

TUGAS AKHIR – TL184834

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME*
ANNEALING DENGAN METODE *STEP QUENCH*
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PADA
PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al**

EZRA ELKAAR ZAINUDDIN
NRP. 0251184000076

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 VARIASI *HOLDING TIME*
ANNEALING DENGAN METODE *STEP QUENCH*
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PADA
PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al**

EZRA ELKAAR ZAINUDDIN
NRP. 0251184000076

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
VARIATIONS WITH STEP QUENCH METHOD ON
MICROSTRUCTURE AND HARDNESS IN Cu-16,8Zn-
6,99Al ALLOY**

EZRA ELKAAR ZAINUDDIN
NRP. 02511840000076

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 VARIASI *HOLDING TIME ANNEALING* DENGAN METODE *STEP QUENCH* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PADA PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al

TUGAS AKHIR




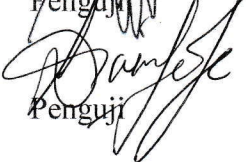
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **EZRA ELKAAR ZAINUDDIN**
NRP. 0251184000076

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.
2. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
3. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
4. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.




Pembimbing

Ko-Pembimbing

Penguji

Penguji

SURABAYA
Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

ANALYSIS THE EFFECT OF HOLDING TIME ANNEALING VARIATIONS WITH STEP QUENCH METHOD ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS IN Cu-16,8Zn-6,99Al ALLOY

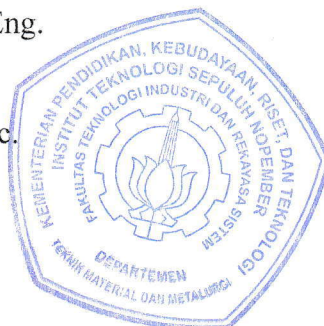
FINAL PROJECT

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

By : **EZRA ELKAAR ZAINUDDIN**
NRP. 02511840000076

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.
2. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
3. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
4. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.



[Signature]
Advisor

[Signature]
Co-Advisor

[Signature]
Examiner

[Signature]
Examiner

SURABAYA
July, 2022

(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS


Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Ezra Elkaar Zainuddin/02511840000076
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 VARIASI *HOLDING TIME ANNEALING* DENGAN METODE *STEP QUENCH* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PADA PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al” 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


(Ezra Elkaar Zainuddin)
NRP. 02511840000076

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

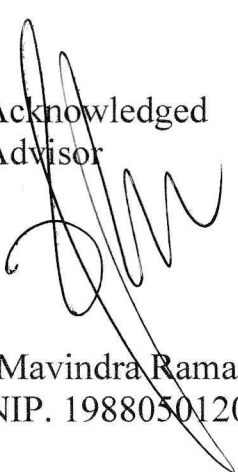
The undersigned below:

Name of student/NRP : Ezra Elkaar Zainuddin/02511840000076
Department : Material and Metallurgical Engineering
FTIRS - 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 VARIATIONS WITH STEP QUENCH METHOD ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS IN Cu-16,8Zn-6,99Al ALLOY” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Acknowledged
Advisor


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

Surabaya, July 13th 2022

Student


(Ezra Elkaar Zainuddin)
NRP. 02511840000076

(This page is intentionally blank)

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME ANNEALING* DENGAN
METODE *STEP QUENCH* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN
PADA PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al**

Nama Mahasiswa / NRP : Ezra Elkaar Zainuddin / 02511840000076
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.
Dosen Ko-Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

Abstrak

Paduan Cu-Zn-Al merupakan paduan berbasis Cu dimana memiliki komposisi unsur Zn 16-30%, Al 4-8%, dan *Cu balance*. Paduan Cu-Zn-Al merupakan alternatif dari paduan Ni-Ti karena memiliki karakteristik yang serupa namun dengan sifat mekanik yang berbeda. Sehingga pada penelitian ini digunakan paduan Cu-Zn-Al untuk melakukan analisis pada *holding time* proses *annealing* dan media pendingin pada *solution treatment* untuk mengetahui struktur mikro dan kekerasan. Perlakuan panas yang diberikan berupa *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment* dengan metode *step quench*. Variasi *holding time* yang digunakan pada proses *annealing* yaitu 1, 2, 3, dan 4 jam; media pendingin yang digunakan pada metode *step quench* adalah air dan oli. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES), *X-Ray Diffraction* (XRD), metalografi, kekerasan, dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Hasil pengujian metalografi didapatkan fasa α , β , γ , dan tidak terbentuk fasa β' (*twinned martensite*). Hal ini terjadi karena temperatur *martensite start* (M_s) berada di temperatur $\sim(-155,826)^\circ\text{C}$. Selain itu, didapatkan pula nilai rata-rata diameter ukuran butir terbesar pada spesimen AN4 sebesar $181,404\ \mu\text{m}$ dan terkecil pada spesimen SQA1 sebesar $103,911\ \mu\text{m}$. Hasil pengujian kekerasan didapatkan nilai kekerasan terbesar pada spesimen SQA1 sebesar $286 \pm 1\ \text{HV}$ dan terkecil pada spesimen AN4 sebesar $240 \pm 4,582\ \text{HV}$. Hal tersebut terjadi karena semakin lama *holding time* perlakuan panas *annealing*, maka semakin besar butir yang terbentuk pada struktur mikro dan semakin kecil nilai kekerasan. Selain itu, hasil yang sama juga akan didapatkan ketika media pendingin pada proses *step quench* memiliki *cooling rate* yang rendah.

