur kristal dari suatu material. Pada Gambar 2.12 menunjukkan difraksi Bragg pada sebuah bidang kristal. Dengan adanya dua gelombang dalam satu fasa, sinar 1 dan sinar 2 yang terdefleksi oleh dua bidang kristal (Kristal A dan B). Gelombang yang terdefleksi ini akan tetap berada pada satu fasa jika memenuhi persamaan 2.1 berikut.

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

Dengan :

- n = Orde difraksi
- λ = Panjang gelombang sinar-X
- d = Jarak antar kisi kristal
- θ = Sudut sinar datang



Gambar 2.12 Difraksi bragg oleh bidang kristal(Widyastuti et al., n.d.)

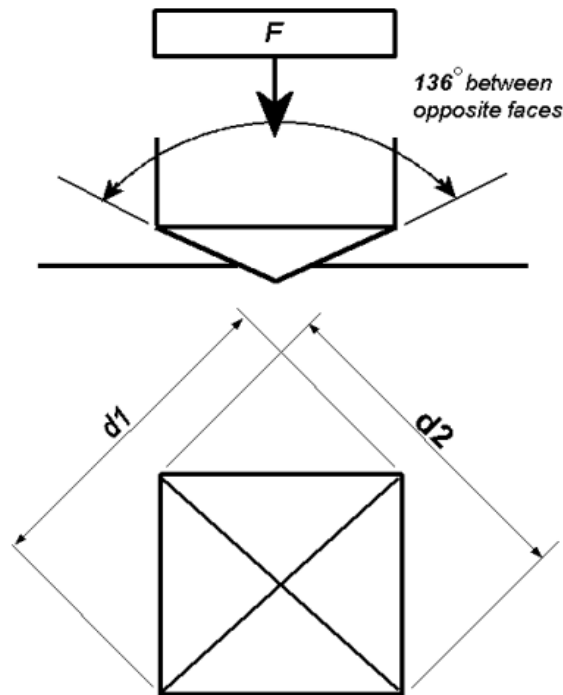
Jarak antar bidang atau *interplanar d-spacing* (dhkl) adalah jarak antara dua bidang parallel dari atom yang memiliki indeks miller yang sama sehingga membentuk suatu struktur kristal. Perhitungan jarak antar bidang menggunakan persamaan 2.2 sebagai berikut.

$$dhkl = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \dots\dots\dots (2.2)$$

2.5.4 Pengujian Kekerasan

Kekerasan adalah salah satu sifat mekanik pada material dengan kemampuan material dalam menahan deformasi plastis seperti indentasi (tusukan), penetrasi dan abrasi. Tujuan dari pengujian kekerasan adalah untuk menentukan kesesuaian suatu material untuk aplikasi tertentu, atau perlakuan yang tepat untuk material tersebut. Terdapat beberapa jenis pengujian kekerasan yang dapat ditentukan berdasarkan indentor (penusuk). Yang pertama adalah Pengujian Vickers dengan dengan indentasi berbentuk piramida dengan nilai kekerasan dapat dilambangkan dengan HV. Yang kedua adalah indentor yang berbentuk piramida yaitu Rockwell dengan nilai kekerasan dapat dilambangkan dengan HRC. Dan yang terakhir dengan yang berbentuk bola adalah Brinell dengan nilai kekerasan dapat dilambangkan dengan HB. Terdapat standar pengujian kekerasan untuk setiap jenis dimana dengan metode Brinell standarnya adalah ASTM E10, untuk metode Vickers dengan standar ASTM E92-17 dan metode Rockwell dengan standar ASTM E18.

Terdapat pada Gambar 2.13 untuk metode pengujian kekerasan Vickers terdiri dari indentasi material uji dengan indentor intan, berupa piramida siku-siku dengan alas persegi dengan nilai sudut 136° antar muka berlawanan yang diberikan beban 1 sampai 100 kgf. Beban penuh diberikan selama 10 hingga 15 detik. Dua diagonal lekukan akan meninggalkan bekas di permukaan material setelah pengangkatan beban. Setelah itu dilakukan pengukuran menggunakan mikroskop dan rata-ratanya dihitung. Luas permukaan miring dari lekukan dihitung. Kekerasan Vickers adalah hasil bagi yang diperoleh dengan membagi beban kgf dengan luas lekukan mm persegi.



Gambar 2. 13 Indentasi pengujian kekerasan vickers (Roell, 2011).

Untuk mendapatkan nilai kekerasan Vickers dapat menggunakan persamaan berikut.

$$HV = \frac{(1,854)P}{d^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan :

HV : Nilai kekerasan Vickers (kg/mm^2)

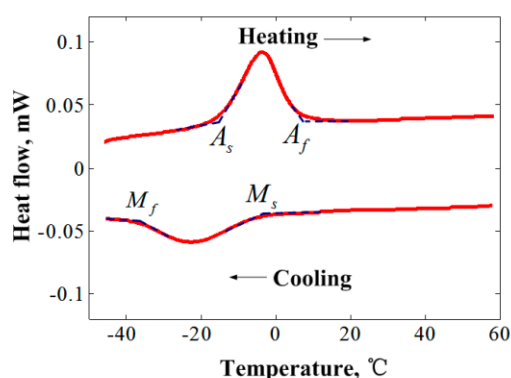
P : Beban (kg)

d : Panjang diagonal (mm)

2.5.5 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry*

Differential Scanning Calorimetry (DSC) adalah pengujian untuk mengukur kalor yang dapat diserap atau dikeluarkan dari sebuah material yang dipanaskan atau didinginkan dalam jangka temperatur tertentu, sehingga bisa didapatkan temperatur transformasi dari material yang diuji. Terdapat dua jenis pengujian DSC yaitu *heat-flux* DSC untuk mengukur perbedaan temperatur pada luar permukaan di logam *refrence*, dan terdapat *power-compensated* DSC yang berfungsi untuk mengukur perbedaan daya listrik untuk menjaga antara temperatur pada benda kerja dengan temperatur pada logam *refrence* tetap sama.

Dengan prinsip pengujian *power-compensated* DSC yaitu dengan menaikkan temperatur secara terus-menerus pada sampel atau benda kerja dengan pembandingnya yang terdapat di monitor, dengan tujuan untuk mempertahankan temperatur agar temperatur keduanya selalu sama. Penambahan panas yang terjadi dicatat pada *recorder*, kemudian panas ini digunakan juga untuk mengganti kekurangan atau kelebihan karena reaksi endoterm atau eksoterm yang terjadi pada sampel atau benda kerja. Dan data yang diperoleh akan diatur ke dalam kurva yang dapat disetarakan dengan suatu spektrum yang disebut termogram. Perbedaan temperatur antara kedua material tersebut terus dideteksi dan dicatat sebagai suatu puncak kurva. Gambar 2.14 menunjukkan hasil kurva DSC pad benda kerja Cu-Zn-Al *Shape Memory Alloy*.



Gambar 2.14 Kurva *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) untuk benda kerja *Shape Memory Alloy* (SMA) (Jiang et al., 2018).

Pengujian DSC dapat digunakan untuk menganalisa transformasi temperatur dari fasa *austenite* menuju *martensite*. Perubahan fasa ini seperti yang terdapat pada gambar 2.14 yaitu terdapat A_s (*Austenite Start*), A_f (*Austenite Finish*), M_s (*Martensite Start*), dan M_f (*Martensite Finish*). Oleh karena itu, pengujian DSC akan digunakan untuk mengetahui empat karakteristik temperatur transformasi fasa yang terdapat pada *Shape Memory Alloy*

2.5.6 Pengujian *Shape Memory Effect*

Pengujian *Shape Memory Effect* (SME) adalah teknik pengujian yang ditujukan untuk mengetahui presentase *shape memory recovery* yang terdapat pada paduan *shape memory alloys* (SMAs) yang telah dideformasi. Pengujian SME dilakukan dengan basis dari standar yaitu ASTM F2082-01. Dari standar tersebut terdapat beberapa bentuk spesimen yang digunakan yaitu *strip*, *wire*, dan *tube* dengan ketebalan atau diameter 0,3-3,0 mm. Untuk melakukan pengujian SME, benda kerja perlu didinginkan terlebih dahulu sampai melewati M_f dimana fasa spesimen yang didapatkan adalah sepenuhnya *twinned martensite*. Lalu spesimen diberikan beban dengan ditekuk hingga mencapai sudut tertentu. Setelah itu spesimen dipanaskan hingga fasanya austenit sepenuhnya atau di atas temperatur A_f hingga dan terjadi pemulihan bentuk pada spesimen (Chanmuang et al., 2018). Terdapat sebuah persamaan untuk menentukan nilai *Shape Memory Recovery*, yaitu sebagai berikut:

$$SME = \frac{\theta_0 - \theta_t}{\theta_0} \times 100\% \dots \dots \dots (2.4)$$

Dengan :

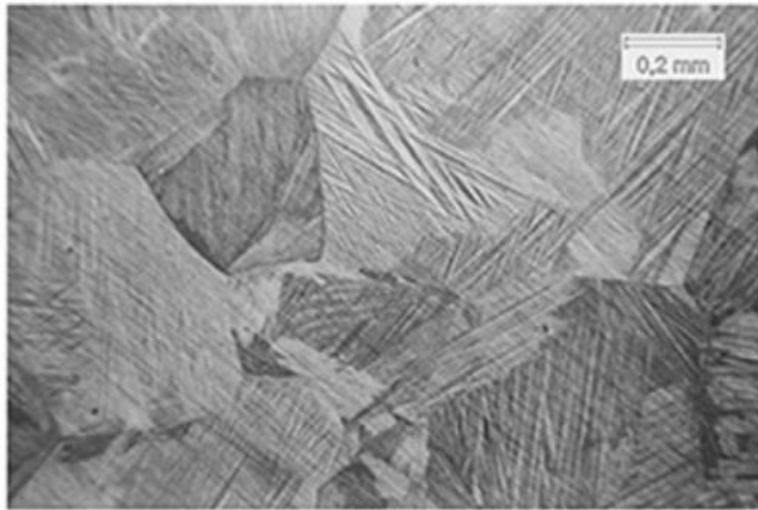
θ_0 = Sudut awal setelah dideformasi

θ_t = Sudut akhir setelah dipanaskan

2.6 Penelitian Sebelumnya

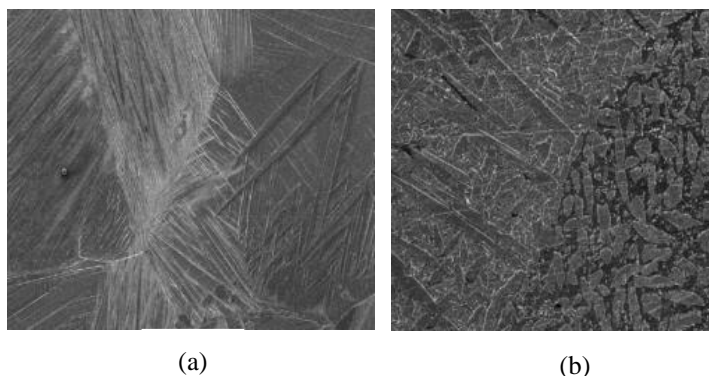
Pada tahun 2021, Asanovic et al. melakukan penelitian pada efek komposisi dan metode *quenching* terhadap pemulihan regangan pada paduan Cu-Zn-Al. dimana komposisi yang digunakan adalah Cu-(25,4 ; 22,30; 21,6)Zn-(3,3; 5,1; 5,6)Al yang diketahui sebagai spesimen A B dan C. dimana spesimen diberikan perlakuan *homogenization* pada temperatur 850°C selama 2 jam dan proses *annealing* pada temperatur 830°C. Selanjutnya diberikan perlakuan *hot-forged* dan *cold-rolled* yang kemudian dilanjutkan dengan *quenching* dengan media *water bath* dan proses *aging*. Dimana pada paduan dengan komposisi aluminium 3,3% mempunyai kekuatan tarik dan elongasi yang lebih baik dari paduan yang lain. Untuk semua paduan menunjukkan nilai *shape memory effect* yang baik di atas nilai 70%. Pada Gambar 2.15 menunjukkan hasil mikrostruktur ditemukan fasa martensit, presipitasi α dan γ pada batas butir dan matriks. Dan hasil penelitiannya adalah untuk paduan dengan komposisi Aluminium 3,3%

dan 5,1% menunjukkan *shape memory life* yang baik namun dengan Batasan jika ingin dioperasikan tidak disarankan pada temperatur di atas 50°C (Asanovic et al., 2021).



Gambar 2.15 Struktur mikro Cu-21.6Zn-5.6Al dengan perlakuan *direct quench* (Asanovic et al., 2021).

Pada tahun 2013, Aldirmaz melakukan penelitian studi analisis struktur mikro pada paduan *shape memory* dengan komposisi Cu-26.04Zn-4.01Al. dengan proses perlakuan panas yang diberikan adalah homogenisasi pada temperatur 850°C selama 30 menit. Setelah itu diberikan perlakuan *Solution Treatment* dengan media pendingin *iced brine water* dan menggunakan pendinginan didalam tungku hingga temperatur ruang. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah *Shape memory alloy* untuk paduan *Cu-based* sensitive terhadap perlakuan panas. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16 dimana pada spesimen dengan media pendingin *iced brine water* menghasilkan fasa martensit secara utuh di struktur mikro. Dan pada pendinginan di dalam tungku menghasilkan fasa martensit dan beberapa transformasi menjadi fasa α . Dengan terbentuknya fasa α dapat menyebabkan penurunan sifat *shape memory*. Berikut adalah gambar struktur mikro yang terbentuk (Aldirmaz et al., 2013).



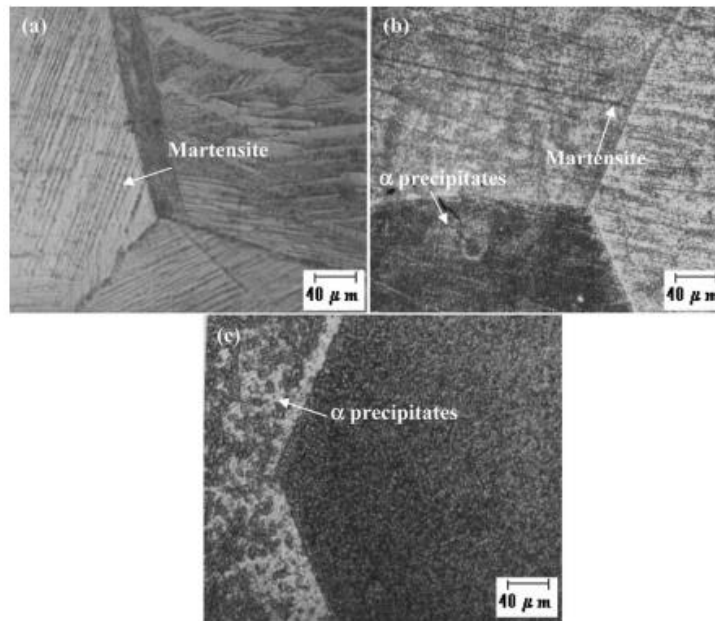
Gambar 2.16 Hasil pengujian struktur mikro dengan alat uji SEM pada gambar (a) dengan media pendingin *iced brine water* dan gambar (b) dengan pendinginan tungku (Aldirmaz et al., 2013)

Pada tahun 1991, Wang et al. melakukan penelitian pada pengaruh mikroelemen pada penghalusan dan pertumbuhan ukuran biji struktur mikro paduan CuZnAl *shape memory alloy*. Mikroelemen yang digunakan adalah Zirkonium (Zr), Titanium (Ti), Boron (B), dan Besi (Fe). Proses dimulai dengan pembuatan paduan CuZnAl dengan unsur tembaga, seng, aluminium, zirkonium, titanium boron dan besi kedalam produk cor (ingots). Sehingga terbentuk paduan, CuZnAl, CuZnAlZr, CuZnAlTi, CuZnAlB, CuZnAlFe. Ingots dengan dimensi 50mm × 400mm diberikan perlakuan panas homogenisasi pada temperatur 800°C selama dua jam. Dilanjutkan dengan proses *hot-rolled* pada temperatur 600°C dan spesimen diberikan proses *annealing* pada temperatur 550°C selama satu jam. Dan hasil dari penelitian ini adalah terdapat nilai energi aktivasi yang berpengaruh terhadap pertumbuhan butir pada struktur mikro. paduan dengan penambahan sedikit microelement dapat meningkatkan temperatur dan ketergantungan temperatur yang lebih tinggi. Kemudian ukuran spesimen berpengaruh selama pertumbuhan butir, semakin besar. Gambar 2.17 menunjukkan struktur mikro pada paduan CuZnAlZr (Wang et al., 1991).



Gambar 2.17 Struktur mikro pada CuZnAlZr dengan perbesaran 50 μ m (Wang et al., 1991).

Pada tahun 2007, Sampath et al. melakukan penelitian terhadap pengaruh proses termal pada mikro struktur dan karakteristik *shape memory* pada CuZnAl *shape memory alloy*. Material paduan yang digunakan adalah Cu-30,36Zn-2,19Al. lalu diberikan perlakuan homogenisasi pada temperatur 800°C selama dua jam. Selanjutnya diberikan perlakuan *solution treatment* pada temperatur 800°C selama 30 menit dengan *direct quenching* pada media air, oli dan *brine*. Hasil pada penelitian tersebut adalah pada hasil metalografinya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18 media yang menggunakan media pendingin *brine* menghasilkan fasa martensit sepenuhnya di struktur mikro., pada media air menghasilkan fasa martensit dan α . Dan pada media pendingin oli menghasilkan fasa α sepenuhnya di struktur mikro. Selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan Vickers. Dan didapatkan nilai kekerasan pada media pendingin *brine*, air, dan oli berturut-turut adalah 165-169 VHN; 135-144 VHN; 135-138VHN (Sampath, 2007).

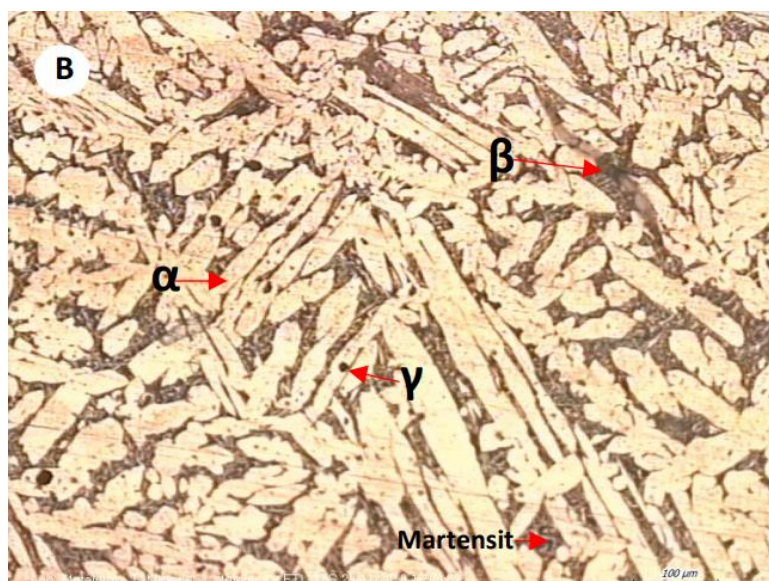


Gambar 2.18 Fasa pada struktur mikro untuk media pendingin (a) *Brine* (b) Air dan (c) Oli (Sampath, 2007).