Kata Kunci: *Annealing, Paduan Cu-Zn-Al, Media Pendingin, Step Quench.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALYSIS THE EFFECT OF HOLDING TIME ANNEALING VARIATIONS WITH
STEP QUENCH METHOD ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS
IN Cu-16,8Zn-6,99Al ALLOY**

Student Name / NRP : Ezra Elkaar Zainuddin / 02511840000076
Department : Material and Metallurgical Engineering FTIRS - ITS
Advisor : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.
Co-Advisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

Abstract

The Cu-Zn-Al alloy is a Cu-based alloy which has an elemental composition of 16-30% Zn, 4-8% Al, and Cu balance. Cu-Zn-Al alloy is an alternative to Ni-Ti alloy because it has similar characteristics but different mechanical properties. So in this study, Cu-Zn-Al alloy was used to analyze the holding time of the annealing process and the cooling medium in the solution treatment to determine the microstructure and hardness. Heat treatment is given in the form of homogenizing, annealing, and solution treatment with the step quench method. Variations of holding time used in the annealing process are 1, 2, 3, and 4 hours; The cooling medium used in the step quench method is water and oil. The tests carried out in this study were Optical Emission Spectroscopy (OES), X-Ray Diffraction (XRD), metallography, hardness, and Differential Scanning Calorimetry (DSC). The metallographic test results obtained α , β , γ phases, and no γ' (twinned martensite) phase was formed. This happens because the martensite start temperature (M_s) is at a temperature of $\sim(-155.826)^\circ\text{C}$. In addition, the average diameter of the largest grain size in the AN4 specimen was $181.404\ \mu\text{m}$ and the smallest in the SQA1 specimen was $103.911\ \mu\text{m}$. The results of the hardness test showed that the highest hardness value for the SQA1 specimen was $286 \pm 1\ \text{HV}$ and the smallest for the AN4 specimen was $240 \pm 4.582\ \text{HV}$. This happens because the longer the holding time of the annealing heat treatment, the larger the grains formed in the microstructure and the smaller the hardness value. In addition, the same results will also be obtained when the cooling medium in the step quench process has a low cooling rate.

Keywords: *Annealing, Cu-Zn-Al Alloy, Step Quench, Quenchant Media.*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta kesehatan kepada Penulis, sehingga dapat menyelesaikan penyusunan Proposal Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME ANNEALING* DENGAN METODE *STEP QUENCH* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PADA PADUAN Cu-16,8Zn-6,99Al”. Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember (FTIRS - ITS) Surabaya.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan bantuan kepada Penulis, sehingga proposal Tugas Akhir dapat diselesaikan tepat waktu, diantaranya :

1. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS.
2. Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir Penulis yang telah membimbing dengan sabar, memberikan masukan dan saran mengenai proses penelitian yang membangun kepada Penulis.
3. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir Penulis yang telah membimbing penulisan proposal laporan Tugas Akhir dan memberi masukan dan saran kepada Penulis demi kelancaran pengerjaan Tugas Akhir Penulis.
4. Bapak Asman selaku tendik Laboratorium Metalurgi yang telah membimbing dan menemani Penulis selama proses pengerjaan penelitian di laboratorium, sehingga dapat berjalan lancar dan terhindar dari bahaya.

Penulis menyadari dengan keterbatasan ilmu dan wawasan, laporan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca proposal Tugas Akhir agar karya berikutnya bisa menjadi lebih baik. Harapan Penulis untuk proposal ini dapat bermanfaat dan digunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 13 Juli 2022
Penulis

Ezra Elkaar Zainuddin

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

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 Paduan Cu-Zn-Al	3
2.2 Diagram Fasa Cu-Zn-Al	4
2.3 Perlakuan Panas	7
2.3.1 <i>Homogenizing</i>	7
2.3.2 <i>Annealing</i>	8
2.3.3 <i>Solution Treatment</i>	8
2.3.4 <i>Quenching</i>	8
2.4 Pengujian	9
2.4.1 Pengujian <i>Optical Emission Spectroscopy</i> (OES)	9
2.4.2 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	9
2.4.3 Pengujian Metalografi	10
2.4.4 Pengujian Kekerasan	10
2.4.5 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC)	11
2.5 Penelitian Sebelumnya	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Diagram Alir	17
3.2 Alat Penelitian	18
3.3 Bahan Penelitian	21
3.4 Kurva Variabel Penelitian	21
3.5 Prosedur Penelitian	22
3.5.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Homogenizing</i>	22
3.5.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Annealing</i>	22
3.5.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Solution Heat Treatment</i>	22
3.6 Pengujian	23
3.6.1 Pengujian <i>Optical Emission Spectroscopy</i> (OES)	23
3.6.2 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	23
3.6.3 Pengujian Metalografi	23
3.6.4 Pengujian Kekerasan	23
3.6.5 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC)	23
3.7 Rancangan Penelitian	24
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Hasil Pengujian <i>Optical Emission Spectroscopy</i> (OES)	25
4.2 Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	25
4.3 Hasil Pengujian Metalografi	27
4.4 Hasil Pengujian Kekerasan	32
4.5 Hasil Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC)	34

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	37
5.1 Kesimpulan	37
5.2 Saran.....	37
DAFTAR PUSTAKA.....	39
LAMPIRAN.....	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Grafik Komposisi dan Temperatur M_s pada Cu-Zn-Al <i>Shape Memory Alloy</i>	5
Gambar 2.2	Penambahan Unsur Al pada Paduan Cu-Zn Sebesar a) 1 wt% Al b) 2 wt% Al	6
Gambar 2.3	Diagram Fasa Ternary Paduan Cu-Zn-Al Dalam Kondisi a) <i>Liquid</i> pada Temperatur 550°C	6
Gambar 2.4	Diagram Fasa Ternary Paduan Cu-Zn-Al Dalam Kondisi <i>Isothermal</i> pada Temperatur 550°C	7
Gambar 2.5	Difraksi Bragg oleh Bidang Kristal	10
Gambar 2.7	Metode Vickers Indentor <i>Diamond Pyramid</i>	11
Gambar 2.6	Kurva Termogram Pengujian DSC pada Material Paduan Nitinol	12
Gambar 2.8	Hasil Pengujian SEM pada <i>Refined Alloy</i>	13
Gambar 2.9	Hasil Pengujian SEM pada Paduan Cu-Zn-Al <i>Unmodified</i>	13
Gambar 2.10	Hasil Pengujian Metalografi Spesimen Temperatur <i>Annealing</i> Cu-Zn-Al <i>Shape Memory Alloys</i> a) 425°C b) 500°C c) 600°C Perbesaran 100x	14
Gambar 2.11	Hasil Pengujian SEM pada a) Cu-25Zn-4Al b) Cu-30Zn-4Al	14
Gambar 2.12	Struktur Mikro Cu-Zn-Al Setelah <i>Step Quench</i> Oli	15
Gambar 3.1	Diagram Alir	18
Gambar 3.2	Gerinda Tangan	19
Gambar 3.4	<i>High Temperature Furnace</i>	19
Gambar 3.5	Alat Uji Kekerasan	20
Gambar 3.6	Mikroskop Optik	20
Gambar 3.7	Paduan Cu-Zn-Al Hasil Pengecoran.....	21
Gambar 3.8	Kurva Variabel Penelitian	22
Gambar 4.1	Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan Metode <i>Step Quench</i> Media Pendingin Air.....	25
Gambar 4.2	Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan Metode <i>Step Quench</i> Media Pendingin Oli.....	26
Gambar 4.3	Hasil Pengujian Metalografi Spesimen <i>As Cast</i> dengan Perbesaran 100x Menggunakan Etsa $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	28
Gambar 4.4	Hasil Pengujian Metalografi Spesimen <i>Annealing</i> : a) AN1, b) AN2, dan c) AN4	29
Gambar 4.5	Hasil Pengujian Metalografi Spesimen <i>Solution Treatment</i> Diikuti <i>Step Quench</i> dengan Media Pendingin Air: a) SQA1, b) SQA2, dan c) SQA4 dengan Perbesaran 100x Menggunakan Etsa $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	30
Gambar 4.6	Hasil Pengujian Metalografi Spesimen <i>Solution Treatment</i> Diikuti <i>Step Quench</i> dengan Media Pendingin Oli: a) SQO1, b) SQO2, dan c) SQO4 dengan Perbesaran 100x Menggunakan Etsa $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	31
Gambar 4.7	Grafik Hasil Pengujian Kekerasan	33
Gambar 4.8	Hasil Pengujian DSC Spesimen SQO4	34