Pada tahun 2020, Rizki et al. melakukan penelitian pengaruh variasi temperatur *annealing* dan media pendingin pada proses *heat treatment* terhadap *shape memory effect* dan struktur mikro. Pada penelitian ini komposisi paduan yang digunakan adalah Cu-21Zn-5Al. Perlakuan panas yang diberikan adalah dengan dihomogenkan pada temperatur 850°C selama 2 jam dan kemudian diberikan proses *annealing* selama 4 jam untuk temperatur 425°C, 550°C, dan 600°C. dan terakhir diberikan proses *solution treatment* pada dengan media pendingin *dry ice* dan *brine* pada temperatur 850°C selama 10 menit. Pada salah satu hasil pengujian metalografi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19 dengan menggunakan media pendingin *brine* dengan temperatur *annealing* fasa yang terbentuk pada struktur mikro adalah α , β , γ dan martensit. Hal ini dikarenakan pada proses pemanasan, α yang terlarut dalam β tidak sempat melakukan kristalisasi secara ekuilibrium. Dan hal tersebut menyebabkan dengan menggunakan *brine* dengan temperatur *annealing* yang tinggi memicu meningkatkan kadat martensit pada logam paduan. Hasil dari penelitiannya adalah sebagai berikut:

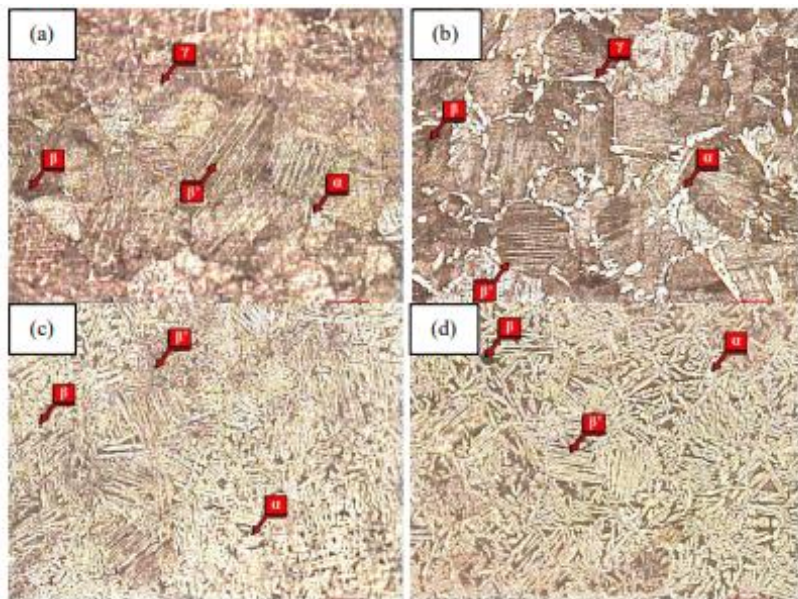
1. Semakin tinggi temperatur *annealing* maka laju pendinginan pada paduan semakin Panjang. Hal tersebut sangat berpengaruh pada proses kristalisasi yang terjadi, dimana pada temperatur *annealing* tertinggi yaitu 600°C dengan media pendingin *dry ice* memiliki fasa martensit paling sedikit yaitu 17,4% dan memiliki sifat *shape memory effect* paling buruk, dengan *recovery* sebesar 10%. Sebaliknya pada temperatur *annealing* terendah yaitu 425°C dengan media pendingin *brine* memiliki fasa martensit yang paling banyak yaitu 61,8% dan memiliki sifat *shape memory effect* paling baik dengan *recovery* sebesar 38,3%.
2. Pendinginan paling cepat terjadi pada media pendingin *brine solution*. Hal tersebut dikarenakan, wujud cair *brine solution* membuat proses pendinginan terjadi sangat cepat sehingga membentuk martensit yang sangat banyak sebesar 61,8% dan memiliki sifat *shape memory effect* yang baik dengan nilai *recovery* sebesar 38,3%. Sedangkan, wujud padat yang dimiliki oleh *dry ice* membuat proses pendinginan pada spesimen terjadi tidak merata, sehingga cenderung lebih dominan fasa α yang

terbentuk yaitu sebesar 55,3% dan sifat *shape memory effect* yang dimiliki sangat rendah yaitu sebesar 10% (Rizki et al., 2020).



Gambar 2.19 Struktur mikro spesimen Cu-21Zn-5Al dengan perlakuan *annealing* pada temperatur 550 °C dan *direct quenching* pada media *brine* (Rizki et al., 2020).

Pada tahun 2021, Masrul et al. melakukan penelitian pengaruh variasi *quenching solution treatment* dan proses *artificial aging* terhadap struktur mikro dan kekerasan Cu-Zn-Al *Shape Memory Alloy*. Komposisi yang digunakan pada penelitian ini adalah Cu-11,9Zn-6,72Al. Spesimen diberikan perlakuan panas dengan homogenisasi pada temperatur 850°C selama 2 jam, proses *annealing* pada temperatur 500°C selama 4 jam, perlakuan *solution treatment* pada temperatur 850°C selama 10 menit dengan metode *direct quench* dan *step quench*. Media pendingin *solution treatment* yang digunakan adalah *ice water* dan *brine*. Terdapat 4 spesimen yaitu *Direct Quench Media Pendingin Brine* (DQB) *Direct Quench Media Pendingin Iced Water* (DQIW) *Step Quench Media Pendingin Brine* (SQB) *Step Quench Media Pendingin Iced Water* (SQIW). Dengan hasil penelitian pada hasil metalografinya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20 terbentuk fasa α , β , β' dan γ . Sama seperti pada spesimen *as cast*, fasa α berbentuk dendrit dan memiliki warna yang terang, fasa β memiliki warna yang gelap dan berada di belakang fasa yang lain, fasa β di sini bertindak sebagai matrix. Fasa β' berbentuk jarum yang berada di sekitar fasa β . Dan yang terakhir fasa γ yang berbentuk titik hitam. Didapatkan nilai kekerasan pada spesimen DQB; DQIW; SQB; SQIW secara berturut-turut adalah 235,67±4,92; 237±3,74; 137±2,74; 124,33±1,7 HV. Nilai *shape memory effect* yang didapatkan untuk Spesimen DQB; DQIW; SQB; SQIW secara berturut-turut adalah 25%, 25%, 50%, 35%. Hasil yang didapat pada penelitian ini adalah pengaruh variasi metode *quench* pada proses *solution treatment* paduan Cu-11,9Zn-6,72Al menghasilkan struktur mikro dengan bentuk yang berbeda. *step quench* menghasilkan fasa α dan β' yang lebih banyak dibandingkan *direct quench*, dan *step quench* tidak menghasilkan fasa γ . Untuk kekerasannya sendiri, *step quench* memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan *direct quench* (Masrul et al., 2021).

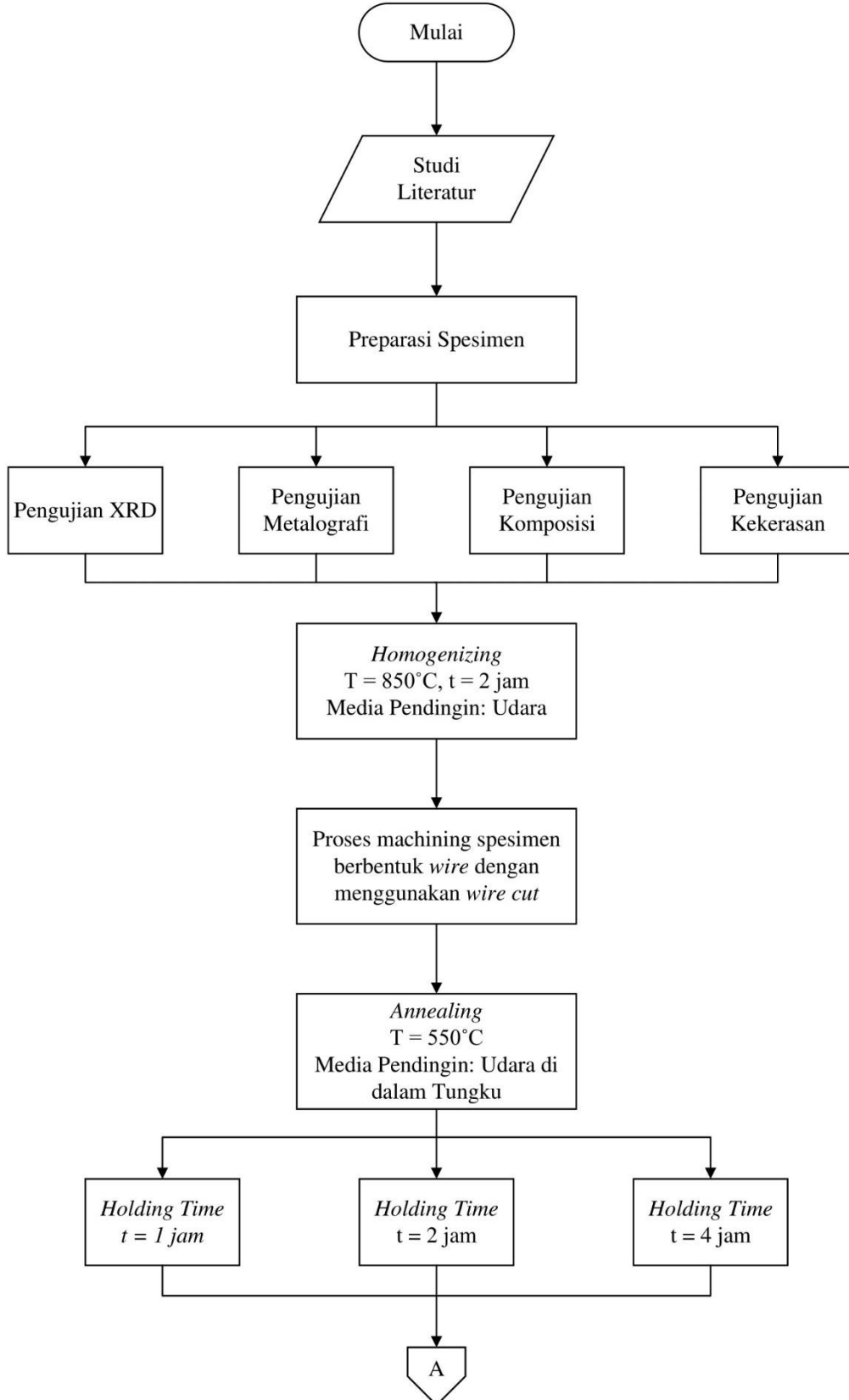


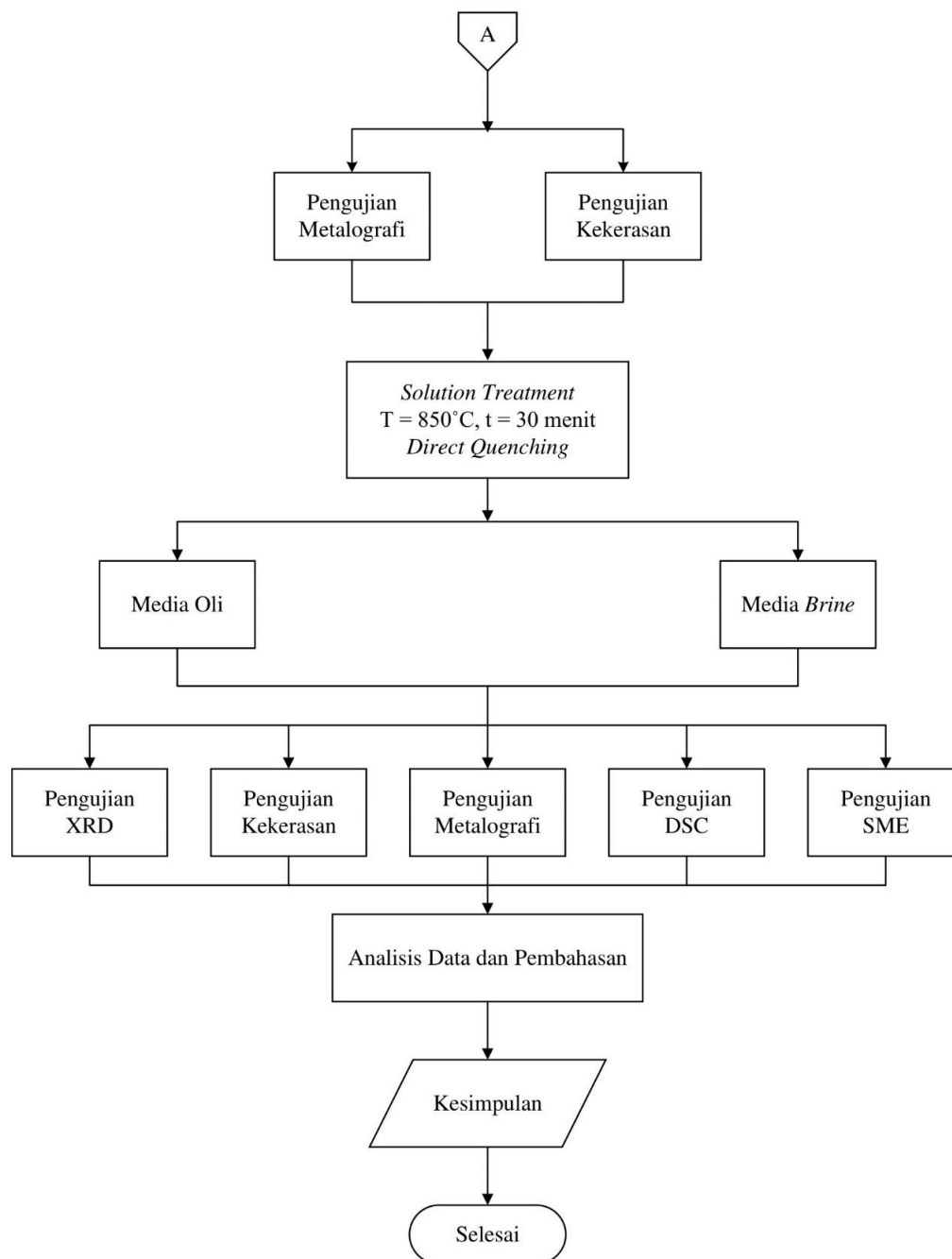
Gambar 2.20 Struktur Mikro Spesimen Cu-11,9Zn-6,72Al dengan Metode (a) *Direct Quench* Media Pendingin *Brine* (b) *Direct Quench* Media Pendingin *Iced Water* (c) *Step Quench* Media Pendingin *Brine* (d) *Step Quench* Media Pendingin *Iced Water* (Masrul et al., 2021).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Diagram alir yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:





Gambar 3.1 Diagram alir

3.2 Bahan Penelitian

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

1. Paduan Cu-Zn-Al

Paduan Cu-Zn-Al didapatkan dari proses pengecoran dengan komposisi sesuai dengan *ASM Handbook Volume 2*



Gambar 3.2 Produk cor spesimen Cu-Zn-Al (dokumentasi pribadi)

2. Bahan Etsa

Bahan etsa yang digunakan pada penelitian ini untuk logam paduan tembaga sesuai dengan Alaneme, (2018) dengan komposisi etsa yang digunakan sebagai berikut:

- a. 5 gr $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- b. 10 ml HCl
- c. 95 ml Etanol

3. *Brine* Solution

Brine Solution pada penelitian ini digunakan sebagai media pendingin. *Brine* Solution yang digunakan merupakan campuran dari H₂O atau aquades yang ditambahkan garam dengan kandungan non yodium.

4. Oli

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

3.3 Alat Penelitian

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

1. Gerinda Tangan

Alat ini digunakan untuk melakukan memotong bahan dalam preparasi bahan sebelum melakukan pengecoran.



Gambar 3.3 Gerinda tangan (dokumentasi pribadi)

2. Gerinda Duduk

Alat ini digunakan untuk melakukan preparasi logam hasil coran maupun preparasi spesimen uji sehingga dapat diperoleh dimensi yang sesuai.



Gambar 3.4 Gerinda duduk (dokumentasi pribadi)

3. Timbangan Digital

Alat ini digunakan untuk menimbang masa logam sesuai dengan target komposisi yang sudah dihitung.



Gambar 3.5 Timbangan digital (dokumentasi pribadi)

4. Gelas Ukur

Alat ini digunakan untuk mengukur bahan larutan etsa.

5. Mesin *Grinding* dan *Polishing*

Alat ini digunakan untuk melakukan proses *grinding* dan *polishing* pada spesimen paduan untuk pengujian metalografi.

6. Kertas Amplas

Alat ini digunakan untuk melakukan proses *grinding* pada spesimen paduan untuk pengujian metalografi.

7. Alat *Wire Cut*

Alat ini digunakan untuk memotong spesimen yang digunakan untuk preparasi spesimen pengujian *shape memory effect*.



Gambar 3.6 Alat *wire cut* (dokumentasi pribadi)

8. Alat Uji Komposisi

Alat ini digunakan untuk menguji komposisi kimia yang terkandung di dalam paduan Cu-Zn-Al.



Gambar 3.7 Alat uji OES (dokumentasi pribadi)

9. Alat Uji Kekerasan

Alat ini digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari paduan Cu-Zn-Al sebelum dan sesudah proses perlakuan panas.



Gambar 3.8 Alat uji kekerasan Vickers (dokumentasi pribadi)

10. Mikroskop Optik

Alat ini digunakan untuk mengetahui struktur mikro dari spesimen paduan.



Gambar 3.9 Mikroskop Optik (dokumentasi pribadi)

11. Alat Uji *X-Ray Diffraction*

Alat ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk pada material dengan cara menembakkan sinar-X pada material tersebut.

12. *High Temperatur Furnace*

Alat ini digunakan untuk melakukan proses perlakuan panas dengan memanaskan spesimen hingga temperatur tertentu.



Gambar 3.10 *Heat temperature furnace* (dokumentasi pribadi)

13. Alat Uji DSC

Alat ini digunakan untuk mengetahui temperatur *martensite finish*, *martensite start*, *austenite start*, dan *austenite finish* dari paduan Cu-Zn-Al.

14. Alat Uji SME

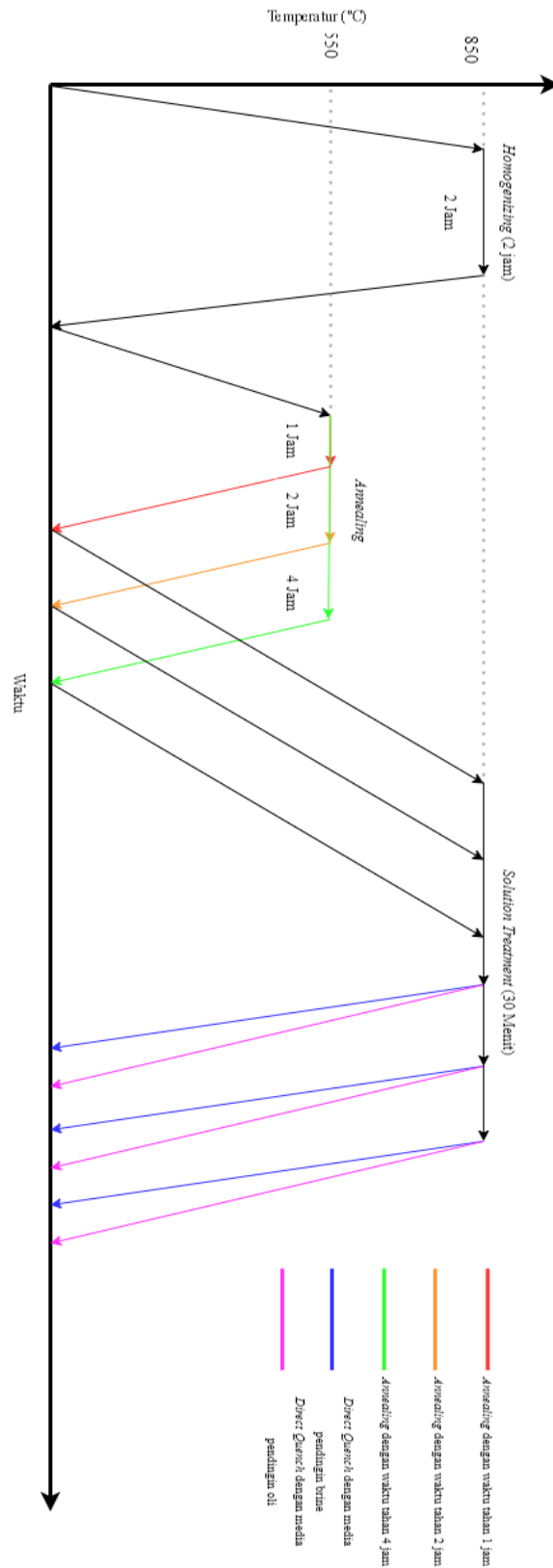
Alat ini digunakan untuk mengetahui nilai shape memory recovery dari paduan Cu-Zn-Al.



Gambar 3.11 Alat uji SME (dokumentasi pribadi)

3.4 Kurva Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang akan digunakan terletak pada proses perlakuan panas. Proses perlakuan panas yang akan digunakan pada penelitian ini adalah *homogenizing*, *annealing*, *solution treatment* dengan metode *direct quenching*.



Gambar 3.12 Kurva Variabel Penelitian

3.5 Prosedur Penelitian

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

3.5.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Homogenizing*

Prosedur yang digunakan pada proses perlakuan panas *homogenizing* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

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

3.5.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Annealing*

Prosedur yang digunakan pada proses perlakuan panas *annealing* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Spesimen disiapkan.
2. *Furnace* untuk perlakuan panas disiapkan.
3. Spesimen dimasukkan ke dalam *furnace*, kemudian spesimen dipanaskan hingga temperatur 550°C dan ditahan selama 1 jam.
4. Spesimen dikeluarkan dari *furnace* dan dibiarkan dingin di udara.
5. Langkah 1-4 diulangi, namun dengan waktu tahan 2 jam dan 4 jam.

3.5.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Solution Heat Treatment*

Prosedur yang digunakan pada proses perlakuan panas *Solution Treatment* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

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

3.6 Pengujian

Pengujian yang digunakan pada penelitian ini adalah pengujian komposisi kimia, pengujian *X-Ray Diffraction*, pengujian metalografi, pengujian kekerasan, pengujian *Differential Scanning Calorimetry*, dan pengujian *Shape Memory Effect*. Proses pengujiannya adalah sebagai berikut:

3.6.1 Pengujian Komposisi Kimia

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

3.6.2 Pengujian X-Ray Diffraction

Pengujian *X-Ray Diffraction* atau XRD pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui fasa dan juga struktur kristal yang terbentuk pada material yang digunakan pada penelitian ini dengan memancarkan sinar x pada spesimen uji.