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi Paduan Cu-Zn-Al	3
Tabel 2.2	Sifat-Sifat Paduan Cu-Zn-Al	3
Tabel 2.3	Kelebihan dan Kekurangan Cu-Zn-Al dan Ni-Ti.....	4
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian	24
Tabel 4.1	Hasil Pengujian OES	25
Tabel 4.2	Hasil Perhitungan Ukuran Diameter Butir	32
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Kekerasan.....	32
Tabel 4.4	Temperatur Transformasi Spesimen SQO4.....	35

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berjalannya waktu, perkembangan teknologi juga terus berjalan pesat di seluruh dunia dimana hal tersebut terjadi dikarenakan tantangan dan beragamnya masalah yang terjadi yang selalu dihadapi untuk memenuhi kebutuhan manusia di berbagai lini kehidupan. Salah satu perkembangan yang terjadi tersebut adalah perkembangan material. Material yang terus berkembang dan berinovasi adalah kunci untuk menjawab tantangan yang dialami oleh manusia di berbagai bidang seperti di bidang otomotif, *aerospace*, konstruksi bangunan, dan lain sebagainya. Material paduan merupakan material yang terus dapat dikembangkan disebabkan komposisi pada paduan yang dapat diubah-ubah dapat menghasilkan hasil material paduan yang baru dan bermacam-macam dengan keunikan sifatnya untuk aplikasi pada bidang yang dapat disesuaikan sebagai contohnya adalah paduan Cu-Zn-Al. Paduan ini biasa digunakan sebagai *shape memory alloy* yaitu paduan *Cu based alloy* yaitu Cu-Zn-Al dan paduan Ni-Ti. Komposisi paduan Cu-Zn-Al dan Ni-Ti disesuaikan berdasarkan standar *ASM Handbook Volume 2* dimana untuk paduan Cu-Zn-Al yaitu Zn 16-30%, Al 4-8%, dan Cu *balance* (Nunes, Adams, & et all, 1990).

Salah satu contoh aplikasi pada paduan Cu-Zn-Al yaitu solder temperatur tinggi dimana pengaplikasian paduan Cu-Zn-Al diterapkan pada interkoneksi yang berada pada solder. Solder temperatur tinggi diharuskan memiliki kemampuan untuk tetap dalam bentuk dan tidak mengalami leleh pada temperatur operasi yaitu 254-350°C. Paduan yang berbasis unsur Zn merupakan pilihan yang tepat dimana paduan Zn memiliki kekuatan tarik, *creep resistance*, stabilitas dimensional, dan ketahanan korosi apabila ditambahkan unsur Al dan Cu. Paduan Cu-Zn-Al pada aplikasi solder temperatur tinggi memiliki sifat mekanik superior dibandingkan dengan paduan Bi-Ag dan Au-Sn dimana paduan Cu-Zn-Al memiliki nilai elongasi yang tinggi dan nilai kekerasan meningkat seiring penambahan unsur Al (Kim et al., 2008).

Pada tahun 2020, Rizki melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur untuk proses *annealing* dan media pendingin pada proses *heat treatment* Cu-Zn-Al *shape memory alloy* terhadap struktur mikro dan kekerasan dengan paduan Cu-21Zn-5Al. Hasil didapat bahwa semakin tinggi temperatur *annealing* maka semakin rendah nilai kekerasan yang dimiliki yang berpengaruh pada proses kristalisasi yang terjadi. Pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh *holding time* pada proses *annealing* dengan metode *step quench* pada *solution treatment* yang kemudian dilakukan pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES), *X-Ray Diffraction* (XRD), metalografi, kekerasan, dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC).

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi *holding time* pada proses *annealing* pada material paduan Cu-Zn-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan.
2. Bagaimana pengaruh metode *step quench* pada proses *solution treatment* pada material paduan Cu-Zn-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Produk hasil pengecoran dianggap dalam kondisi homogen, bebas cacat, dan memiliki komposisi kimia yang sesuai dengan *ASM Handbook Volume 2*.
2. Pengaruh lingkungan terhadap proses perlakuan panas diabaikan.
3. Indikator pada *furnace* dianggap sesuai.

4. Waktu pengeluaran spesimen saat perlakuan panas dianggap sama.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi *holding time* proses *annealing* pada material paduan Cu-Zn-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan.
2. Menganalisis pengaruh metode *step quench* pada proses *solution treatment* pada paduan Cu-Zn-Al terhadap struktur mikro dan kekerasan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian adalah menghasilkan data pada variasi waktu tahan temperatur proses *annealing* yang menggunakan metode *step quench* pada *solution treatment* terhadap struktur mikro dan kekerasan pada paduan Cu-Zn-Al. Harapannya hasil dari penelitian ini dapat diaplikasikan untuk bidang industri elektronik dan menjadi pengembangan penelitian di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Paduan Cu-Zn-Al

Paduan Cu-Zn-Al merupakan material paduan *ternary* pertama yang dilakukan pengujian dibawah tekanan yang berbeda-beda, dimodel dengan persamaan konstitutif, dan diuji dengan kelelahan (*fatigue*). Dikarenakan penggunaan paduan Ni-Ti yang paling sering digunakan sebelumnya, maka aplikasi paduan *ternary* Cu-Zn-Al dapat dijadikan sebagai material untuk berbagai aplikasi dengan harga yang *affordable*, karakteristik redaman yang baik, dan fungsi pada aplikasi bekerja dengan baik. Sebagai contoh transformasi *low stress* untuk superelastis yang berhubungan dengan *slip stress* pada paduan Cu-Zn-Al menjadikannya material unik dan berpeluang untuk dapat diaplikasikan pada bidang teknik (Alkan et al., 2018). Paduan Cu-Zn-Al memiliki rentang temperatur transformasi yang dapat dilihat di Tabel 2.1 tergantung dengan komposisi paduan yang terkandung dan perlakuan termomekanik yang diterapkan. Paduan Cu-Zn-Al merupakan material *Shape Memory Alloy* (SMA) dimana suatu material logam berbentuk paduan yang memiliki kemampuan untuk dapat kembali ke suatu bentuk atau ukuran dengan diperlakukan prosedur perlakuan panas yang sesuai. Paduan SMA memiliki sifat *shape memory effect* dimana paduan dapat pulih dari sejumlah regangan atau dapat menghasilkan kekuatan pada perubahan bentuk. Paduan Cu-Zn-Al memiliki komposisi khusus untuk mendapatkan sifat *shape memory effect* seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi Paduan Cu-Zn-Al (Nunes, Adams, & et all, 1990)

Unsur	Komposisi (%)
Cu (Tembaga)	65-80
Zn (Seng)	15-30
Al (Alumunium)	5-10

Paduan dengan *copper-base* dapat dilakukan *hot worked* di udara ruang. Paduan Cu-Zn-Al dengan kandungan aluminium rendah yaitu <6 wt% dapat dilakukan *cold finishing* dengan *interpass annealing*. Sebaliknya, apabila kandungan aluminium tinggi maka pengerjaan dingin tidak mudah dilakukan (Nunes, Adams, & et all, 1990). Sifat paduan Cu-Zn-Al ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat-Sifat Paduan Cu-Zn-Al (Nunes, Adams, & et all, 1990)

Sifat	Nilai
Temperatur Transformasi (°C)	-180°C-200
Temperatur Leleh (°C)	950-1020
Densitas (g/cm ³)	7.64
Resistivitas (μΩ cm)	8.5-9.7
Konduktivitas Termal (W/m.°C)	120
Kapasitas Panas (J/kg. °C)	400
<i>Modulus Young</i> (GPa)	70 (Fasa Martensit) dan 72 (Fasa β)
<i>Yield Strength</i> (MPa)	80 (Fasa Martensit) dan 350 (Fasa β)
<i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa)	600
Temperatur Transformasi (°C)	<120
<i>Recoverable Strain</i> (%)	4
<i>Hysteresis</i> (°C)	15-25

Pada material SMA seperti Cu-Zn-Al dan Ni-Ti memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri. Berikut ini kelebihan dan kekurangan pada material SMA Cu-Zn-Al dan Ni-Ti pada Tabel 2.3.

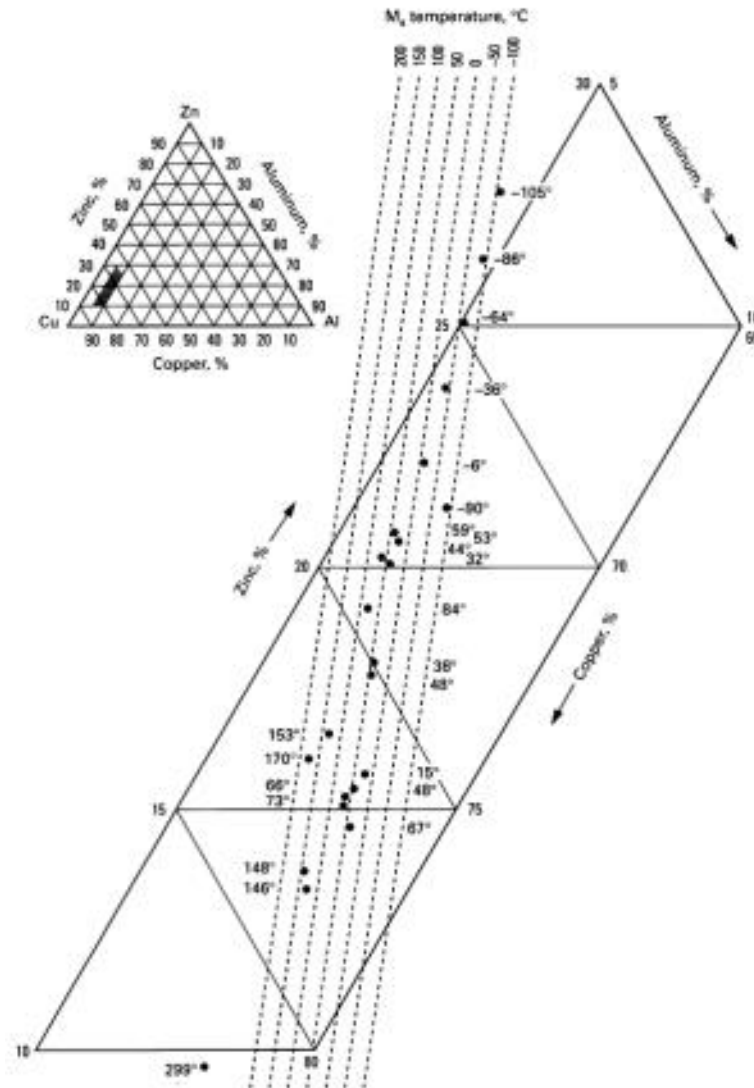
Tabel 2.3 Kelebihan dan Kekurangan Cu-Zn-Al dan Ni-Ti (Longauer et al., n.d.)(Mehrpuoya & Bidsorkhi, 2017)