3.6.3 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan melalui pengamatan menggunakan *Metallurgical Microscope* OLYMPUS BX51MRF. Dengan mengamati topografi dan struktur mikro pada suatu material yang telah dipreparasi dan diamati dengan menggunakan mikroskop. Larutan etsa yang digunakan mengacu pada referensi dari Aleneme, (2018).

3.6.4 Pengujian Differential Scanning Calorimetry

Alat uji *Differential Scanning Calorimetry* (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 tertentu. Terdapat puncak endotermik dan eksotermik akan muncul saat sampel menyerap atau mengeluarkan energi akibat adanya transformasi. Sehingga akan keluar suatu grafik yang mendefinisikan awal, puncak, dan akhir dari perubahan fasa material. Pengujian DSC pada paduan *shape memory alloy* mempunyai tujuan untuk mencari transformasi temperatur M_s , M_f , A_s , dan A_f , dimana transformasi temperatur dapat menimbulkan sifat *shape memory effect*.

3.6.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dengan menggunakan metode Vickers. Spesimen dipreparasi hingga permukaannya halus dan diberikan indentasi dengan standar ASTM E92-17.

3.6.6 Pengujian Shape Memory Effect

Pengujian *Shape Memory Effect* (SME) mengacu pada standar spesimen yang dituliskan pada ASTM F2082-01. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui presentase *recovery* dari paduan *Shape Memory Alloy* (SMA) yang telah terdeformasi.

3.7 Jadwal Penelitian

Jadwal penelitian ditunjukkan oleh Tabel 3.1 dimana terdiri dari studi literatur, bimbingan, persiapan alat dan bahan, proses perlakuan panas, pengujian dan proses pembuatan laporan akhir. Tabel 3.1 adalah 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 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



3.8 Rancangan Penelitian

Rancangan dari penelitian ini memiliki beberapa sampel dengan variabel waktu tahan pada proses *annealing* dan media pendingin pada proses *solution treatment* seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian

| Nama Spesimen | Holding Time Annealing | Media Pendingin | Pengujian | | | | | |
|----------------------------------|------------------------|-----------------|-----------|-------------|-----|-----|-----|-----------|
| | | | OES | Metalografi | XRD | DSC | SME | Kekerasan |
| <i>As Cast</i> | - | - | ✓ | ✓ | ✓ | - | - | ✓ |
| <i>As Cast</i> (Homogenizing) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| A1H | 1 | Udara | - | ✓ | - | - | - | ✓ |
| A2H | 2 | Udara | - | ✓ | - | - | - | ✓ |
| A4H | 4 | Udara | - | ✓ | - | - | - | ✓ |
| DQBR1H | 1 | Brine | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ |
| DQOL1H | 1 | Oli | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ |
| DQBR2H | 2 | Brine | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ |
| DQOL2H | 2 | Oli | - | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ |
| DQBR4H | 4 | Brine | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| DQOL4H | 4 | Oli | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia Cu-16,8Zn-6,99Al

Paduan logam Cu-Zn-Al adalah logam paduan yang terdiri dari unsur tembaga, seng, dan aluminium. Proses pembentukan paduan Cu-Zn-Al adalah dengan proses pengecoran.

Dilakukan Pengujian komposisi kimia untuk mengetahui komposisi dari hasil produk cor Cu-Zn-Al *shape memory alloy*. Dengan menggunakan alat uji *Optical Emission Spectroscopy* yang diuji di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Hasil dari pengujian komposisi kimia menunjukkan terdapat unsur seng 16,8%, unsur aluminium 6,99% dan unsur tembaga *balance*. Sehingga paduan CuZnAl Bernama Cu-16,8Zn-6,99Al dan komposisi tersebut telah sesuai dengan range *Shape Memory Alloy* CuZnAl berdasarkan *ASM Handbook Vol 2* seperti yang terdapat pada tabel 4.1 sebagai berikut (A. International, 1998).

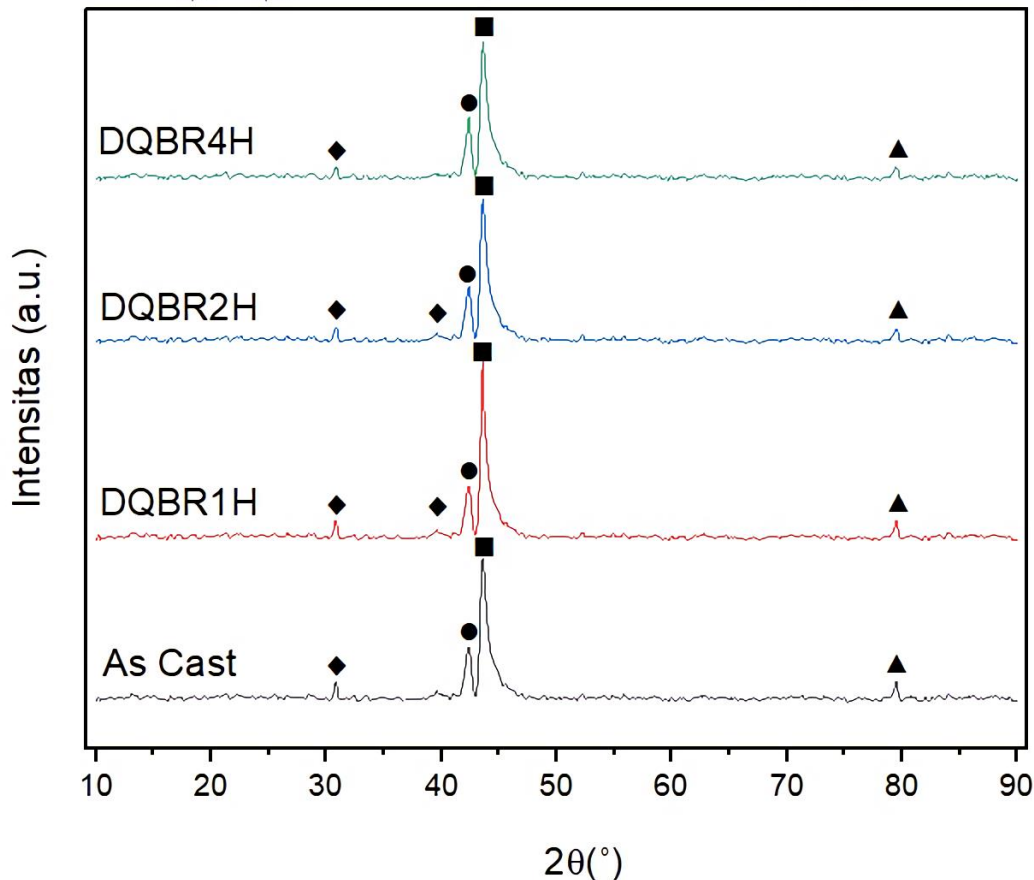
Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi kimia

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

4.2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction Cu-16,8Zn-6,99Al

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) mempunyai tujuan yaitu untuk mengetahui fasa, senyawa dan struktur kristal yang berada pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS. Spesimen yang diuji adalah spesimen *As Cast* atau spesimen tanpa perlakuan panas. Selanjutnya spesimen dengan variasi *holding time* untuk proses *anneal* dengan variasi 1 jam, 2 jam, dan 4 jam. Lalu dengan variasi media pendingin oli dan *brine*. Hasil pengujian spesimen dengan alat uji XRD dianalisis dengan menggunakan *Software High Score Plus Marven* dengan tujuan untuk mengetahui *peak* pada grafik dan hasil dibandingkan dengan standar yang terdapat pada *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

● α -Brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) ■ β -Brass (CuZn) ▲ γ -Brass (Cu_5Zn_8) ◆ γ -Brass (Al_4Cu_9)



Gambar 4.1 Hasil pengujian XRD proses *solution treatment* dengan media pendingin *brine* dan variasi waktu tahan *annealing*

Tabel 4.2 Posisi 2θ fasa yang teridentifikasi Cu-16,8Zn-6,99Al dengan media pendingin *brine* dan variasi waktu tahan *annealing*

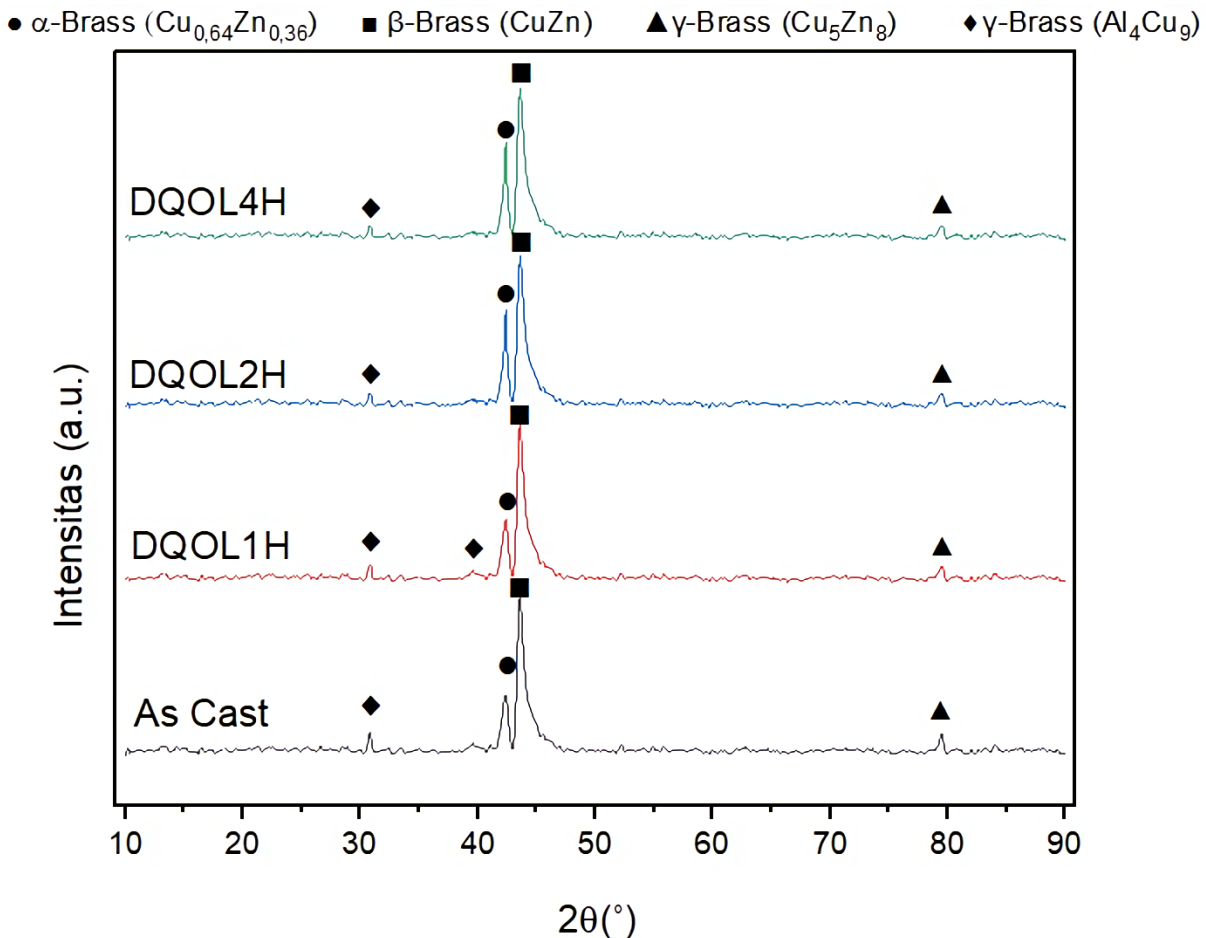
| Spesimen | α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) | β -brass (CuZn) | γ_1 -brass (Cu_5Zn_8) | γ_2 -brass (Al_4Cu_9) |
|----------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <i>As Cast</i> | 42,2935° | 43,557° | 79,8693° | 31,3101° |
| DQBr1H | 42,1574° | 43,3395° | 80,0997° | 31,2564°, 36,2046° |
| DQBr2H | 42,3326° | 43,2423° | 80,2019° | 31,2471°, 36,3315° |
| DQBr4H | 42,4892° | 43,4981° | 80,0366° | 31,3514° |

Dari Gambar 4.1 dan tabel 4.2, untuk spesimen *As Cast* terdapat peak yang menunjukkan fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak pada 2θ 42,2935° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-050-1333. Selanjutnya terdapat peak yang menunjukkan fasa β -brass (CuZn) yang terletak pada 2θ 43,557° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-002-1231. Selanjutnya terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak pada 2θ 79,8693° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-025-1228. Lalu terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_9Al_4) yang terletak pada 2θ 31,3101° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 03-065-7542.

Untuk spesimen *direct quench* dengan media pendingin *brine* dan waktu tahan *annealing* 1 jam terdapat peak yang menunjukkan fasa α -brass($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak pada 2θ $42,1574^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-050-1333. Selanjutnya terdapat peak yang menunjukkan fasa β -brass (CuZn) yang terletak pada 2θ $43,3395^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-002-1231. Lalu terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak pada 2θ $80,0997^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-025-1228. Serta terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_9Al_4) yang terletak pada 2θ $31,2564^\circ$ dan $36,2046^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 03-065-7542.

Untuk spesimen *direct quench* dengan media pendingin *brine* dan waktu tahan *annealing* 2 jam terdapat peak yang menunjukkan fasa α -brass($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak pada 2θ $42,3326^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-050-1333. Selanjutnya terdapat peak yang menunjukkan fasa β -brass (CuZn) yang terletak pada 2θ $43,2423^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-002-1231. Lalu terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak pada 2θ $80,2019^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-025-1228. Serta terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_9Al_4) yang terletak pada 2θ $31,2471^\circ$ dan $36,3315^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 03-065-7542.

Untuk spesimen *direct quench* dengan media pendingin *brine* dan waktu tahan *annealing* 4 jam terdapat peak yang menunjukkan fasa α -brass($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak pada 2θ $42,4892^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-050-1333. Selanjutnya terdapat peak yang menunjukkan fasa β -brass (CuZn) yang terletak pada 2θ $43,4981^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-002-1231. Lalu terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak pada 2θ $80,0366^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-025-1228. Serta terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_9Al_4) yang terletak pada 2θ $31,3514^\circ$ dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 03-065-7542.



Gambar 4.2 Hasil pengujian XRD proses *solution treatment* dengan media pendingin oli dan variasi waktu tahan *annealing*

Tabel 4.3 Posisi 2 θ fasa yang teridentifikasi Cu-16,8Zn-6,99Al dengan media pendingin oli dan variasi waktu tahan *annealing*

| Spesimen | α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) | β -brass (CuZn) | γ_1 -brass (Cu_5Zn_8) | γ_2 -brass (Al_4Cu_9) |
|----------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <i>As Cast</i> | 42,2935° | 43,557° | 79,8693° | 31,3101° |
| DQO11H | 42,4741° | 43,4379° | 79,7494° | 31,2869°, 36,3349° |
| DQO12H | 42,4525° | 43,4479° | 80,0989° | 31,4010° |
| DQO14H | 42,4361° | 43,5862° | 79,5871° | 31,2966° |

Berdasarkan gambar 4.2 dan tabel 4.3, untuk spesimen *direct quench* dengan media pendingin brine dan waktu tahan *annealing* 1 jam terdapat peak yang menunjukkan fasa α -brass($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak pada 2θ 42,4741° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-050-1333. Selanjutnya terdapat peak yang menunjukkan fasa β -brass (CuZn) yang terletak pada 2θ 43,4379° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-002-1231. Lalu terdapat peak yang menunjukkan fasa γ_1 -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak pada 2θ 79,7494° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-025-1228. Serta terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_9Al_4) yang terletak pada 2θ 31,2869° dan 36,3349° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 03-065-7542.

Untuk spesimen *direct quench* dengan media pendingin oli dan waktu tahan *annealing* 2 jam terdapat peak yang menunjukkan fasa α -brass($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak pada 2θ 42,4741° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-050-1333. Selanjutnya terdapat peak yang menunjukkan fasa β -brass (CuZn) yang terletak pada 2θ 43,4479° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-002-1231. Lalu terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak pada 2θ 80,0989° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-025-1228. Serta terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_9Al_4) yang terletak pada 2θ 31,4010° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 03-065-7542.

Untuk spesimen *direct quench* dengan media pendingin oli dan waktu tahan *annealing* 4 jam terdapat peak yang menunjukkan fasa α -brass($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak pada 2θ 42,4361° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-050-1333. Selanjutnya terdapat peak yang menunjukkan fasa β -brass (CuZn) yang terletak pada 2θ 43,5862° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-002-1231. Lalu terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak pada 2θ 79,5871° dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 00-025-1228. Serta terdapat peak yang menunjukkan fasa γ -brass (Cu_9Al_4) yang terletak pada 2θ 31,2966° dan dengan struktur kristal kubik yang sesuai pada ICDD 03-065-7542.

Berdasarkan gambar 4.1 dan gambar 4.2 untuk pengujian XRD pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al terdapat 3 fasa yang terbentuk yaitu fasa α -brass($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$), fasa β -brass (CuZn), fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) dan fasa γ -brass (Cu_9Al_4). Dimana hal ini sesuai dengan ASM Handbook Vol 3 pada diagram fasa ternary Cu-Zn-Al. Pada spesimen As Cast atau spesimen tanpa perlakuan panas di temperatur kamar hanya memiliki fasa α dan γ . Untuk fasa γ (Cu_5Zn_8) dapat terbentuk akibat dekomposisi fasa β dalam diagram biner Cu-Zn pada temperatur 427°C dengan laju pendinginan yang lambat. Sedangkan fasa γ (Cu_9Al_4) terbentuk akibat dekomposisi fasa β dalam diagram biner Cu-Al pada temperatur 565°C dengan laju pendinginan yang lambat. Sedangkan fasa β yang terbentuk pada temperatur kamar merupakan akibat dari pendinginan tidak ekuilibrium pada proses pengecoran (K. & Wayman, 1998).

Pada perlakuan panas *Solution Treatment* memiliki tujuan untuk memperoleh fasa tunggal β dimana benda kerja dipanaskan hingga temperatur austenisasinya dan ditahan untuk selang waktu tertentu, dan diberikan pendinginan cepat hingga temperatur kamar (A. International, 1991). Dimana pada proses pendinginan fasa β dapat terdifusi menjadi fasa α dan γ jika laju tidak pada laju pendinginan yang cepat. Namun seperti yang terdapat pada gambar 4.1 dan 4.2 proses *solution treatment* dengan menggunakan metode *direct quench* untuk media pendingin *brine* dan oli memiliki memiliki fasa α , β , dan γ yang sama dengan spesimen *As Cast*. Hal ini membuat metode pendinginan *direct quench* dengan media pendingin *brine* dan oli untuk spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al masih belum cukup cepat, dan hal ini menyebabkan fasa α dan γ yang terbentuk akibat difusi dari fasa β .