Material	Kelebihan	Kekurangan
Cu-Zn-Al	<ol style="list-style-type: none"> 1. Harga relatif rendah 2. Proses manufaktur yang mudah dan hemat 3. Aplikasi yang luas di berbagai bidang 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sulit mengontrol komposisi kimia secara presisi 2. Ketahanan lelah (<i>fatigue</i>) yang rendah
Ni-Ti	<ol style="list-style-type: none"> 1. Performa mekanik yang baik 2. <i>Wear resistance</i> yang baik 3. Ketahanan korosi dan kimia yang baik 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Harga material yang mahal 2. Proses manufaktur yang lambat 3. Efisiensi energi yang rendah

Aplikasi paduan SMA diterapkan pada bidang teknik dan rekayasa seperti aplikasi industri, struktur mesin dan komposit, *aerospace*, aktuator pada sistem mekanik, dan *biomedical*. Walaupun paduan SMA yang berbasis besi atau tembaga memiliki biaya rendah dan tersedia di pasar, dan kemampuan *thermo-mechanic* yang buruk, paduan berbasis Ni-Ti lebih direkomendasikan dalam segala aplikasi. Setiap material paduan memiliki kelebihan masing-masing tergantung pada kebutuhan dan aplikasi yang akan diterapkan (Mohd Jani et al., 2014).

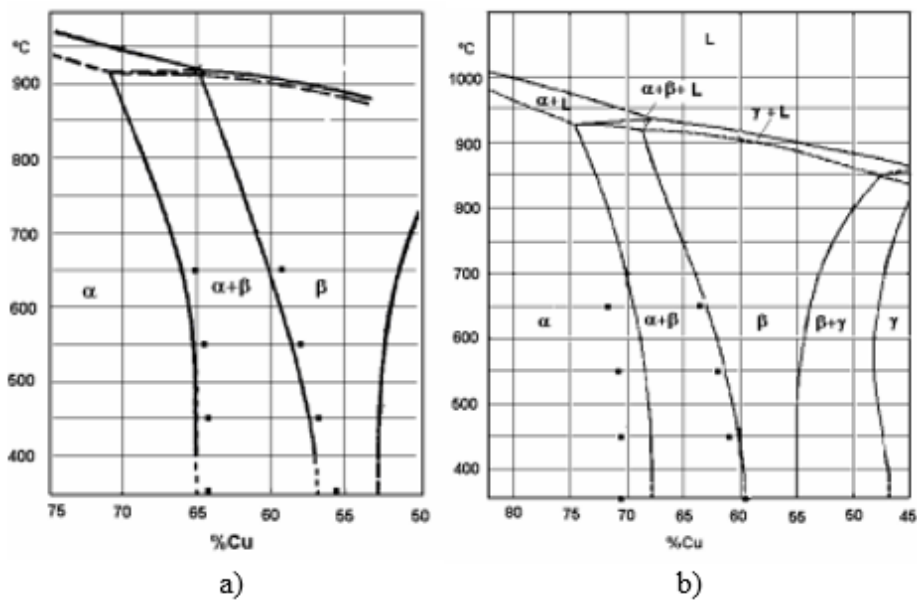
2.2 Diagram Fasa Cu-Zn-Al

Paduan Cu-Zn-Al memiliki 3 fasa yaitu fasa α , β , dan γ dimana tiap fasa tersebut memiliki karakteristik yang berbeda. Titik temperatur M_s dan komposisi Cu-Zn-Al *shape memory alloy* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



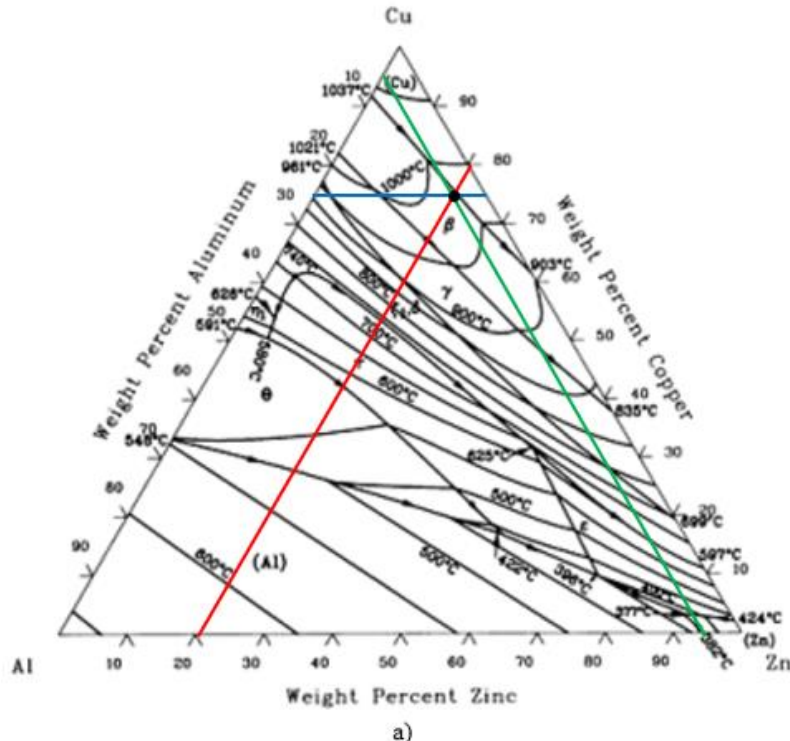
Gambar 2.1 Grafik Komposisi dan Temperatur M_s pada Cu-Zn-Al *Shape Memory Alloy* (Nunes, Adams, & et all, 1990)

Pada diagram Cu-Zn dengan penambahan Al terjadi pergeseran garis *solvus* antara α dan $\alpha+\beta$ semakin ke kiri, semakin jelasnya garis kelarutan tembaga di fasa α . Kemudian pengaruh lain pada penambahan Al yaitu terdapat sifat kekuatan dan elongasi pada paduan Cu-Zn, terjadinya pembentukan fasa β dan fasa γ , dan terjadinya peningkatan kekerasan secara signifikan dengan terbentuknya fasa β dan γ seiring meningkatnya penambahan Al. Berikut ini adalah Gambar 2.2.