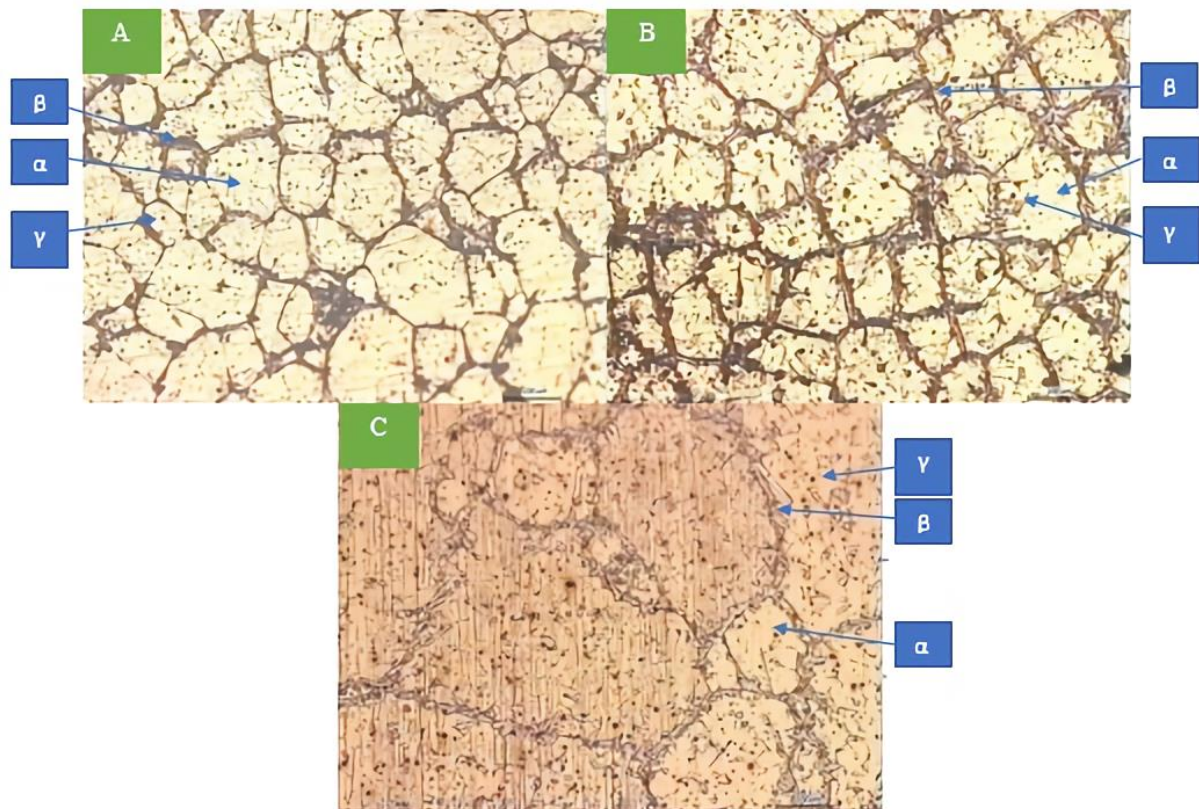
4.3 Hasil Pengujian Metalografi Cu-16,8Zn-6,99Al

Pengujian metalografi untuk menganalisis struktur mikro pada spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al yang terdiri dari *As Cast*, dengan variasi holding time untuk proses *anneal* 1 jam, 2 jam, dan 4 jam dan variasi media pendingin oli dan *brine* untuk proses *solution treatment*. Pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS. Dengan menggunakan alat bantu yaitu *Metallurgical Microscope OLYMPUS BX51M-RF*. Spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al diberikan perlakuan preparasi dan dietsa dengan menggunakan metode *immerse* selama 10 detik.



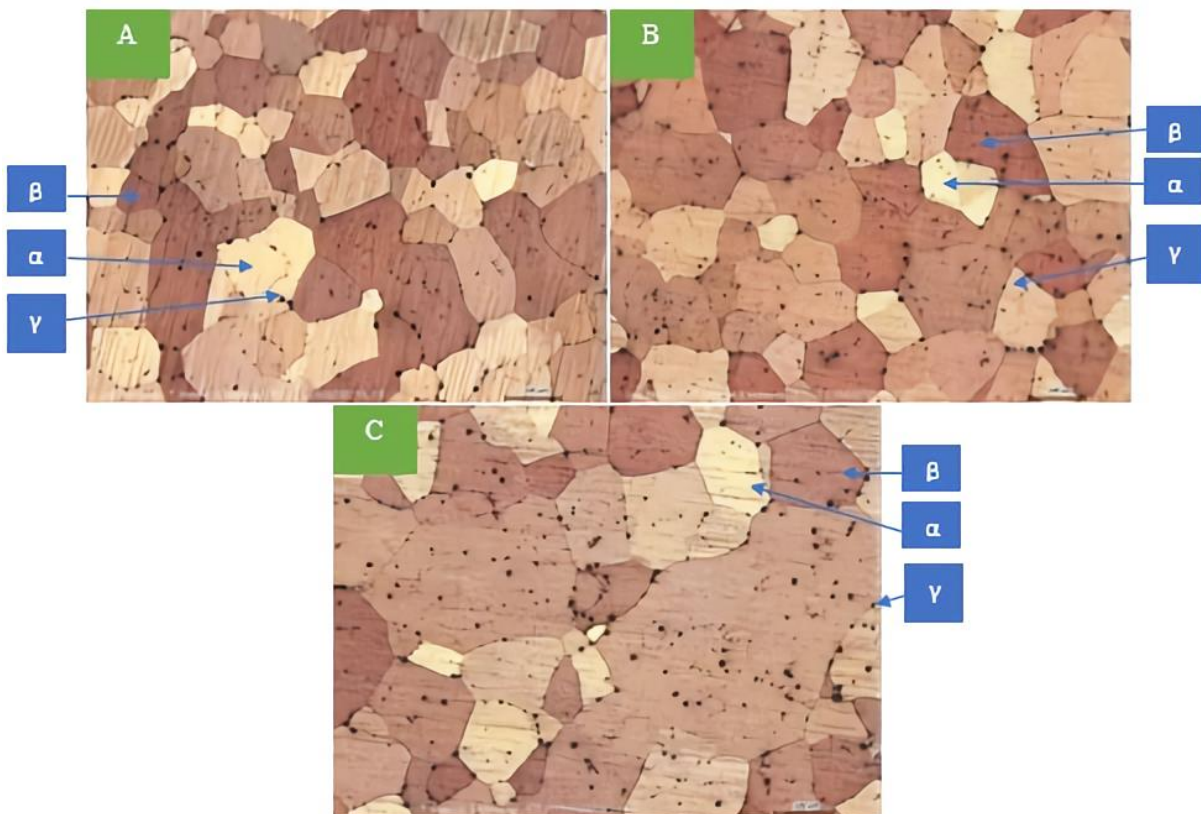
Gambar 4.3 Hasil metalografi spesimen *as cast* Cu-16,8Zn-6,99Al dengan perbesaran 100x dan menggunakan larutan etsa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Pada gambar 4.3 diatas menunjukkan hasil pengujian metalografi untuk spesimen *as cast* Cu-16,8Zn-6,99Al dengan perbesaran 100x. Dari hasil pengujian metalografi tersebut terbentuk tiga fasa yaitu fasa α , β , dan γ . Dimana fasa α memiliki warna terang, fasa β memiliki warna yang gelap, dan fasa γ berbentuk butiran yang tersebar di permukaan struktur (Jatimurti et al., 2020). Hal ini menunjukkan hasil uji XRD sesuai dengan hasil uji metalografi yaitu dengan fasa yang terbentuk adalah α , β , dan γ dan fasa β yang terlihat lebih banyak terlihat. Hal ini sesuai dengan peak pada fasa β yang lebih tinggi dari fasa α dan γ pada hasil uji XRD.



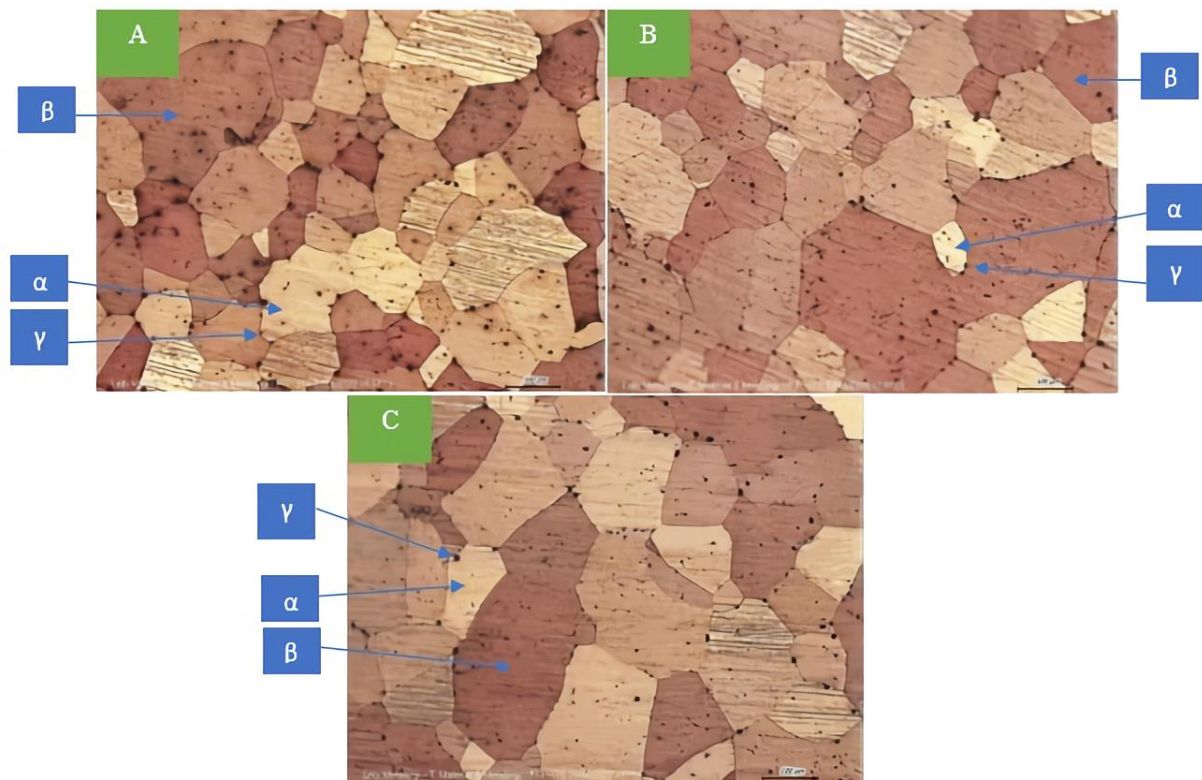
Gambar 4.4 Hasil metalografi spesimen dengan waktu tahan anil (a) 1 jam (b) 2 jam (c) 4 jam Cu-16,8Zn-6,99Al dengan perbesaran 100x dan menggunakan larutan etsa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Pada gambar 4.4 menunjukkan hasil uji metalografi pada spesimen anil pada waktu tahan 1 jam, 2 jam, dan 4 jam memiliki fasa yang sama dengan spesimen *as cast* yaitu fasa α , β , dan γ . Proses anil memiliki tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa akibat proses fabrikasi atau *machining* pada benda kerja dengan memanaskan benda kerja dengan waktu tahan dan kemudian diberikan proses pendinginan yang sangat lambat (A. International, 1991). Sehingga fasa yang dihasilkan sama dengan spesimen *as cast* yaitu fasa α , β , dan γ . Namun terdapat perbedaan ukuran butir hal ini disebabkan pengaruh waktu tahan pada proses anil. Dengan semakin lama waktu tahan yang diberikan maka semakin besar ukuran butir yang dapat dihasilkan (A. International, 1991).



Gambar 4.5 Hasil metalografi spesimen *solution treatment* dengan media pendingin *brine* untuk waktu tahan anil (a) 1 jam, (b) 2 jam, (c) 4 jam dengan perbesaran 100x dan menggunakan larutan etsa $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

Pada gambar 4.5 menunjukkan hasil uji metalografi pada spesimen *solution treatment* dengan menggunakan media pendingin *brine* dengan waktu tahan anil 1 jam, 2 jam, dan 4 jam dengan menggunakan metode *direct quench*. Fasa yang terbentuk adalah fasa α , β , dan γ dimana hasil tersebut sesuai dengan hasil uji XRD. β' tidak terbentuk pada hasil metalografi Fasa β terlihat lebih mendominasi, hal ini sesuai dengan hasil uji XRD dengan *peak* yang dimiliki oleh fasa β lebih tinggi dibandingkan dengan fasa α dan γ .



Gambar 4.6 Hasil metalografi spesimen *solution treatment* dengan media pendingin oli untuk waktu tahan anil (a) 1 jam, (b) 2 jam, (c) 4 jam dengan perbesaran 100x dan menggunakan larutan etsa $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

Pada gambar 4.6 menunjukkan hasil uji metalografi pada spesimen *solution treatment* dengan menggunakan media pendingin oli dengan waktu tahan anil 1 jam, 2 jam, dan 4 jam dengan menggunakan metode *direct quench*. Fasa yang terbentuk adalah fasa α , β , dan γ dimana hasil tersebut sesuai dengan hasil uji XRD. Dan untuk β' juga tidak terbentuk pada hasil metalografi. Dan juga untuk fasa β terlihat lebih mendominasi, hal ini sesuai dengan hasil uji XRD dengan *peak* yang dimiliki oleh fasa β lebih tinggi dibandingkan dengan fasa α dan γ .

Pada proses *solution treatment* bertujuan untuk menghasilkan fasa tunggal β . Dengan menggunakan metode *direct quench* pada media pendingin *brine* dan oli di temperatur $850^\circ C$. Namun setelah dilakukan pengujian metalografi, tidak ditemukannya β' (martensit) dalam struktur mikro. Hal ini juga ditandai dengan hasil pengujian XRD seperti yang terdapat pada gambar 4.1 dan 4.2 dimana tidak ada penurunan intensitas pada fasa α dan γ . Hal ini berbeda dengan yang dilakukan oleh Masrul (2021) dimana dengan komposisi yang digunakan adalah Cu-11,9Zn-6,72Al dengan menggunakan metode *direct quench* pada media pendingin *brine* dan *iced water*, fasa yang didapatkan pada hasil uji metalografi adalah fasa α , β , γ , dan β' (Masrul et al., 2021). Selain itu pada penelitian yang dilakukan oleh Sampath (2007) dengan paduan Cu-30,36Zn-2,19Al dengan metode *direct quench* untuk media pendingin air dan *brine*. Didapatkan dari hasil pengujian metalografi fasa α , β , dan β' di struktur mikro (Sampath, 2007). Dengan tidak terbentuknya β' pada struktur mikro pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al hal ini dapat dipengaruhi adanya perbedaan komposisi yang digunakan. Sehingga hal ini berpengaruh pada temperatur transformasi untuk paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. Dimana temperatur transformasi martensit dapat terjadi di bawah temperatur ruang.

Perlakuan *annealing* dan *solution treatment* dapat mempengaruhi ukuran butir pada struktur mikro untuk paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. dimana untuk mengetahui ukuran butir pada

hasil pengujian metalografi dapat menggunakan *software ImageJ*. Dengan perlakuan waktu tahan anil yang dengan variasi 1 jam, 2 jam, dan 4 jam pada temperature 550°C dan perlakuan *solution treatment* pada temperatur 850°C dengan variasi media pendingin *brine* dan oli memiliki ukuran butir yang berbeda-beda, Pada proses pendinginan cepat (*quenching*) terdapat 3 tahapan yaitu *vapor blanket stage*, *boiling stage*, dan *convection stage*. Media *brine* tanpa agitasi mempunyai nilai *H (Grossmann Number)* yaitu 2 sedangkan pada media oli tanpa agitasi dengan nilai 0,25. Media pendingin *brine* mampu mempersingkat waktu pendinginan pada tahap *vapor blanket stage* sehingga dapat masuk ke tahap *boiling stage* dengan cepat. Dimana pada tahap *boiling stage*, terdapat *cooling rate* yang tinggi (Totten & Clinton, 1993). Sehingga dengan semakin tinggi nilai *cooling rate* maka semakin halus butir yang dapat terbentuk di struktur mikro (S.H. Avner, 1974).

Software ImageJ dapat membantu untuk menentukan ukuran butir dengan menghitung diameter butir dalam satuan μm (mikro meter). Untuk spesimen DQBR1H mempunyai nilai ukuran diameter butir terkecil dengan nilai 82,6 μm , sedangkan untuk spesimen A4H mempunyai ukuran diameter butir terbesar yaitu dengan nilai 181,4 μm . hal ini menunjukkan bahwa perlakuan dengan waktu tahan anil berpengaruh pada ukuran butir yaitu dengan semakin tinggi temperatur dan meningkatnya waktu tahan maka semakin besar ukuran butir yang dapat terbentuk pada struktur mikro (Adnyana, 1986). Hal ini disebabkan pada kerapatan *lattice* yang berkurang seiring dengan adanya kenaikan temperatur dan menyebabkan waktu pertumbuhan menjadi cepat dan terdapat waktu untuk pertumbuhan butir (S.H. Avner, 1974). Untuk nilai ukuran butir dapat terlihat seperti yang terdapat pada tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 Ukuran butir spesimen pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al

| Nama Spesimen | Rata-Rata Diameter Butir (μm) |
|---------------|--------------------------------------------|
| As Cast | 94,64 |
| A1H | 112,93 |
| A2H | 120,26 |
| A4H | 181,4 |
| DQBR1H | 111,37 |
| DQBR2H | 121 |
| DQBR4H | 150,5 |
| DQOL1H | 122,91 |
| DQOL2H | 136,9 |
| DQOL4H | 159,7 |

4.4 Hasil Pengujian Kekerasan Cu-16,8Zn-6,99Al

Pengujian kekerasan untuk spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al dengan menggunakan metode pengujian kekerasan *Vickers* untuk mendapatkan hasil uji kekerasan yang lebih akurat untuk paduan tembaga. Dengan menggunakan alat uji *Universal Hardness Testing HBRV 187,5 A* yang berada di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS. Pengujian dengan metode *Vickers* menggunakan standar ASTM E92-17 yaitu spesimen uji diberikan pembenanan 30 kgf dan indentasi selama 10 detik dengan menggunakan indentor piramida. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali dengan 3 titik yang berbeda. Spesimen yang diuji adalah *As Cast* yaitu spesimen tanpa diberikan perlakuan panas. Selanjutnya spesimen A1H, A2H, dan A4H untuk spesimen dengan *holding time* untuk proses *anneal* sebesar 1 jam, 2 jam, dan 4 jam. Selanjutnya adalah DQBR1H, DQBR2H, DQBR4H untuk spesimen dengan media pendingin *brine* untuk proses *Solution treatment*. Yang terakhir DQOL1H, DQOL2H,

DQOL4H untuk spesimen dengan media pendingin oli untuk proses *Solution treatment*. Hasil Pengujian kekerasan dapat terlihat pada tabel 4.5 dan gambar 4.7

Tabel 4.5 Hasil pengujian kekerasan Cu-16,8Zn-6,99Al

| Spesimen | Nilai Kekerasan (VHN) |
|----------|-----------------------|
| As Cast | 288,33 ± 2,08 |
| A1H | 259 ± 2,65 |
| A2H | 250,33 ± 2,08 |
| A4H | 240 ± 4,58 |
| DQBR1H | 284 ± 1,73 |
| DQOL1H | 279,33 ± 1,15 |
| DQBR2H | 272,67 ± 2,52 |
| DQOL2H | 269 ± 2 |
| DQBR4H | 264,33 ± 1,53 |
| DQOL4H | 254,67 ± 1,53 |



Gambar 4.7 Grafik hasil pengujian kekerasan Cu-16,8Zn-6,99Al

Pada hasil pengujian kekerasan, *As Cast* mempunyai rata-rata nilai kekerasan yaitu $288,33 \pm 2,08$ VHN. Selanjutnya untuk kekerasan pada spesimen yang hanya mendapatkan proses *homogenizing* dan *annealing* dengan variasi *holding time* untuk yang 1 jam (A1H) yaitu memiliki rata-rata nilai kekerasan $259 \pm 2,65$ VHN dengan *holding time* 2 jam (A2H) yaitu $250,33 \pm 2,08$ VHN dan dengan *holding time* 4 jam (A4H) dengan nilai kekerasan $240 \pm 4,58$ VHN. Dan untuk spesimen yang dilanjutkan dengan diberikan perlakuan *solution treatment* pada media pendingin *brine* dengan variasi *holding time* untuk proses *annealing* yaitu terdapat DQBR1H dengan rata-rata nilai kekerasan $284 \pm 1,73$ VHN, untuk DQBR2H dengan rata-rata nilai kekerasan $272,67 \pm 2,52$ VHN dan untuk DQBR4H dengan rata-rata nilai kekerasan $264,33 \pm 1,53$ VHN. Selanjutnya untuk variasi media pendingin oli dengan variasi *holding time* *annealing* yaitu terdapat DQOL1H dengan rata-rata nilai kekerasan $279 \pm 1,15$ VHN,

selanjutnya DQOL2H dengan rata-rata nilai kekerasan 269 ± 2 VHN, terakhir DQOL4H dengan rata-rata nilai kekerasan $254,67 \pm 1,53$ VHN.

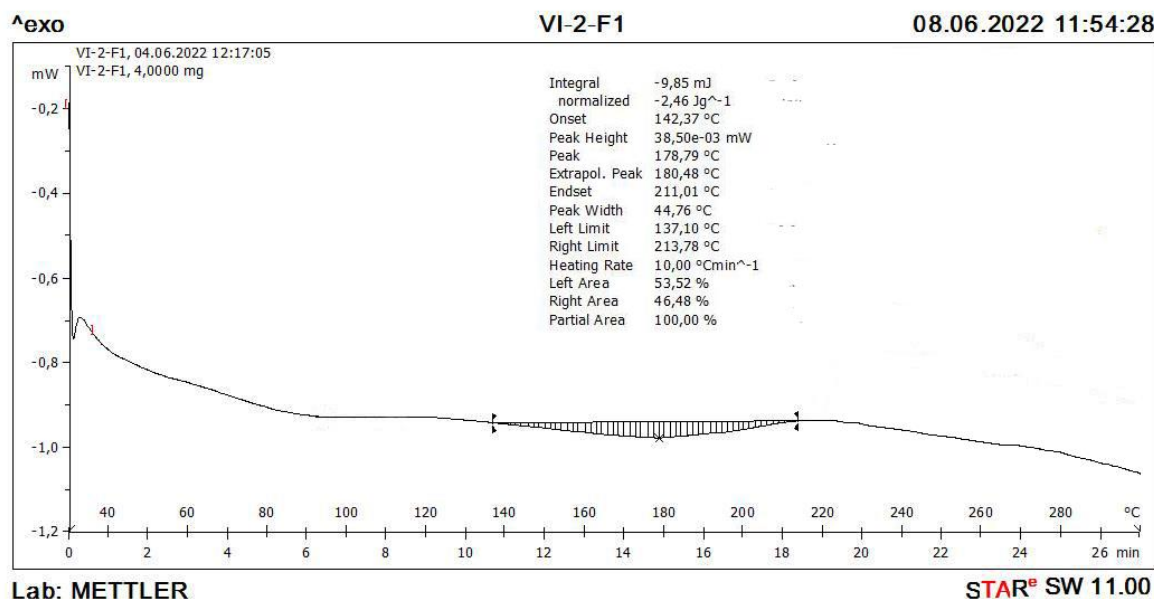
As Cast memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi dibandingkan dengan spesimen-spesimen yang lain. Hal ini disebabkan pada spesimen *as cast* tidak diberikan perlakuan seperti *homogenizing* untuk menyeragamkan fasa dan ukuran butir, *annealing* untuk menghilangkan *residual stress* akibat adanya proses *machining* (A. International, 1991). Selain itu jika dilihat seperti yang terdapat pada gambar 4.3 untuk hasil metalografi terdapat fasa β yang terlihat lebih mendominasi dibandingkan dengan fasa lainnya. Hal ini dikarenakan struktur kristal yang dimiliki oleh fasa β memiliki sifat keras (Ramadhani et al., 2020).

Pada spesimen anil dengan variasi waktu tahan mempunyai nilai kekerasan yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan spesimen *as cast* dan *solution treatment*. Hal ini akibat dari adanya perlakuan panas *homogenizing* dan *annealing* yang membantu untuk menyeragamkan ukuran butir dan fasa yang terbentuk serta mengurangi *residual stress* akibat adanya proses *machining*. Dan juga hal ini juga terlihat seperti pada gambar 4.4 dimana fasa α lebih mendominasi pada struktur mikro. Fasa α mempunyai struktur kristal FCC yang memiliki sifat lunak sehingga membuat nilai kekerasan pada spesimen anil memiliki kekerasan yang relatif lebih rendah (Ramadhani et al., 2020)

Pada spesimen *solution treatment* kekerasan paling tinggi dimiliki oleh DQBR1H hal ini seperti terlihat pada gambar 4.5 dimana fasa yang mendominasi pada spesimen DQBR1H adalah fasa β yang mempunyai sifat yang keras. Fasa β yang lebih banyak dihasilkan merupakan akibat dari adanya proses *solution treatment* yaitu untuk mendapatkan fasa β . Selain itu pada ukuran butir yang dihasilkan untuk spesimen DQBR1H lebih kecil atau halus dibandingkan dengan spesimen yang lain. Dengan semakin halus ukuran butir yang dihasilkan maka semakin besar nilai kekerasan yang dihasilkan (Matyunin et al., 2019). Selanjutnya pada variasi media pendingin dimana dimana media pendingin *brine* dan oli untuk spesimen *brine* mempunyai nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan spesimen oli dimana hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Sampath, untuk spesimen *brine* mampu mencapai kekerasan yang lebih tinggi dibanding spesimen oli dengan nilai 169 HV dan untuk spesimen oli dengan nilai 138 HV (Sampath, 2007).

4.5 Hasil Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* Cu-16,8Zn-6,99Al

Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) untuk mengetahui temperatur transformasi untuk paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. Dengan menggunakan alat *Differential Scanning Calorimetry* yang terdapat di Laboratorium *Center for Drug Evaluation and Analysis* Universitas Surabaya (UBAYA). Pengujian DSC dilakukan dengan memanaskan benda kerja pada temperatur pada jangkauan 30-300°C dengan heating rate yang diberikan sebesar 10°C/menit. Berikut adalah hasil untuk pengujian DSC seperti yang terlampir pada gambar 4.8 sebagai berikut.



Gambar 4.8 Grafik hasil pengujian DSC pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al.

Pada hasil uji DSC untuk paduan Cu-16,8Zn-6,99Al seperti yang terlihat pada gambar 4.8 menunjukkan adanya sebuah *peak* akibat terjadinya pemanasan kenaikan laju panas/ *heat flow* yang dapat disebut sebagai *endothermic peak*. Hal tersebut dapat terlihat pada grafik dimana terdapat kenaikan *heat flow* sebesar 38,50e-03 mW. Dan pada gambar 4.8 terlihat arsiran yang menggambarkan adanya sebuah jarak temperatur, dengan batas yang di sebelah kiri adalah $T=137,1^{\circ}\text{C}$, dan puncak arsiran berada pada titik $T=178,79^{\circ}\text{C}$, dan batas yang di sebelah kanan adalah $T=213,78^{\circ}\text{C}$. Area arsiran pada grafik merupakan *range* untuk reaksi secara endotermik dan dapat disebut *austenitic transformation temperature* atau temperatur transformasi austenit (Stošić et al., 2017). Temperatur transformasi ini terdiri dari *Austenite Start* (A_s) di temperatur $137,1^{\circ}\text{C}$ dan *austenite finish* (A_f) pada temperatur $213,78^{\circ}\text{C}$.

Dari gambar 4.8 tidak menunjukkan adanya *exothermic peak* sehingga tidak terjadi reaksi eksotermik pada *range* temperatur 30-300°C. hal ini menunjukkan untuk transformasi dari martensit berada dibawah temperatur 30°C. Hal ini sesuai dengan hasil pada pengujian metalografi dengan tidak terbentuknya *twinned martensite* di struktur mikro. Tidak ditemukannya *exothermic peak* pada hasil pengujian DSC dapat menggunakan persamaan 4.1 dari *ASM Handbook Volume 2* untuk mencari temperatur transformasi martensit (M_s) untuk paduan Cu-Zn-Al. persamaan 4.1 sebagai berikut (A. International, 1998).

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

Selain itu, terdapat persamaan dari buku *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* untuk mencari nilai temperatur transformasi martensit (M_s) dari paduan Cu-Zn-Al. untuk persamaan 4.2 dapat terlihat sebagai berikut (Duerig & Melton, 1990).

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

Dari persamaan 4.1 dan 4.2 terlihat bahwa temperatur transformasi terbentuk pada rentang ($-155,826^{\circ}\text{C}$). hal ini sesuai dengan yang terdapat pada buku *ASM Handbook Vol 2*, dimana untuk temperatur transformasi martensit terletak pada -180°C hingga 200°C (A. International, 1998). Dengan metode pendinginan *direct quench* dan dengan media pendingin *brine* dan oli tidak cukup untuk mencapai temperatur transformasi martensit pada temperatur -180°C hingga

200°C sehingga tidak terbentuk martensit pada struktur mikro. Didapat kan temperatur transformasi untuk paduan Cu-16,8Zn-6,99Al pada tabel 4.6 sebagai berikut.

Tabel 4.6 Temperatur transformasi paduan Cu-16,8Zn-6,99Al

| Spesimen | $M_s(^{\circ}C)$ | $A_s(^{\circ}C)$ | $A_f(^{\circ}C)$ |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Cu-16,8Zn-6,99Al | $\sim(-155,826)$ | 137,1 | 213,78 |

4.6 Hasil Pengujian *Shape Memory Effect* Cu-16,8Zn-6,99Al

Pengujian *Shape Memory Effect* (SME) memiliki tujuan untuk mengetahui nilai *recovery* untuk spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al. Bentuk spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al berbentuk batang dengan panjang 10 cm dan diameter 2 mm dan mengacu pada standar ASTM F2082-01. Berikut adalah bentuk spesimen untuk pengujian SME seperti yang terlihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Spesimen uji *shape memory effect*

Pengujian *shape memory effect* memiliki tujuan untuk menganalisis *recovery* yang dimiliki oleh paduan Cu-Zn-Al *shape memory alloy*. Pengujian *shape memory effect* dimulai dengan menekuk benda kerja hingga kemiringan derajat tertentu (θ_0), Dilakukan penekukan hanya dengan sudut hingga 5°. Hal ini diakibatkan jika ditekuk lebih dari 5° akan membuat benda kerja patah. Hal ini disebabkan akibat benda kerja yang mempunyai nilai kekerasan (VHN) yang lebih tinggi dibanding nilai kekerasan penelitian sebelumnya Rizkivany (2020), Monica (2020) (Jatimurti et al., 2020; Ramadhani et al., 2020). Selanjutnya dipanaskan hingga temperatur transformasi austenit seperti yang terdapat pada tabel 4.6 untuk memulihkan bentuk benda kerja kembali. Sehingga didapatkan hasil akhir sudut pulihnya(θ_1). Dengan menggunakan persamaan 4.3 untuk mengetahui nilai *shape memory recovery* sebagai berikut (Chanmuang et al., 2018).

$$\%SME = \frac{\theta_0 - \theta_1}{\theta_0} \times 100\% \dots \dots \dots (4.3)$$

Setelah itu didapatkan hasil untuk pengujian SME untuk setiap spesimen yang dapat dilihat pada tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4.7 Hasil pengujian *shape memory effect* Cu-16,8Zn-6,99Al

| Spesimen | <i>Shape Memory Effect Recovery</i> (%) |
|----------|-----------------------------------------|
| DQBR1H | 0 |
| DQBR2H | 0 |
| DQBR4H | 0 |
| DQOL1H | 0 |
| DQOL2H | 0 |
| DQOL4H | 0 |

Berdasarkan tabel 4.7, secara keseluruhan spesimen tidak mempunyai nilai *shape memory recovery* setelah dipanaskan kembali hingga temperatur *austenite finish* (A_f). Hal ini menunjukkan spesimen tidak mempunyai *shape memory effect*. Seperti yang terdapat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 untuk spesimen dengan media pendingin *solution treatment brine* dan oli secara berurutan pada hasil metalografi tidak menunjukkan ada *twinned martensite* pada struktur mikro. Dimana transformasi SMA yang bersifat satu arah dengan mempunyai *twinned martensite* yang jika diberikan pembebanan deformasi plastis akan merubah orientasi menjadi *detwinned martensite*. Selanjutnya dipanaskan hingga temperatur *austenite finish* (A_f) dan didinginkan hingga temperatur *martensite finish* (M_f) untuk kembali menjadi *twinned martensite* (Zanaboni, 2008).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variasi perlakuan *holding time* pada proses *annealing* untuk paduan Cu-16,8Zn-6,99Al berpengaruh pada ukuran butir yang terbentuk pada struktur mikro. Ukuran butir terbesar berada pada spesimen A4H dengan rata-rata diameter butir 181,4 μm . dan untuk ukuran diameter terkecil berada pada spesimen *as anneal* A1H dengan rata-rata ukuran diameter butir 112,9 μm . nilai kekerasan tertinggi berada pada spesimen *as anneal* A1H yaitu $259 \pm 2,65$ VHN dan nilai kekerasan terkecil adalah spesimen *as anneal* A4H dengan nilai $240 \pm 4,58$ VHN. Dengan semakin lama *holding time* untuk proses *annealing* semakin rendah nilai kekerasan yang didapatkan.
2. Variasi media pendingin pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al berpengaruh pada ukuran butir yang terbentuk pada struktur mikro berpengaruh pada ukuran butir yang terbentuk pada struktur mikro. Dengan fasa yang terbentuk adalah fasa α , β , dan γ dan tidak terbentuknya β' . Ukuran butir yang dihasilkan terbesar adalah spesimen *as solution treatment* DQOL4H dengan rata-rata diameter 159,7 μm . sedangkan ukuran butir terkecil yaitu spesimen *as solution treatment* DQBR1H dengan rata-rata diameter 111,4 μm . Dan untuk nilai kekerasan, nilai kekerasan terbesar adalah spesimen *as solution treatment* DQBR1H dengan nilai $284 \pm 1,73$ VHN. Dan nilai kekerasan terkecil adalah pada spesimen DQOL4H dengan nilai $254,67 \pm 1,53$. Dengan semakin tinggi laju *cooling rate* yang diberikan maka nilai kekerasan yang dihasilkan semakin tinggi.
3. Pada perlakuan *holding time annealing* dan perlakuan *solution treatment* dengan variasi media pendingin yang diberikan semakin sedikit waktu tahan anil dan semakin tinggi laju pendinginan pada *solution treatment* semakin halus ukuran butir yang terbentuk sehingga menghasilkan nilai kekerasan yang relatif lebih tinggi dan sebaliknya untuk waktu tahan anil yang lama dan media pendingin *solution treatment* dengan laju pendinginan yang lambat semakin besar ukuran butir yang terbentuk sehingga menghasilkan nilai kekerasan yang relatif lebih rendah.

5.2 Saran

Adapun saran yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan komposisi unsur untuk paduan Cu-Zn-Al lebih teliti agar mendapatkan temperatur transformasi yang diinginkan.
2. Melakukan preparasi pengujian metalografi dengan teliti untuk mengurangi *scratch* yang terbentuk pada struktur mikro.
3. Melakukan preparasi pengujian XRD lebih teliti agar mendapatkan hasil yang didapat lebih akurat.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Adnyana, D. N. (1986). *I-S2.0-0026080086900340-Main.Pdf*. 196(1985), 187–196.
- Aldirmaz, E., Celik, H., & Aksoy, I. (2013). SEM and X-ray diffraction studies on microstructures in Cu-26.04%Zn-4.01%Al alloy. *Acta Physica Polonica A*, 124(1), 87–89. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.124.87>
- Asanovic, V., Radonjic, D., Šcepanovic, J., & Vuksanovic, D. (2021). Effect of chemical composition and quenching media on recoverable strain in Cu-Zn-Al alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1368–1379. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.098>
- Auricchio, F., & Lubliner, J. (1997). A uniaxial model for shape-memory alloys. *International Journal of Solids and Structures*, 34(27), 3601–3618. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(96\)00232-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(96)00232-6)
- Chanmuang, C., Niyomsoan, S., & Chomsaeng, N. (2018). Effect of indium in Cu-Zn-Al shape memory alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 1082(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1082/1/012060>
- Clithy, E. (2020). *Application of Shape Memory Alloy*. 167–174. <https://doi.org/10.2991/icadme-15.2015.18>
- 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>
- Feidenhans'l, R. (1989). SURFACE STRUCTURE DETERMINATION BY X-RAY DIFFRACTION. *Surface Science Reports*, 10(2), 105–188.
- Groover, M. (2010). Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems. *John Wiley & Sons*, 493.
- International, A. (1991). *ASM Handbook Volume 4 Heat Treating*. 289–322. <https://doi.org/10.1201/9781315120577>
- 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>
- International, A. S. M. (1989). *ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagram* (Vol. 10, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/BF02881433>
- Jatimurti, W., Gayatri, M., & Ramadhani, M. (2020). The Effect of Solution Treatment Temperature and Quenching Media Variation in Heat Treatment Process Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys on Shape Memory Effect and Microstructures. *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology*, 4(1), 61–71. <https://doi.org/10.17977/um016v4i12020p061>
- Jiang, X., Wang, Y., Pan, F., Jing, Z., Huang, J., & Li, B. (2018). Numerical investigation of preload process of bolted joint with superelastic shape memory alloy. *Metals*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/met8090730>
- K., O., & Wayman, C. M. (1998). General applications of SMA's and Smart Materials. *Shape Memory Materials*, 220–241.
- Khulief, Z. T. (2020). Application of Shape Memory Alloy. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 28(2), 167–174. <https://doi.org/10.15354/si.20.re072>
- Liu, J. li, Chen, Z. H., Huang, H. you, & Xie, J. xin. (2017). Microstructure and superelasticity control by rolling and heat treatment in columnar-grained Cu-Al-Mn shape memory alloy. *Materials Science and Engineering A*, 696, 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.085>

-
- Machado, L. G., & Lagoudas, D. C. (2008). *Modeling of SMAs*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8>
- Manurung, V. Y. T. S. Y. (2020). *Panduan metalografi*.
- Masrul, R. I., Ramadhani, M., & Rochiem, R. (2021). Analisis Pengaruh Variasi Quenching Solution Treatment dan Proses Artificial Aging terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Cu-Zn-Al Shape Memory Alloy. *Jurnal Teknik ITS*, *X*, 6–11.
- 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>
- Mehrpouya, M., Gisario, A., & Elahinia, M. (2018). Laser welding of NiTi shape memory alloy: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, *31*, 162–186. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.011>
- Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, *56*, 1078–1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>
- Oliveira, J. P., Miranda, R. M., & Braz Fernandes, F. M. (2017). Welding and Joining of NiTi Shape Memory Alloys: A Review. *Progress in Materials Science*, *88*, 412–466. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.008>
- Pizetta Zordão, L. H., Oliveira, V. A., Totten, G. E., & Canale, L. C. F. (2019). Quenching power of aqueous salt solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *140*, 807–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.036>
- 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>
- Rizki, M. A., Rochiem, R., & Ramadhani, M. (2020). Studi Karakterisasi Variasi Temperatur Annealing Paduan Cu-Zn-Al Terhadap Hardness Test dan Differential Scanning Calorimetry (DSC). *Jurnal Teknik ITS*, *x*(x), 5–8.
- Roell. (2011). Vickers Hardness Test. *Indentec Hardness Testing Machines Limited*, 907–907. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72816-0_22946
- S.H. Avner. (1974). Introduction to Physical Metallurgy. *Library of Congress Cataloging in Publication Data.*, *1*.
- 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>
- Stošić, Z., Manasijević, D., Balanović, L., Holjevac-Grgurić, T., Stamenković, U., Premović, M., Minić, D., Gorgievski, M., & Todorović, R. (2017). Effects of composition and thermal treatment of Cu-Al-Zn alloys with low content of Al on their shape-memory properties. *Materials Research*, *20*(5), 1425–1431. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0153>
- Tadayyon, G., Mazinani, M., Guo, Y., Zebarjad, S. M., Tofail, S. A. M., & Biggs, M. J. (2016). The effect of annealing on the mechanical properties and microstructural evolution of Ti-rich NiTi shape memory alloy. *Materials Science and Engineering A*, *662*, 564–577. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.004>
- Totten, G. E., & Clinton, A. (1993). Handbook of Quenchants and Quenching Technology. *Materials & Design*, *14*(6), 368. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(93\)90123-d](https://doi.org/10.1016/0261-3069(93)90123-d)
- Twyman, R. M. (2015). Atomic Emission Spectrometry. *Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry*, *15*(C), 91–128. [https://doi.org/10.1016/S0167-9244\(08\)70147-1](https://doi.org/10.1016/S0167-9244(08)70147-1)
- Wang, F. T., Chen, F. X., Wei, Z. G., & Yang, D. Z. (1991). The effects of microelements on
-

-
- the grain refining and the grain growth behaviors of CuZnAl shape memory alloy. *Scripta Metallurgica et Materiala*, 25(11), 2565–2570. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(91\)90069-D](https://doi.org/10.1016/0956-716X(91)90069-D)
- Wayman, C. M. (1980). Some Applications of Alloys. *Journal of Metals*, 129–130.
- Widyastuti, Ardhyanta, H., Purwaningsih, H., & Quluq, R. M. (n.d.). *Karakterisasi Material*.
- Wu, Y., Yaacoub, J., Brenne, F., Abuzaid, W., Canadinc, D., & Sehitoglu, H. (2019). Deshielding effects on fatigue crack growth in shape memory alloys- A study on CuZnAl single-crystalline materials. *Acta Materialia*, 176, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.042>
- Xu, B., Kang, G., Kan, Q., Yu, C., & Xie, X. (2019). Phase field simulation on the cyclic degeneration of one-way shape memory effect of NiTi shape memory alloy single crystal. *International Journal of Mechanical Sciences*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105303>
- Zanaboni, E. (2008). *Universit a One Way and Two Way – Shape Memory Effect : Thermo – Mechanical Characterization of Ni – Ti wires*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. Perhitungan *Mass Balance* Komposisi Paduan CuZnAl

Target komposisi paduan:

Cu (Tembaga) : 71,4%

Zn (Zinc) : 23,6%

Al (Aluminium) : 5%

Kebutuhan bahan untuk membuat satu spesimen:

As Tembaga : 581,76 gr

As Kuningan : 976,74 gr

Ingot Al : 79,88 gr


Kebutuhan bahan untuk membuat tiga spesimen:

As Tembaga : $581,76 \text{ gr} \times 3 = 1745,28 \text{ gr}$

As Kuningan : $976,74 \text{ gr} \times 3 = 2930,22 \text{ gr}$

Ingot Al : $79,88 \text{ gr} \times 3 = 239,64 \text{ gr}$

2. Hasil Pengujian Komposisi



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

LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN
ATTACHMENT OF THE TEST RESULT



| | | |
|--------|--------|---------------|
| Number | : 0416 | PL19/BIP/2022 |
|--------|--------|---------------|