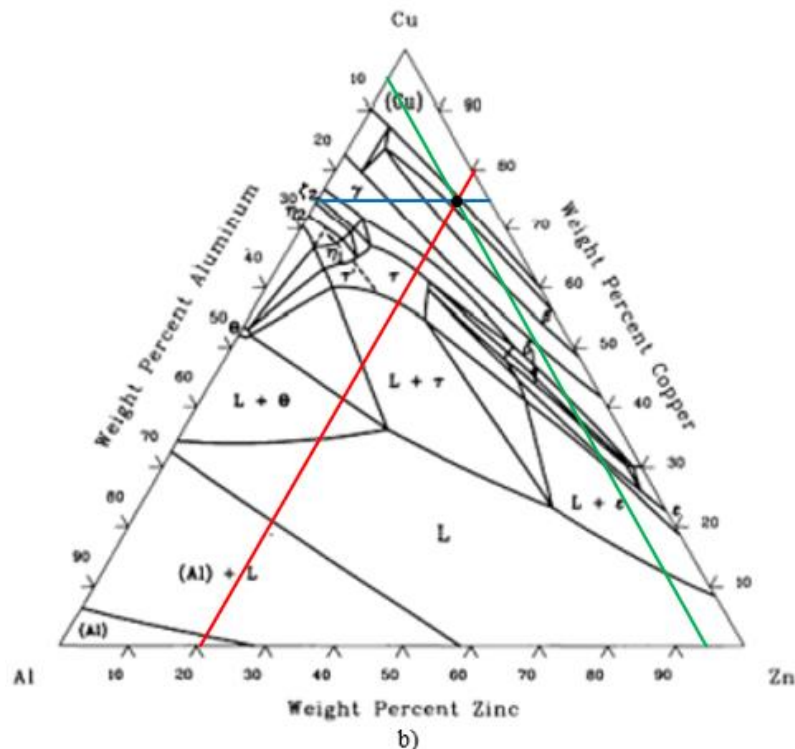


Gambar 2.2 Penambahan Unsur Al pada Paduan Cu-Zn Sebesar a) 1 wt% Al b) 2 wt% Al (Vilarinho et al., 2003)

Diagram fasa ternary paduan Cu-Zn-Al terdapat dalam berbagai bentuk yaitu *liquid* dan *isothermal* pada temperatur 200°C, 350°C, 550°C, dan 700°C. Berikut ini adalah diagram fasa ternary paduan Cu-Zn-Al dalam kondisi *liquid* dan *isothermal* pada temperatur 550°C yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4.



Gambar 2.3 Diagram Fasa Ternary Paduan Cu-Zn-Al Dalam Kondisi a) *Liquid* pada Temperatur 550°C (International, 1992)



Gambar 2.4 Diagram Fasa Ternary Paduan Cu-Zn-Al Dalam Kondisi *Isothermal* pada Temperatur 550°C (International, 1992)

2.3 Perlakuan Panas

Perlakuan panas adalah suatu proses kombinasi antara proses pemanasan dan pendinginan, waktu, dan aplikasi yang digunakan pada material logam atau paduan dalam keadaan padat untuk mendapatkan sifat yang diinginkan. Proses perlakuan panas secara dasar dapat terbilang merupakan suatu proses transformasi atau dekomposisi austenit dimana proses transformasi tersebut dapat menghasilkan sifat fisik dan mekanik yang diinginkan. Perlakuan panas diawali dengan memanaskan material pada temperatur tertentu sampai di dalam atau di atas *critical range* untuk membentuk fasa austenit secara menyeluruh (Avner, n.d.-a). Pada penelitian ini, perlakuan panas yang akan digunakan adalah *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment*.

2.3.1 Homogenizing

Homogenizing adalah suatu proses yang menggunakan temperatur tinggi untuk mengurangi segregasi kimiawi atau metalurgi yang biasa disebut pengecoran dimana biasa muncul saat proses solidifikasi. *Homogenizing* digunakan pada paduan tembaga untuk meningkatkan keuletan pada *cast billets* untuk *mill processing* dan juga diaplikasikan untuk pengecoran untuk mendapatkan kekerasan, keuletan, dan ketangguhan yang dibutuhkan. Homogenisasi dapat merubah sifat mekanikal seperti kekuatan tarik maksimum, kekerasan, dan kekuatan luluh perlahan menurun dimana perpanjangan (*elongation*) pada *fracture* dan *necking* meningkat dua kali lipat dari nilai awal. Perlakuan ini membutuhkan waktu dari 3 sampai 10 jam di atas *range annealing*, ke dalam 50°C dari temperatur solidus (ASM Handbook Volume 4 Heat Treating, 1991).

2.3.2 Annealing

Annealing adalah suatu proses pada perlakuan panas yang dapat melunakan dan meningkatkan keuletan serta ketangguhan pada material logam dan paduan. *Annealing* diaplikasikan pada produk tempa seperti pada proses *milling* dan pengecoran. Proses yang dilakukan pada *annealing* yaitu memanaskan material, menahan selama waktu tertentu, dan mendinginkannya. Faktor yang mempengaruhi hasil setelah proses *annealing* yaitu laju pemanasan, temperatur, *holding time*, keadaan sekitar (atmosfer), dan laju pendinginan (ASM Handbook Volume 4 Heat Treating, 1991). Waktu pada proses *annealing* merupakan hal yang penting karena dibutuhkan waktu yang cukup lama agar reaksi transformasi dapat terjadi pada material paduan serta temperatur *annealing* yang dapat mempercepat proses dengan menaikkan temperatur dimana proses difusi biasa terjadi (Callister & David Rethwisch, n.d.).

Proses *annealing* yang terjadi pada material mengakibatkan pelepasan regangan kisi internal, kekuatan menurun ketika keuletan meningkat. Pada proses *annealing* terjadi tiga proses yaitu *recovery*, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir. *Recovery* mengalami penyusunan kembali *internal defect* ke dalam konfigurasi energi lebih rendah dimana terjadi pengurangan tegangan sisa selama *recovery* berlangsung untuk meminimalisir distorsi. Rekristalisasi adalah nukleasi dan pertumbuhan *strain-free grains* dari matriks logam *cold-worked*. Rekristalisasi menghilangkan semua sifat mekanik pada material hasil *cold-work* dan menghasilkan perubahan drastis terhadap sifat mekanik seperti kekerasan, persentase elongasi, dan kekuatan tarik. Pertumbuhan butir yaitu pertumbuhan beberapa butir rekristalisasi karena ukuran butiran halus merupakan kombinasi yang baik dari kekuatan dan keuletan (International, 2015).

2.3.3 Solution Treatment

Solution treatment merupakan salah satu metode perlakuan panas untuk melakukan proses *precipitation hardening*. *Solution treatment* adalah suatu proses untuk melarutkan semua atom untuk membentuk fasa padat yang tunggal (Callister & David Rethwisch, n.d.). Temperatur pada *solution treatment* berpengaruh pada hasil butir pada struktur mikro. Semakin tinggi temperturnya akan menghasilkan beberapa pertumbuhan butir dan lebih luas dalam melarutkan karbida. Semakin rendah temperturnya akan melarutkan fasa *aging* utama tanpa pertumbuhan butir atau larutan karbida. *Solution treatment* memiliki objektif untuk menempatkan material dalam fasa *hardening* menjadi larutan dan melarutkan beberapa karbida (ASM Handbook Volume 4 Heat Treating, 1991). Temperatur terbaik untuk melakukan proses *solution treatment* yaitu temperatur di atas garis *solvus*. Kemudian proses *solution treatment* harus dilakukan dengan baik jika *solution treatment* dilakukan secara cepat atau dengan waktu singkat maka semua unsur paduan tidak terlarut dan tidak terjadi *precipitation hardening*. Apabila terlalu lama proses *solution treatment* maka penggunaan energi untuk proses tersebut terlalu banyak (Mohamed & Samuel, 2012).

2.3.4 Quenching

Proses *quenching* merupakan tahap yang penting pada perlakuan panas dimana proses ini berfungsi untuk menjaga elemen *hardening* pada larutan dengan secara bersamaan untuk meminimalisir *residual stress quenching* yang disebabkan oleh lengkungan dan distorsi serta untuk mendapatkan fasa akhir yang diinginkan berdasarkan laju pendinginannya (International, 2015). Pada paduan Cu-Zn-Al dapat terjadi stabilisasi martensit apabila dilakukan pendinginan cepat. Stabilisasi martensit dapat menyebabkan transformasi reversibel yang bergeser ke temperatur lebih tinggi dimana efek tersebut memperlambat terjadinya *shape recovery*. Maka dari itu pendinginan lambat atau *step quenching* dengan *aging* menengah di fasa *parent-β* dapat dilakukan (Nunes, Adams, & et all, 1990). Stabilisasi martensit sangat berpengaruh pada sifat

fungsional karena perubahan temperatur transformasi dimana terjadi kenaikan temperatur M_s (Kadletz et al., 2015).

2.4 Pengujian

Pengujian yang digunakan pada penelitian ini yaitu pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES), pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), pengujian metalografi, pengujian kekerasan, dan pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Berikut ini adalah penjelasan lebih lanjut.

2.4.1 Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES) adalah pengujian ini menggunakan radiasi elektromagnetik yang dapat diserap oleh atom spesimen. Pengujian OES memiliki berbagai macam yaitu *spark OES*, *Inductively Coupled Plasma* (ICP)-OES, *Direct Current Plasma* (DCP), *Microwave Plasma* (MP), *Microwave-induced Plasma* (MIP), *Microwave Plasma Torch* (MPT), *Glow Discharge* (GD), dan *Laser-induced Plasma* (LIP). Metode *Spark OES* memiliki tujuan untuk menganalisis komposisi kimia dengan cepat dan presisi dari spesimen logam seperti paduan logam.

Prinsip kerja dari *Spark OES* yaitu penggunaan *electric discharge* yang bersumber dari elektroda bertegangan tinggi untuk melakukan eksitasi atau menaikkan energi spesimen dari keadaan dasarnya. *Electrical discharge* yang terjadi di antara spesimen dan elektroda menyebabkan permukaan material mengalami pemanasan dan menguap. Atom material yang tereksitasi akan mengeluarkan garis emisi di tiap unsur yang terkandung kemudian dapat diketahui konsentrasi unsur di dalam spesimen melalui intensitas cahaya yang diemisikan oleh spesimen dari keadaan energi yang tinggi ke keadaan energi yang lebih rendah sehingga menghasilkan cahaya (*Buku Karakterisasi Material 2020 (1)*, n.d.).

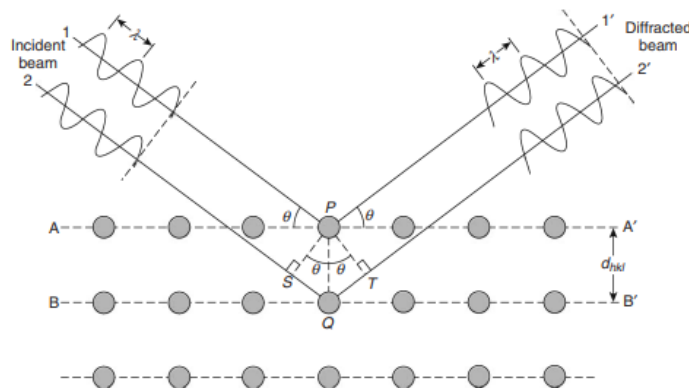
2.4.2 Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan salah satu pengujian yang efektif dengan bertujuan untuk menganalisis struktur kristal pada material. Metode difraksi pada pengujian XRD dapat mengidentifikasi komponen kimia dari struktur kristal dimana komponen atau fasa yang berbeda dengan komposisi yang sama dapat ditemukan. Pengujian XRD memiliki dua metode yaitu *spectroscopic* dan *photographic*. Metode XRD berbasis fenomena gelombang *interferences* dimana dua gelombang ringan dengan panjang gelombang yang sama dan ditembak ke arah yang sama dapat memperkuat atau menolak satu sama lain bergantung pada perbedaan fasa yang ada. Ketika material memiliki perbedaan fasa $n\lambda$ disebut dengan *inphase* (konstruktif interferensi muncul). Ketika material memiliki perbedaan fasa $n\lambda/2$ disebut dengan “diluar fasa” secara keseluruhan *destructive interference* muncul.