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

F.08-LI08-ITNS

| Identification | CHEMICAL COMPOSITION TEST | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--|--|
| | COMPOSITION (%) | | | | | | | | | |
| Element | Cu | Zn | Pb | Sn | P | Mn | Fe | Ni | | |
| Value | 73.6 | 15.8 | 1.69 | 0.181 | 0.0002 | <0.0002 | 0.146 | 0.0836 | | |
| Element | Si | Mg | Cr | Al | S | As | Ag | Ca | | |
| 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

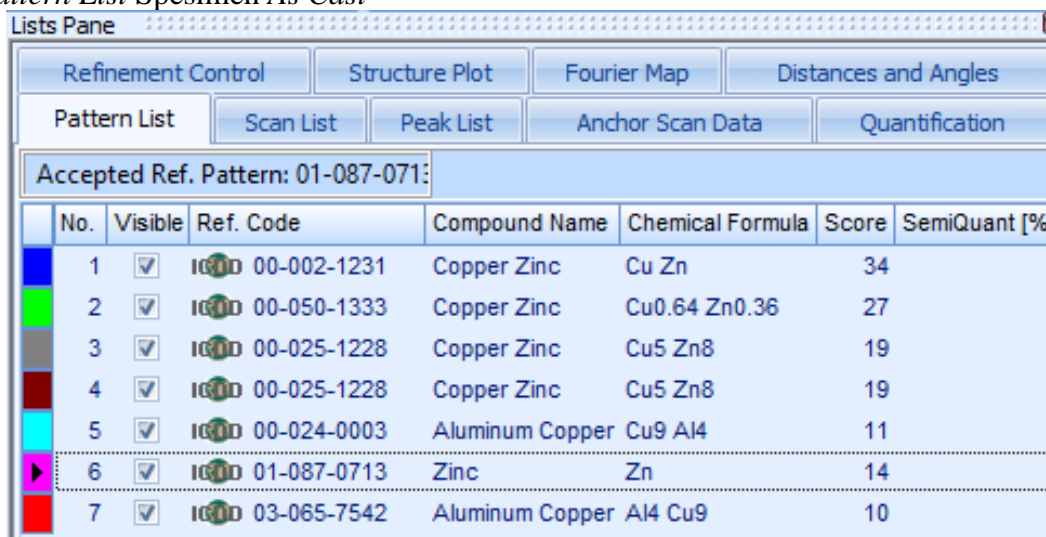
| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Examined by: | Checked by: |
|  |  |
| Muhammad Hendri Budi K | Muhammad Hendri Budi K |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <p>Keterangan / Note:</p> <p>1. Melampirkan sertifikat analisis ini dengan hasil uji yang tertera dari PPNS It is for internal use only, this certificate is for internal use only, without permission from PPNS</p> <p>2. Hasil pengujian ini tidak dapat digunakan dan harus berlaku untuk material yang diujikan dalam pengujian ini This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above</p> | <p>Halaman 2 dari 2</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|

3. Hasil Perhitungan Uji Kekerasan

| Spesimen | Titik 1 (VHN) | Titik 2 (VHN) | Titik 3 (VHN) | Rata-Rata (VHN) | STDEV |
|----------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|-------|
| <i>As Cast</i> | 286 | 289 | 290 | 288,33 | 2,08 |
| A1H | 258 | 262 | 257 | 259 | 2,64 |
| A2H | 252 | 251 | 248 | 250,33 | 2,08 |
| A4H | 245 | 236 | 239 | 240 | 4,58 |
| DQBR1H | 285 | 282 | 285 | 284 | 1,73 |
| DQBR2H | 275 | 273 | 270 | 272,67 | 2,52 |
| DQBR4H | 266 | 264 | 263 | 264,33 | 1,53 |
| DQOL1H | 280 | 278 | 280 | 279,33 | 1,15 |
| DQOL2H | 269 | 267 | 271 | 269 | 2 |
| DQOL4H | 253 | 255 | 256 | 254,67 | 1,53 |

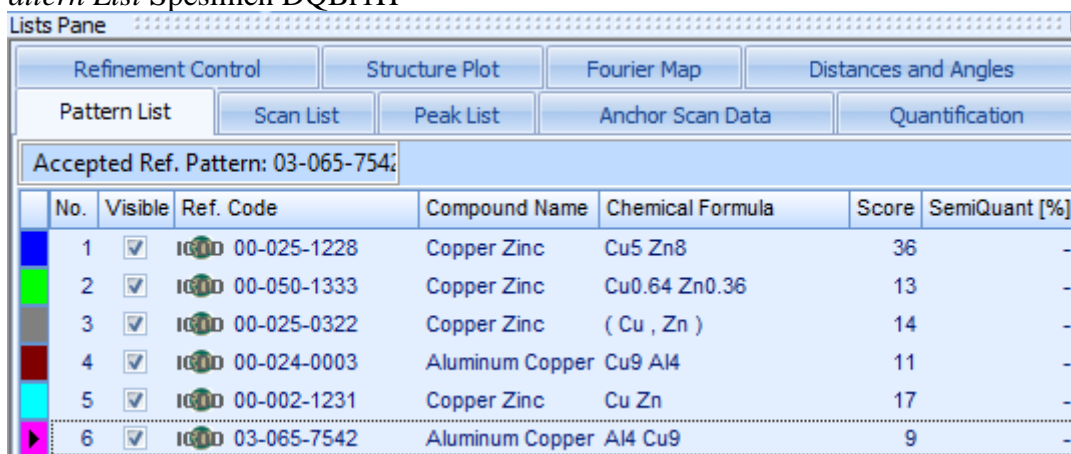
4. *Pattern List Spesimen As Cast*



Accepted Ref. Pattern: 01-087-071:

| No. | Visible | Ref. Code | Compound Name | Chemical Formula | Score | SemiQuant [%] |
|-----|-------------------------------------|------------------|-----------------|---------------------------------------|-------|---------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-002-1231 | Copper Zinc | Cu Zn | 34 | |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-050-1333 | Copper Zinc | Cu _{0.64} Zn _{0.36} | 27 | |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-025-1228 | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 19 | |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-025-1228 | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 19 | |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-024-0003 | Aluminum Copper | Cu ₉ Al ₄ | 11 | |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 01-087-0713 | Zinc | Zn | 14 | |
| 7 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 03-065-7542 | Aluminum Copper | Al ₄ Cu ₉ | 10 | |

5. *Pattern List Spesimen DQBr1H*



Accepted Ref. Pattern: 03-065-754:

| No. | Visible | Ref. Code | Compound Name | Chemical Formula | Score | SemiQuant [%] |
|-----|-------------------------------------|------------------|-----------------|---------------------------------------|-------|---------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-025-1228 | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 36 | - |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-050-1333 | Copper Zinc | Cu _{0.64} Zn _{0.36} | 13 | - |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-025-0322 | Copper Zinc | (Cu , Zn) | 14 | - |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-024-0003 | Aluminum Copper | Cu ₉ Al ₄ | 11 | - |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 00-002-1231 | Copper Zinc | Cu Zn | 17 | - |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/> | ICDD 03-065-7542 | Aluminum Copper | Al ₄ Cu ₉ | 9 | - |

6. *Pattern List Spesimen DQBr2H*

Lists Pane

Refinement Control Structure Plot Fourier Map Distances and Angles

Pattern List Scan List Peak List Anchor Scan Data Quantification

Accepted Ref. Pattern: 00-025-1228

| No. | Visible | Ref. Code | Compound Name | Chemical Formula | Score | SemiQuant [%] |
|-----|-------------------------------------|-------------|-----------------|---------------------------------------|-------|---------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-025-1228 | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 23 | - |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-050-1333 | Copper Zinc | Cu _{0.64} Zn _{0.36} | 28 | - |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-002-1231 | Copper Zinc | Cu Zn | 15 | - |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-024-0003 | Aluminum Copper | Cu ₉ Al ₄ | 11 | - |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | 03-065-5973 | Zinc | Zn | 23 | - |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/> | 03-065-7542 | Aluminum Copper | Al ₄ Cu ₉ | 9 | - |

7. *Pattern List* Spesimen DQBr4H

Lists Pane

Refinement Control Structure Plot Fourier Map Distances and Angles

Pattern List Scan List Peak List Anchor Scan Data Quantification

Accepted Ref. Pattern: 00-002-1231

| No. | Visible | Ref. Code | Compound Name | Chemical Formula | Score | SemiQuant [%] |
|-----|-------------------------------------|-------------|-----------------|---------------------------------------|-------|---------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-002-1231 | Copper Zinc | Cu Zn | 38 | - |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-024-0003 | Aluminum Copper | Cu ₉ Al ₄ | 12 | - |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-050-1333 | Copper Zinc | Cu _{0.64} Zn _{0.36} | 18 | - |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-025-1228 | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 19 | - |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | 01-071-0397 | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 14 | - |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/> | 03-065-7542 | Aluminum Copper | Al ₄ Cu ₉ | 10 | - |
| 7 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-001-1238 | Zinc | Zn | 25 | - |

8. *Pattern List* Spesimen DQO11H

Lists Pane

Refinement Control Structure Plot Fourier Map Distances and Angles

Pattern List Scan List Peak List Anchor Scan Data Quantification

Accepted Ref. Pattern: 00-025-1228

| No. | Visible | Ref. Code | Compound Name | Chemical Formula | Score | SemiQuant [%] |
|-----|-------------------------------------|-------------|-----------------|---------------------------------------|-------|---------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-025-1228 | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 26 | - |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-025-1228 | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 26 | - |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | 03-065-7542 | Aluminum Copper | Al ₄ Cu ₉ | 9 | - |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-002-1231 | Copper Zinc | Cu Zn | 31 | - |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-050-1333 | Copper Zinc | Cu _{0.64} Zn _{0.36} | 11 | - |

9. *Pattern List* Spesimen DQO12H

Lists Pane

Refinement Control Structure Plot Fourier Map Distances and Angles

Pattern List Scan List Peak List Anchor Scan Data Quantification

Accepted Ref. Pattern: 03-065-7542

| No. | Visible | Ref. Code | Compound Name | Chemical Formula | Score | SemiQuant [%] |
|-----|-------------------------------------|-------------|-----------------|---------------------------------------|-------|---------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-025-1228 | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 32 | - |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-050-1333 | Copper Zinc | Cu _{0.64} Zn _{0.36} | 28 | - |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-002-1231 | Copper Zinc | Cu Zn | 38 | - |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | 03-065-3347 | Aluminum Copper | Al ₄ Cu ₉ | 10 | - |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | 03-065-7542 | Aluminum Copper | Al ₄ Cu ₉ | 11 | - |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-001-1238 | Zinc | Zn | 24 | - |

10. Pattern List Spesimen DQOI4H

Lists Pane

Refinement Control Structure Plot Fourier Map Distances and Angles

Pattern List Scan List Peak List Anchor Scan Data Quantification

Accepted Ref. Pattern: 00-050-1333

| No. | Visible | Ref. Code | Compound Name | Chemical Formula | Score | SemiQuant [%] |
|-----|-------------------------------------|-----------|-----------------|---------------------------------------|-------|---------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-... | Copper Zinc | Cu Zn | 36 | - |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-... | Copper Zinc | Cu _{0.64} Zn _{0.36} | 29 | - |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | 03-... | Aluminum Copper | Al ₄ Cu ₉ | 11 | - |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-... | Copper Zinc | Cu _{0.64} Zn _{0.36} | 29 | - |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | 00-... | Copper Zinc | Cu ₅ Zn ₈ | 27 | - |

11. PDF Card α -brass 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: Cu_{0.64}Zn_{0.36}

Chemical formula: Cu_{0.64}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 (g/cm³): 8.44
Measured density (g/cm³): 8.43
Volume of cell (10⁶ pm³): 50.49
Z: 4.00

RIR: -

Subfiles and Quality

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

Comments

Creation Date: 1/1/1970
Modification Date: 1/1/1970
Sample Preparation: Commercially available Cu₆₄-Zn₃₆ 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.

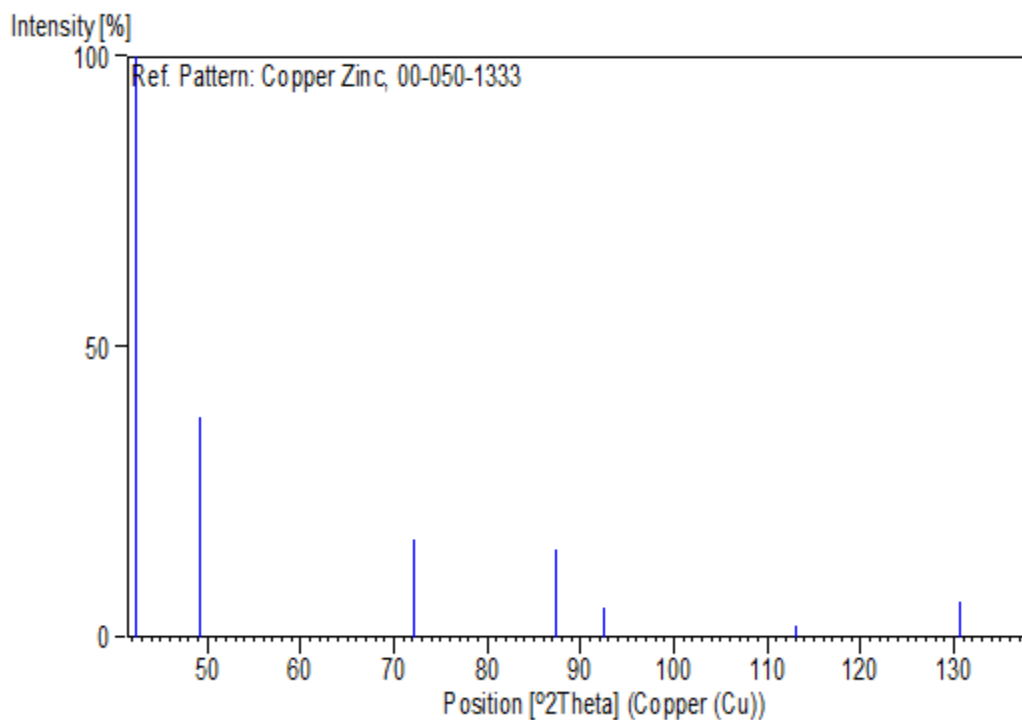
References

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



12. PDF Card β -brass 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 ⁶ pm ³): | 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: 1/1/1970
Modification Date: 1/1/1970
D-values corrected for absorption. \$GB' phase, ordered (PI). Additional Patterns: See also 00-008-0349
Color: Yellow
Analysis: Analysis (wt.%): Cu 51.0, Zn 49.0.

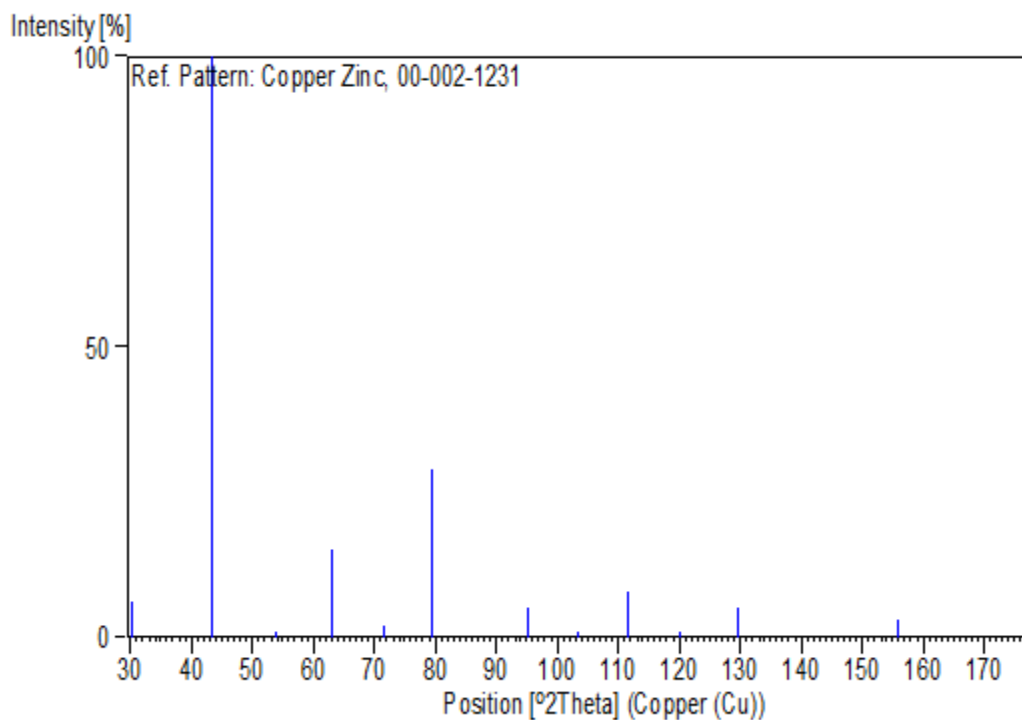
References

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. |
| 13 | 4 | 0 | 0 | 0.73800 | | 4.0 |

Stick Pattern



13. PDF Card γ -brass ICDD 00-025-1228

Name and formula

Reference code: 00-025-1228

Compound name: Copper Zinc

Common name: γ -brass

PDF index name: Copper Zinc

Empirical formula: Cu_5Zn_8

Chemical formula: Cu_5Zn_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^3): 8.03

Volume of cell (10^6 pm^3): 695.51

Z: 4.00

RIR: -

Subfiles and Quality

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

Comments

Creation Date: 1/1/1970
Modification Date: 1/1/1970

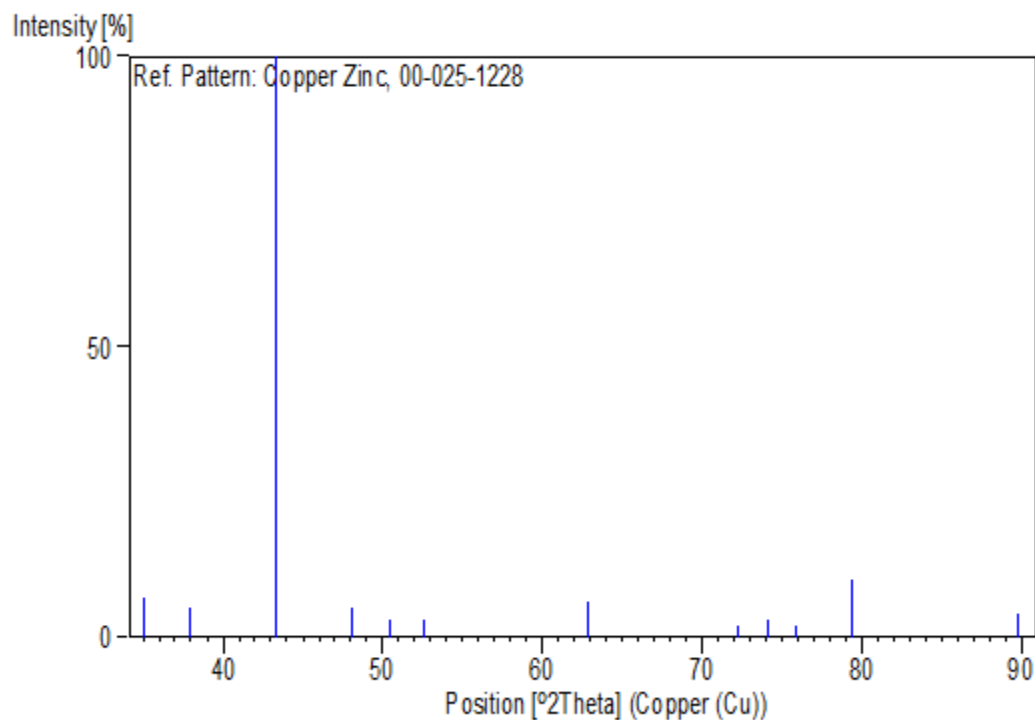
References

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



14. PDF Card γ -brass ICDD 03-065-7542

Name and formula

Reference code: 03-065-7542

Compound name: Aluminum Copper
PDF index name: Aluminum Copper

Empirical formula: Al_4Cu_9
Chemical formula: Al_4Cu_9

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: P-43m
Space group number: 215

a (Å): 8.7023
 b (Å): 8.7023
 c (Å): 8.7023
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Calculated density (g/cm³): 6.85
Volume of cell (10⁶ pm³): 659.03
Z: 4.00

RIR: 5.99

Subfiles and Quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Inorganic
NIST Pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

Creation Date: 1/1/1970

Modification Date: 1/1/1970

L 2295 51500 10. Temperature Factor: Reported TF look Unusual. B=1.0 was used in the calculation

Sample Preparation: Weighed amounts of Cu and Al totaling 2g were melted together by induction heating in a BeO crucible under vacuum. The pellets were crushed, and the powder annealed at 660C for 10d in evacuated silica capsules. Refinement of the g-Cu9Al4 Structure.

References

Primary reference: *Calculated from NIST using POWD-12++*

Structure: Westman, S., *Acta Chem. Scand.*, **19**, 1411, (1965)

Peak list

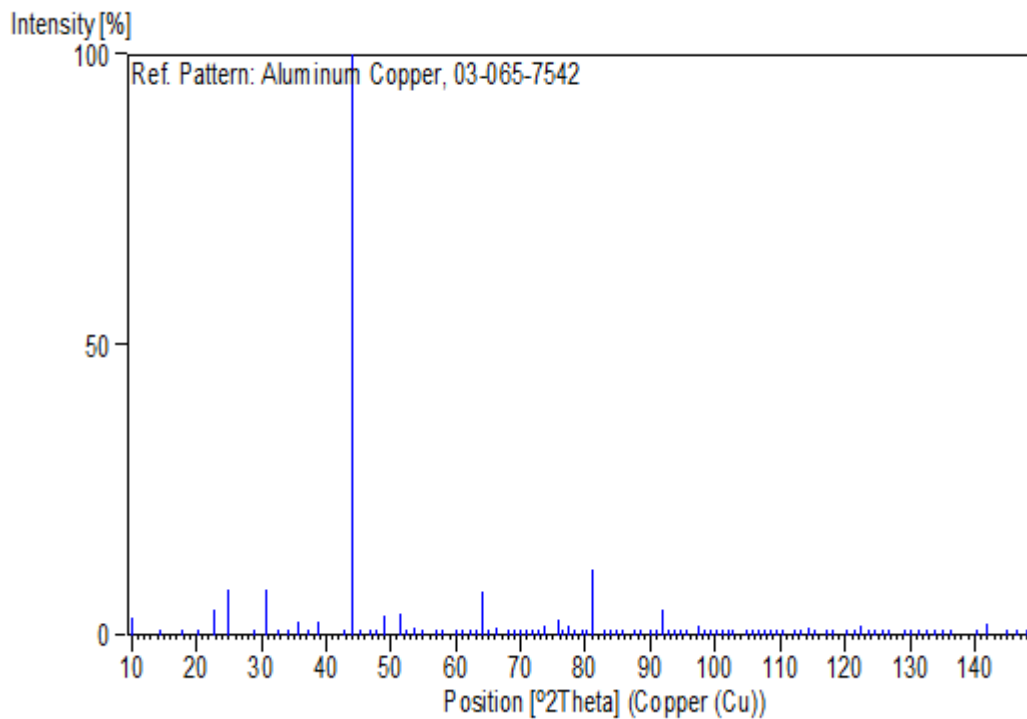
| No. | h | k | l | d [Å] | 2Theta [deg] | I [%] |
|-----|---|---|---|---------|--------------|-------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 8.70230 | 10.157 | 3.1 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 6.15346 | 14.382 | 1.0 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 5.02427 | 17.638 | 0.4 |
| 4 | 2 | 0 | 0 | 4.35115 | 20.394 | 0.2 |
| 5 | 2 | 1 | 0 | 3.89179 | 22.832 | 4.5 |
| 6 | 2 | 1 | 1 | 3.55270 | 25.045 | 8.0 |
| 7 | 2 | 2 | 0 | 3.07673 | 28.998 | 0.1 |
| 8 | 3 | 0 | 0 | 2.90077 | 30.799 | 7.7 |
| 9 | 3 | 1 | 0 | 2.75191 | 32.510 | 0.2 |
| 10 | 3 | 1 | 1 | 2.62384 | 34.144 | 0.4 |
| 11 | 2 | 2 | 2 | 2.51214 | 35.713 | 2.5 |
| 12 | 3 | 2 | 0 | 2.41358 | 37.223 | 0.1 |
| 13 | 3 | 2 | 1 | 2.32579 | 38.683 | 2.4 |
| 14 | 3 | 2 | 2 | 2.11062 | 42.811 | 0.6 |
| 15 | 3 | 3 | 0 | 2.05115 | 44.116 | 100.0 |
| 16 | 3 | 3 | 1 | 1.99644 | 45.391 | 0.5 |
| 17 | 4 | 2 | 0 | 1.94589 | 46.639 | 0.6 |
| 18 | 4 | 2 | 1 | 1.89900 | 47.862 | 0.8 |
| 19 | 3 | 3 | 2 | 1.85534 | 49.061 | 3.4 |
| 20 | 4 | 2 | 2 | 1.77635 | 51.398 | 3.9 |
| 21 | 5 | 0 | 0 | 1.74046 | 52.538 | 0.1 |
| 22 | 5 | 1 | 0 | 1.70666 | 53.661 | 1.2 |
| 23 | 5 | 1 | 1 | 1.67476 | 54.767 | 1.1 |
| 24 | 5 | 2 | 0 | 1.61598 | 56.937 | 0.5 |
| 25 | 5 | 2 | 1 | 1.58882 | 58.002 | 0.2 |
| 26 | 4 | 4 | 0 | 1.53836 | 60.096 | 0.1 |
| 27 | 5 | 2 | 2 | 1.51488 | 61.126 | 0.7 |

LAPORAN TUGAS AKHIR TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

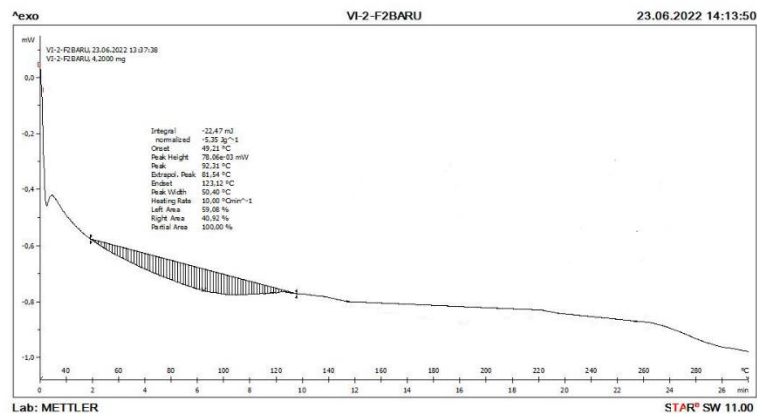
| | | | | | | |
|----|----|---|---|---------|---------|------|
| 28 | 4 | 3 | 3 | 1.49243 | 62.147 | 0.3 |
| 29 | 5 | 3 | 1 | 1.47096 | 63.158 | 0.3 |
| 30 | 6 | 0 | 0 | 1.45038 | 64.160 | 7.6 |
| 31 | 6 | 1 | 0 | 1.43065 | 65.153 | 0.2 |
| 32 | 6 | 1 | 1 | 1.41170 | 66.139 | 1.3 |
| 33 | 6 | 2 | 0 | 1.37595 | 68.088 | 0.1 |
| 34 | 5 | 4 | 0 | 1.35907 | 69.053 | 0.3 |
| 35 | 5 | 4 | 1 | 1.34279 | 70.011 | 0.3 |
| 36 | 5 | 3 | 3 | 1.32709 | 70.963 | 0.1 |
| 37 | 6 | 2 | 2 | 1.31192 | 71.911 | 0.1 |
| 38 | 6 | 3 | 0 | 1.29726 | 72.853 | 0.2 |
| 39 | 6 | 3 | 1 | 1.28308 | 73.790 | 1.5 |
| 40 | 4 | 4 | 4 | 1.25607 | 75.651 | 2.8 |
| 41 | 6 | 3 | 2 | 1.24319 | 76.576 | 0.1 |
| 42 | 5 | 5 | 0 | 1.23069 | 77.498 | 1.5 |
| 43 | 7 | 1 | 1 | 1.21857 | 78.416 | 0.2 |
| 44 | 6 | 4 | 0 | 1.20679 | 79.331 | 0.4 |
| 45 | 6 | 4 | 1 | 1.19535 | 80.243 | 0.2 |
| 46 | 6 | 3 | 3 | 1.18423 | 81.153 | 11.2 |
| 47 | 6 | 4 | 2 | 1.16289 | 82.967 | 0.3 |
| 48 | 5 | 4 | 4 | 1.15265 | 83.870 | 0.1 |
| 49 | 7 | 3 | 0 | 1.14267 | 84.772 | 0.2 |
| 50 | 7 | 3 | 1 | 1.13294 | 85.674 | 0.1 |
| 51 | 6 | 5 | 0 | 1.11422 | 87.472 | 0.2 |
| 52 | 7 | 3 | 2 | 1.10519 | 88.371 | 0.7 |
| 53 | 8 | 0 | 0 | 1.08779 | 90.166 | 0.1 |
| 54 | 8 | 1 | 0 | 1.07939 | 91.064 | 0.1 |
| 55 | 7 | 4 | 1 | 1.07118 | 91.963 | 4.4 |
| 56 | 7 | 3 | 3 | 1.06316 | 92.861 | 0.1 |
| 57 | 8 | 2 | 0 | 1.05531 | 93.761 | 0.7 |
| 58 | 8 | 2 | 1 | 1.04763 | 94.662 | 0.1 |
| 59 | 6 | 5 | 3 | 1.04012 | 95.563 | 0.2 |
| 60 | 6 | 6 | 0 | 1.02558 | 97.369 | 1.7 |
| 61 | 8 | 3 | 0 | 1.01853 | 98.276 | 0.1 |
| 62 | 8 | 3 | 1 | 1.01162 | 99.185 | 0.3 |
| 63 | 5 | 5 | 5 | 1.00486 | 100.095 | 0.1 |
| 64 | 6 | 6 | 2 | 0.99822 | 101.009 | 0.5 |
| 65 | 8 | 3 | 2 | 0.99172 | 101.925 | 0.1 |
| 66 | 7 | 5 | 2 | 0.98534 | 102.844 | 0.5 |
| 67 | 8 | 4 | 0 | 0.97295 | 104.693 | 0.1 |
| 68 | 7 | 4 | 4 | 0.96692 | 105.623 | 0.2 |
| 69 | 9 | 1 | 0 | 0.96101 | 106.558 | 0.2 |
| 70 | 9 | 1 | 1 | 0.95520 | 107.497 | 0.1 |
| 71 | 8 | 4 | 2 | 0.94950 | 108.440 | 0.1 |
| 72 | 7 | 6 | 0 | 0.94390 | 109.390 | 0.1 |
| 73 | 9 | 2 | 1 | 0.93839 | 110.344 | 0.2 |
| 74 | 6 | 6 | 4 | 0.92767 | 112.272 | 0.1 |
| 75 | 9 | 2 | 2 | 0.92244 | 113.245 | 0.1 |
| 76 | 9 | 3 | 0 | 0.91730 | 114.226 | 1.4 |
| 77 | 9 | 3 | 1 | 0.91225 | 115.215 | 0.1 |
| 78 | 8 | 5 | 2 | 0.90239 | 117.217 | 0.1 |
| 79 | 9 | 3 | 2 | 0.89757 | 118.231 | 0.1 |
| 80 | 8 | 4 | 4 | 0.88818 | 120.289 | 0.1 |
| 81 | 9 | 4 | 0 | 0.88358 | 121.334 | 0.1 |
| 82 | 8 | 5 | 3 | 0.87906 | 122.392 | 1.6 |
| 83 | 7 | 7 | 1 | 0.87461 | 123.461 | 0.1 |
| 84 | 10 | 0 | 0 | 0.87023 | 124.544 | 0.2 |
| 85 | 8 | 6 | 1 | 0.86591 | 125.642 | 0.1 |
| 86 | 10 | 1 | 1 | 0.86166 | 126.754 | 1.0 |
| 87 | 10 | 2 | 0 | 0.85333 | 129.030 | 0.3 |

| | | | | | | |
|----|----|---|---|---------|---------|-----|
| 88 | 10 | 2 | 1 | 0.84926 | 130.196 | 0.1 |
| 89 | 9 | 5 | 0 | 0.84524 | 131.381 | 0.1 |
| 90 | 9 | 5 | 1 | 0.84128 | 132.589 | 0.1 |
| 91 | 10 | 2 | 2 | 0.83738 | 133.821 | 0.8 |
| 92 | 8 | 6 | 3 | 0.83353 | 135.079 | 0.1 |
| 93 | 9 | 5 | 2 | 0.82973 | 136.365 | 0.2 |
| 94 | 9 | 4 | 4 | 0.81864 | 140.422 | 0.1 |
| 95 | 7 | 7 | 4 | 0.81504 | 141.853 | 2.1 |
| 96 | 10 | 4 | 0 | 0.80799 | 144.863 | 0.1 |
| 97 | 9 | 6 | 0 | 0.80453 | 146.454 | 0.2 |
| 98 | 9 | 6 | 1 | 0.80111 | 148.115 | 0.3 |

Stick Pattern



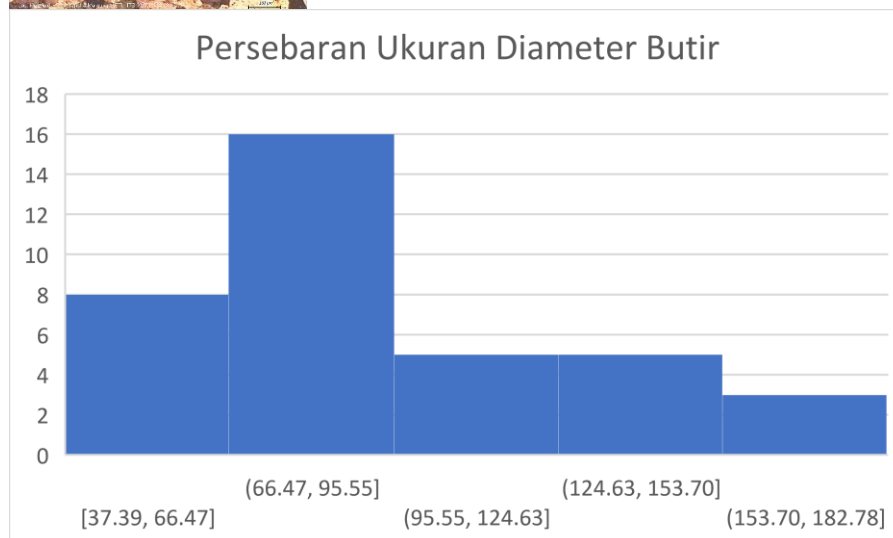
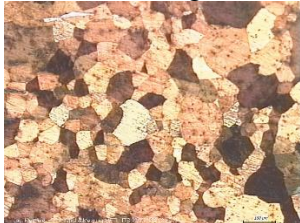
15. Hasil Pengujian DSC spesimen DQOL4H



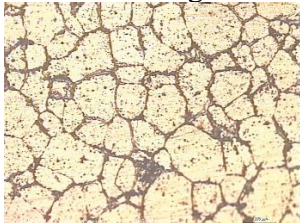
16. Hasil Perhitungan Uji Kekerasan

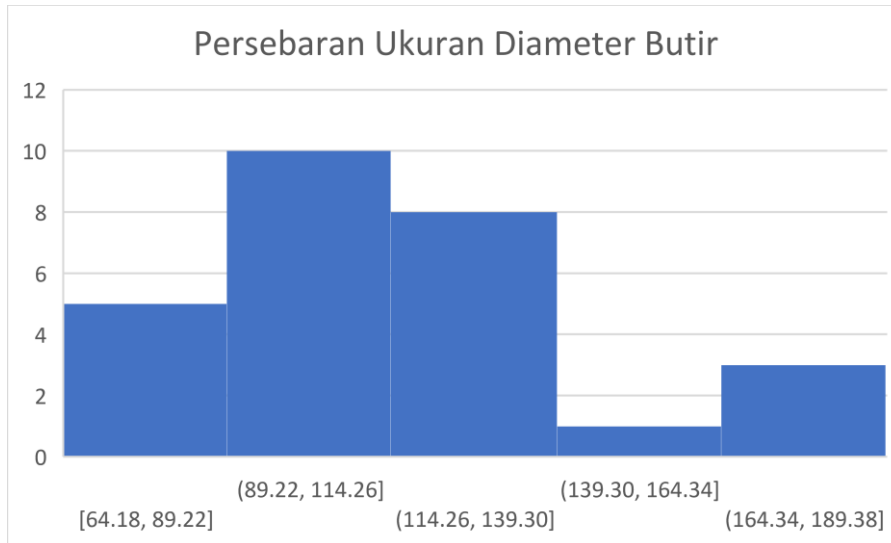
| Spesimen | Titik 1 (VHN) | Titik 2 (VHN) | Titik 3 (VHN) | Rata-Rata (VHN) | STDEV |
|----------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|-------|
| <i>As Cast</i> | 286 | 289 | 290 | 288,33 | 2,08 |
| A1H | 258 | 262 | 257 | 259 | 2,64 |
| A2H | 252 | 251 | 248 | 250,33 | 2,08 |
| A4H | 245 | 236 | 239 | 240 | 4,58 |
| DQBR1H | 285 | 282 | 285 | 284 | 1,73 |
| DQBR2H | 275 | 273 | 270 | 272,67 | 2,52 |
| DQBR4H | 266 | 264 | 263 | 264,33 | 1,53 |
| DQOL1H | 280 | 278 | 280 | 279,33 | 1,15 |
| DQOL2H | 269 | 267 | 271 | 269 | 2 |
| DQOL4H | 253 | 255 | 256 | 254,67 | 1,53 |

17. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen *As Cast*

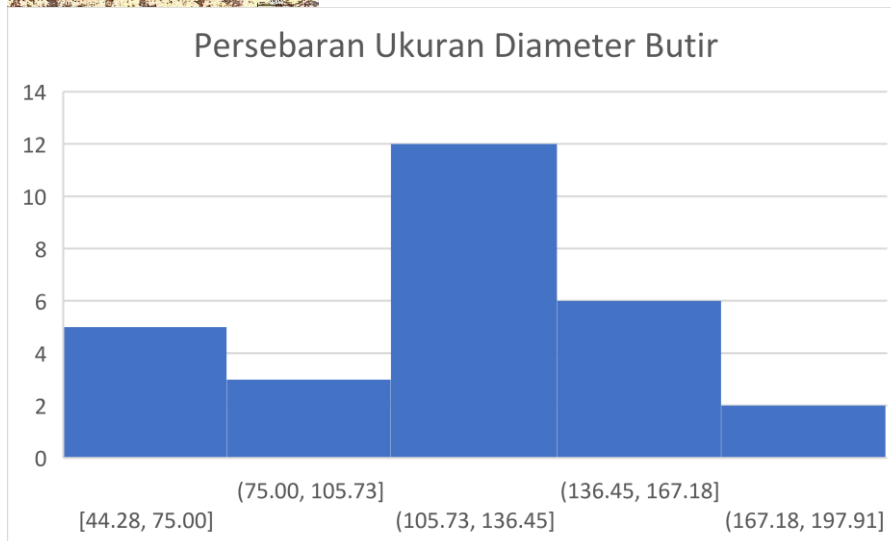
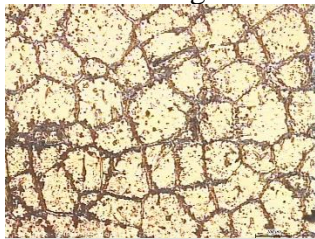


18. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen A1H



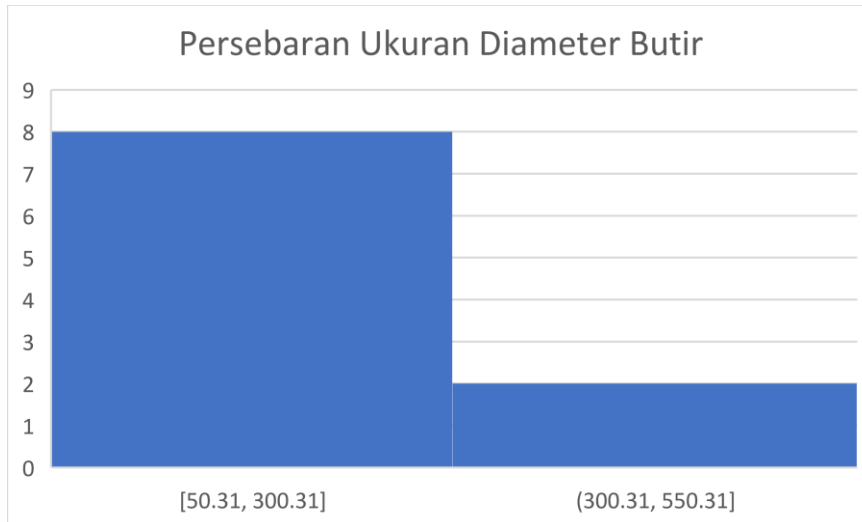


19. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen A2H

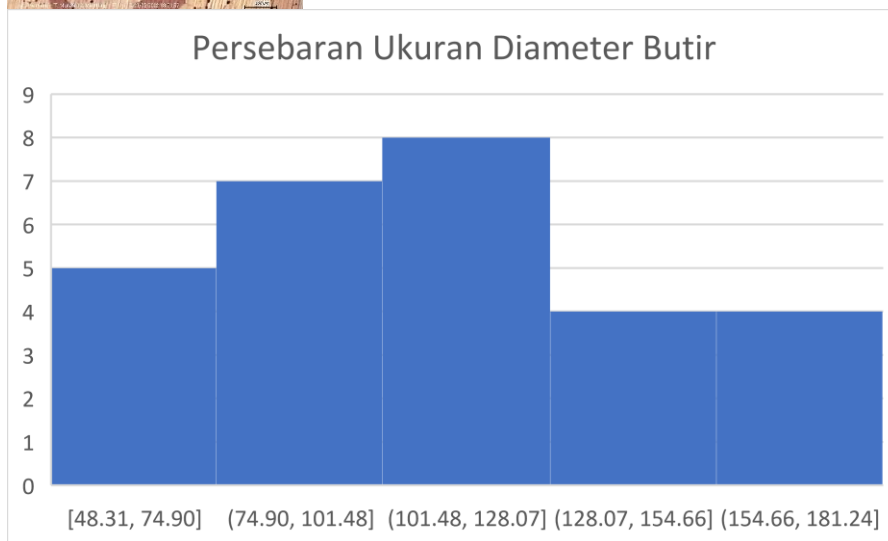


20. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen A4H



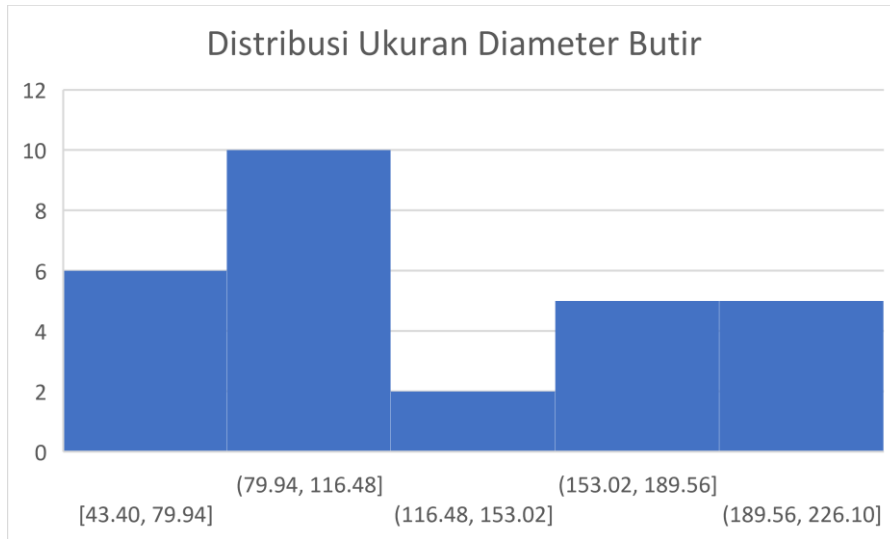


21. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen DQBR1H

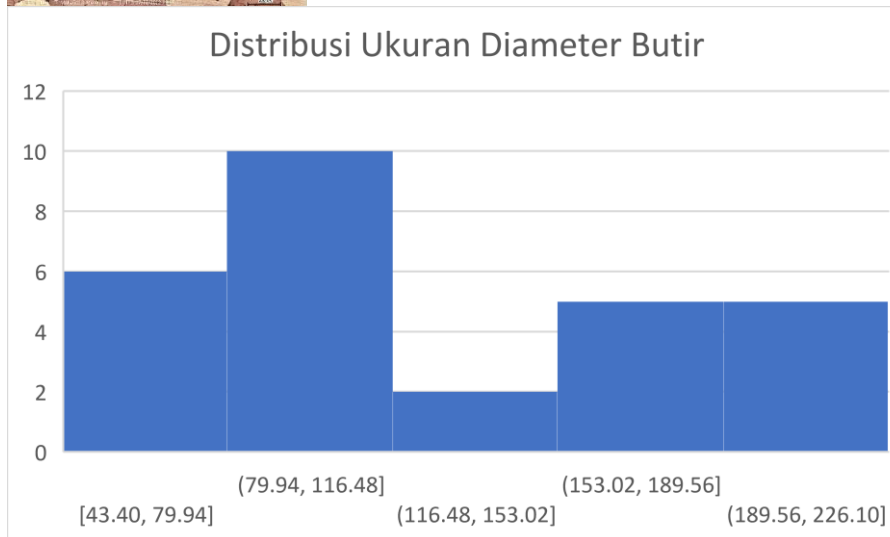


22. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen DQBR2H

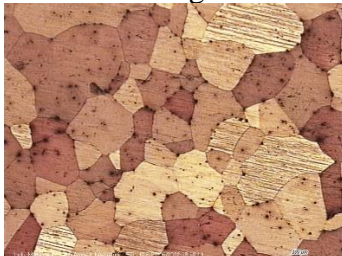


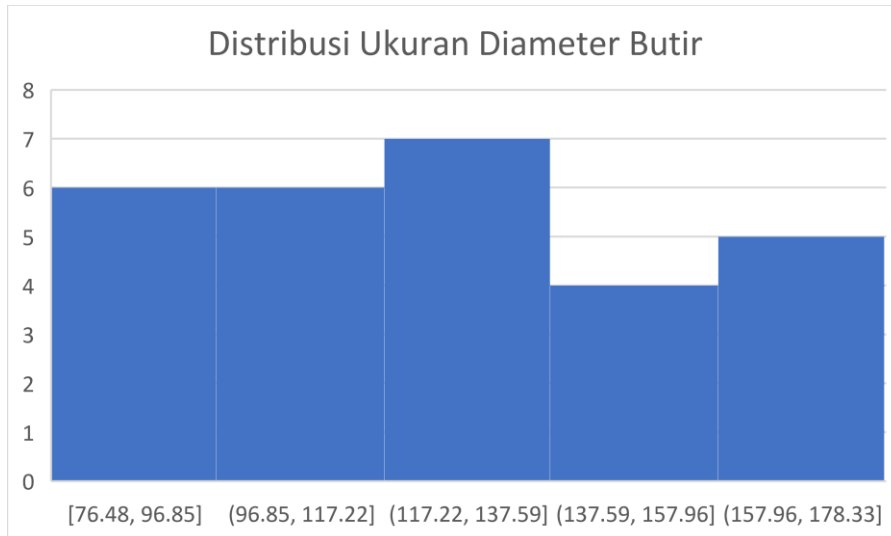


23. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen DQBR4H

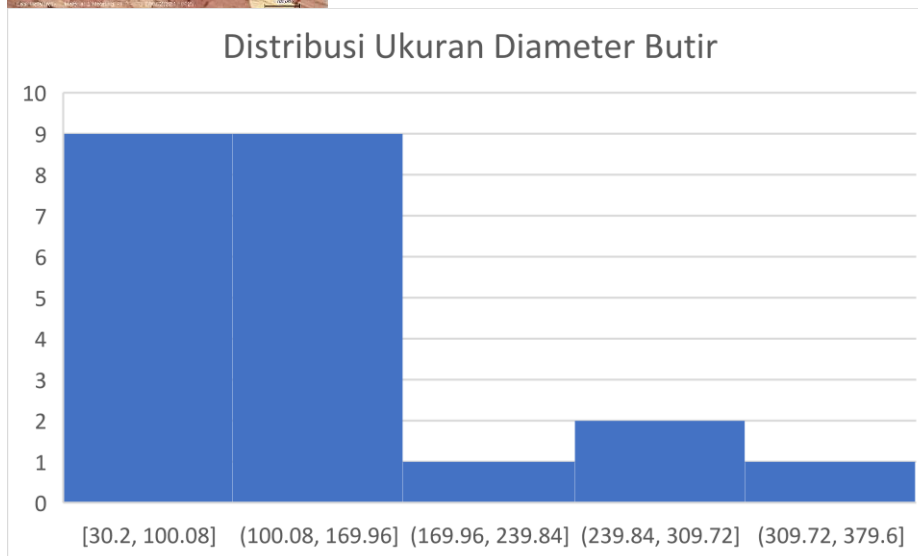
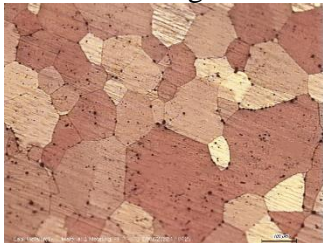


24. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen DQOL1H

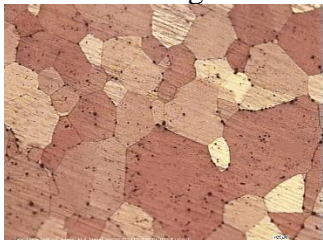


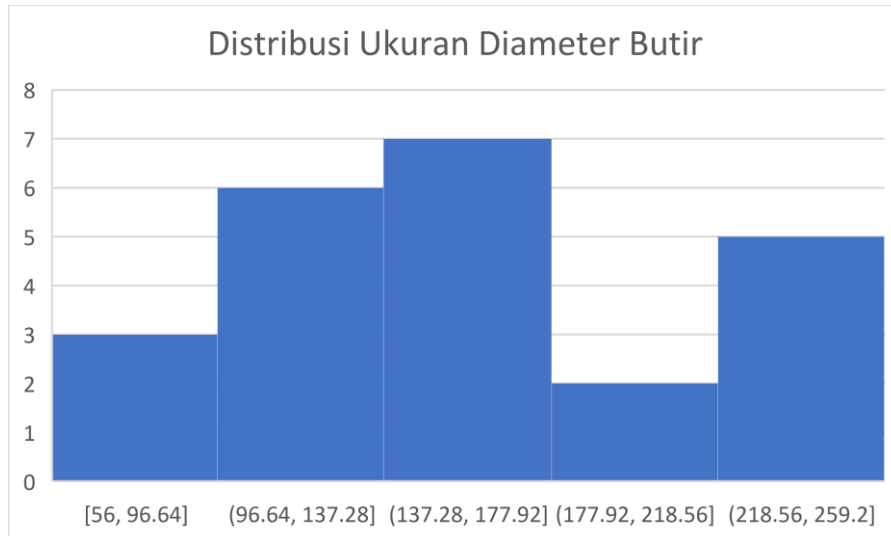


25. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen DQOL2H



26. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen DQOL4H





27. Hasil Perhitungan DSC (ASM Handbook Volume 2)

- Mengubah dari (wt%) menjadi (at%)
Dengan Ar Cu = 63,5, Ar Zn = 65,4, dan Ar Al = 27

Konversi

| | wt. % | | at. % |
|----|-------|----|------------------------|
| Cu | 76,21 | Cu | $7,227 \times 10^{23}$ |
| Zn | 16,8 | Zn | $1,546 \times 10^{23}$ |
| Al | 6,99 | Al | $1,559 \times 10^{23}$ |

- Menghitung total (at%)
 $\text{Total at\%} = 7,227 \times 10^{23} + 1,546 \times 10^{23} + 1,559 \times 10^{23} = 10,332 \times 10^{23}$
- Menghitung M_s
 $M_s = 2212 - 66,9 (\text{at.\% Zn}) - 90,65(\text{at.\% Al})$
 $= 2212 - 66,9 (1,546 \times 10^{23}) - 90,65(1,559 \times 10^{23})$
 $= -155,826$

28. Hasil Perhitungan DSC (*Enginnering Aspects of Shape Memory Alloy*)

- Mengubah dari (wt%) menjadi (at%)
Dengan Ar Cu = 63,5, Ar Zn = 65,4, dan Ar Al = 27

Konversi

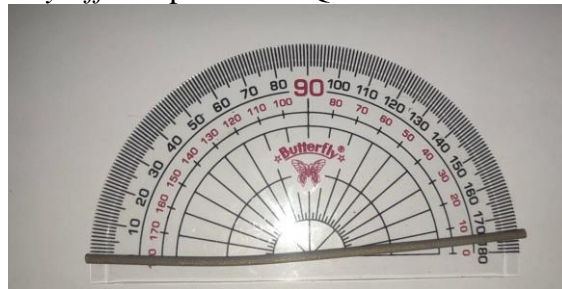
| | wt. % | | at. % |
|----|-------|----|------------------------|
| Cu | 76,21 | Cu | $7,227 \times 10^{23}$ |
| Zn | 16,8 | Zn | $1,546 \times 10^{23}$ |
| Al | 6,99 | Al | $1,559 \times 10^{23}$ |

- Menghitung total (at%)
 $\text{Total at\%} = 7,227 \times 10^{23} + 1,546 \times 10^{23} + 1,559 \times 10^{23} = 10,332 \times 10^{23}$
- Menghitung M_s
 $M_s = 2212 - 66,9 [(\text{at.\% Zn}) + [1,355(\text{at.\% Al})]]$
 $= 2212 - 66,9 [(1,546 \times 10^{23}) + [1,355(1,559 \times 10^{23})]]$
 $= -155,826$

29. Hasil Pengujian *Shape Memory Effect*

| Spesimen | Sudut Sebelum Pemanasan (°) | Sudut Setelah Pemanasan (°) | Recovery |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|----------|
| DQBR1H | 5 | 5 | 0% |
| DQBR2H | 5 | 5 | 0% |
| DQBR4H | 5 | 5 | 0% |
| DQOL1H | 5 | 5 | 0% |
| DQOL2H | 5 | 5 | 0% |
| DQOL4H | 5 | 5 | 0% |

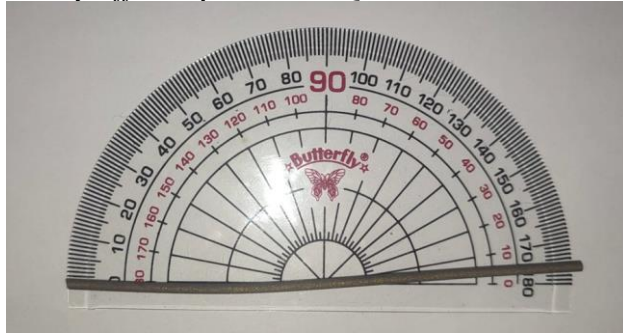
30. Pengujian *Shape Memory Effect* Spesimen DQBR1H



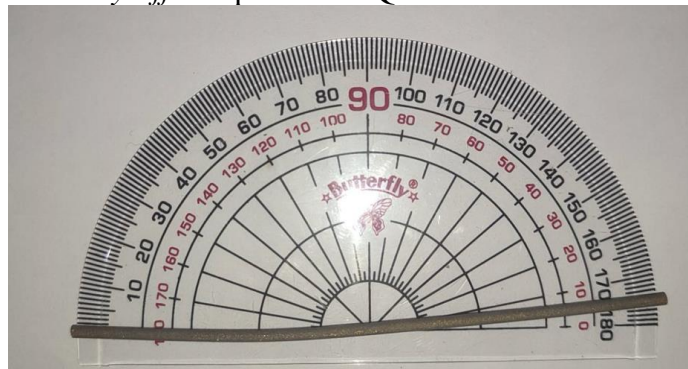
31. Pengujian *Shape Memory Effect* Spesimen DQBr2H



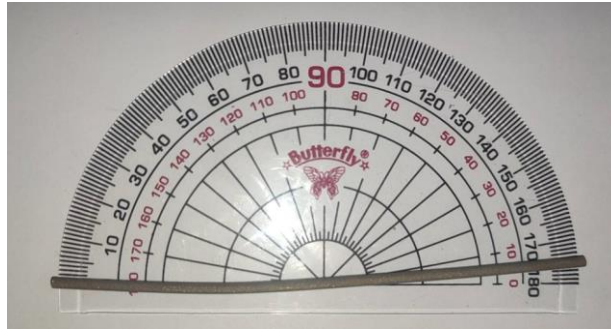
32. Pengujian *Shape Memory Effect* Spesimen DQBr4H



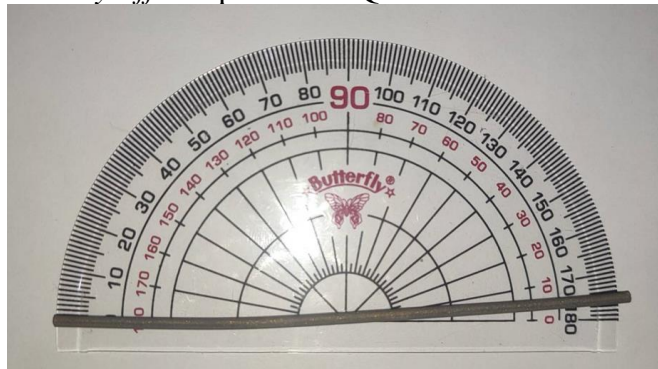
33. Pengujian *Shape Memory Effect* Spesimen DQO11H



34. Pengujian *Shape Memory Effect* Spesimen DQO12H



35. Pengujian *Shape Memory Effect* Spesimen DQO14H



UCAPAN TERIMA KASIH

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

1. Allah SWT atas berkat dan nikmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik.
2. Papa, Mama, dan Della yang selalu memberikan dukungan doa, moril, dan materil untuk penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan baik.
3. Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T., Selaku dosen pembimbing pertama yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis dalam mengerjakan laporan Tugas Akhir.
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. Selaku dosen pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis dalam mengerjakan laporan Tugas Akhir.
5. Bapak Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.(Eng)., Ph.D. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama masa perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
6. Bapak dan Ibu Dosen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS yang telah memberikan ilmu selama masa perkuliahan.
7. Teman-Teman FUNDICHIONCO Ezra, Denby, Riza, Zain, Juki, Nafis, dan Rama selaku partner yang senantiasa menemani perjuangan baik suka maupun duka dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.
8. Departemen Sosial Masyarakat BEM FTIRS ITS SKINCARE 19/20 dan MICIN 20/21 yang sudah menjadi tempat untuk memberikan pengabdian masyarakat serta memberikan momen yang berkesan selama perkuliahan.
9. Pak Chanan, Pak Anto, dan Pak Asman yang telah membantu selama proses pengecoran hingga proses pengujian berlangsung.
10. Mas Sandri, Mas Indra, Mas Yusuf, Mas Zeta, Mba Ilmi, Mas Yudha, Mas Haidar, dan Mas Arfan selaku kakak tingkat yang telah membantu penulis dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.
11. Teman-teman Koncor (Komang, Sabam, Fernanda, Gading, Farhan, dan Didik) yang membantu penulis dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.
12. Teman-teman Laboratorium Metalurgi yang membantu dan menemani penulis selama proses pengerjaan Tugas Akhir di laboratorium.
13. Departemen Eksternal UKM ITS Muaythai Association yang telah memberikan pengalaman berharga dalam berorganisasi serta memberikan momen–momen yang berkesan selama perkuliahan.
14. Teman–teman *Voice Discord* Smansa Praba, Randy, Mustaqim, Satria, Kael dan Hisyam yang memberikan momen dan menemani penulis selama mengerjakan laporan Tugas Akhir.
15. Keluarga besar MT20 yang selalu memberikan doa, dukungan, dan momen untuk penulis dari tahun pertama hingga menyelesaikan Tugas Akhir.
16. MT18, MT19, MT21, dan MT22 yang memberikan banyak pelajaran berharga kepada penulis selama menjalani proses perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS–ITS.
17. Serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu oleh penulis.

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

Surabaya, 13 Juli 2022
Penulis

Ferdy Armansyah

BIODATA PENULIS



Penulis dengan nama Ferdy Armansyah lahir di Tanjung selor, 30 Juli 2000 dari orangtua yang bernama Zulfitri Akhmad dan Imelda Lina. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal yang dimulai dari SDN 001 Balikpapan Selatan di tahun 2006 - 2012. Dilanjutkan di SMP Negeri 1 Balikpapan di tahun 2012 - 2015. Dilanjutkan di SMA Negeri 1 Balikpapan di 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. Selama berkuliah penulis aktif mengikuti pelatihan manajerial dan organisasi yaitu LKMM Pra-TD, LKMW TD, PKTI TD, LKMM TD, LOT 1 dan LOT 2 BEM FTI-ITS. Penulis juga aktif dalam acara kepanitiaan yaitu sebagai ketua pelaksana untuk pelatihan *Social Improvement Training (SING)* BEM

FTIRS, Sekretaris *Red Gathering* BEM FTIRS, Mentor Sinergi Gerigi ITS 2020. Selain itu penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi mahasiswa yaitu staf ITS *Material Advantage Student Chapter*, Wakil Kepala Departemen Kaderisasi LKKI Ash-Haabul Kahfi, Kepala Biro Kolaborator Aksi Departemen Sosial Masyarakat BEM FTIRS ITS. Untuk menyelesaikan pendidikan S-1 penulis melakukan penelitian di bidang Metalurgi Manufaktur (Teknologi Pengecoran dan Perlakuan Panas) dengan tugas akhir yang berjudul "Analisis Pengaruh *Holding Time Annealing* dan *Quenchant Solution Treatment* dengan *Direct Quench* pada Paduan Cu-16,8Zn-6,99Al terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan" Penulis dapat dihubungi melalui email ferdy78@gmail.com dan nomor *handphone* 081520361143