Sinar *x-ray* terjadi pada padatan kristal akan terdifraksi oleh bidang kristalin dimana dua gelombang *inphase*, sinar 1, dan sinar 2 terdefleksi oleh dua bidang kristal (A dan B). Gelombang yang terdefleksi tidak akan menjadi *inphase* kecuali hubungan berikut terjadi.

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

Persamaan diatas merupakan hukum dasar difraksi yang disebut dengan hukum Bragg. Hukum Bragg dapat menghitung perbedaan jalur antara dua sinar seperti pada Gambar 2.8. Perbedaan jalur bergantung pada *incident angle* (β) dan jarak antara bidang kristal paralel (d). Berikut ini adalah Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Difraksi Bragg oleh Bidang Kristal (Werner, 2013)

2.4.3 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi adalah metode untuk melakukan pengujian dan menghasilkan konstitusi dan struktur yang ada di bawah penyusun di dalam logam, paduan, dan material. Pengujian pada struktur material dapat dilakukan dengan skala yang luas atau tingkat perbesaran, pengujian dengan *range* dari visual atau perbesaran yang rendah ($\sim 20\times$) sampai perbesaran sampai $1,000,000\times$ dengan mikroskop elektron. Proses pengujian metalografi juga merupakan salah satu pengujian *destructive* atau pengujian merusak dimana material mengalami kehilangan bagian saat dilakukan proses preparasi spesimen pengujianya. Pengujian metalografi dapat dilakukan dengan tahapan berikut (*Publication Information and Contributors*, n.d.).

1. *Sectioning* adalah salah satu langkah preparasi spesimen dengan cara mengurangi ukuran spesimen dari ukuran yang besar menjadi lebih kecil.
2. *Mounting* adalah suatu proses untuk mempermudah memegang material tertentu dalam proses berikutnya. Proses ini dilakukan dengan cara spesimen dicetak di dalam material polimer atau dijepit dengan alat mekanikal. Dalam beberapa hal, material dengan ukuran besar tidak perlu dilakukan *mounting*.
3. *Grinding* adalah proses yang menggunakan kecepatan permukaan yang tinggi dengan melibatkan panas yang signifikan pada permukaan material dan proses ini menggunakan kertas abrasif untuk mengurangi material serta meningkatkan kualitas permukaan material akhir.
4. *Polishing* adalah proses yang menggunakan partikel abrasif berbentuk pasta dengan mengusapnya dengan kain yang bertujuan untuk menghilangkan lapisan permukaan yang mengalami *abrasion-damaged*.
5. *Etching* adalah suatu proses yang utama di metode metalografi dimana proses ini bertujuan untuk mengekspos struktur mikro material di bawah mikroskop optik. Proses ini menggunakan cairan tertentu yang berbeda-beda untuk tiap material yang diuji dimana tujuan tersebut secara umum untuk menyerang konstituen pada unsur material di permukaan spesimen yang ingin diuji.
6. *Examination* adalah proses terakhir dimana bertujuan untuk menganalisis struktur mikro yang ada di material di bawah mikroskop optik

2.4.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan ini bertujuan untuk mengukur nilai kekerasan pada spesimen dengan daerah indentasi pilihan yang kecil. Pada penelitian ini menggunakan pengujian kekerasan dengan metode Vickers. Metode Vickers menggunakan indentor *diamond pyramid* dimana indentor *diamond* yang sangat kecil dengan bentuk piramida akan memberikan gaya kepada

permukaan spesimen. Metode Vickers menggunakan standarisasi ASTM E92-17 dan KHN serta VHN untuk menunjukkan nilai kekerasan (Callister & David Rethwisch, n.d.).

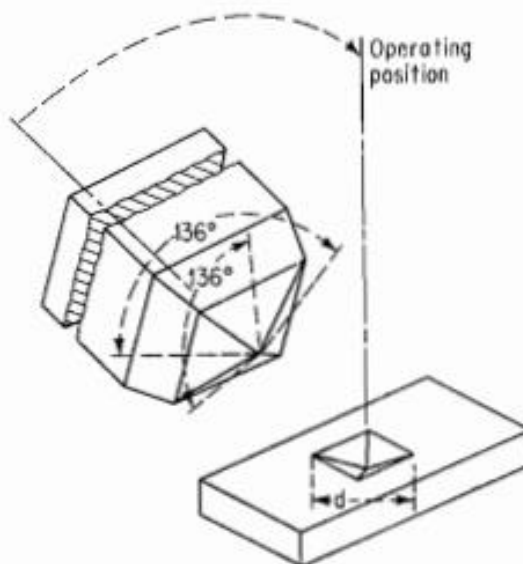
Pada metode Vickers instrumen atau indenter yang digunakan berbentuk *square-based diamond pyramid* dengan sudut 136° di antara sisi yang berlawanan, cocok untuk mengukur kekerasan pada material berbentuk lembaran tipis. Beban yang diberikan oleh indenter ke permukaan material sebesar 1 sampai 120 kg. Alat pengujian metode Vickers menunjukkan nilai beban dan area yang diberi indentasi serta hasil pada permukaan berbentuk kotak. Panjang diagonal pada persegi diukur menggunakan mikroskop dengan pisau ujung yang bergerak. Pada Gambar 2.6 di bawah ini adalah ilustrasi pengujian kekerasan metode Vickers dengan indenter *diamond pyramid*. Terdapat tabel konversi untuk mengkonversi ukuran diagonal ke nilai kekerasan piramida Vickers (HV) dengan persamaan berikut:

$$HV = \frac{1.854L}{d^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

L = beban tekan (kg)

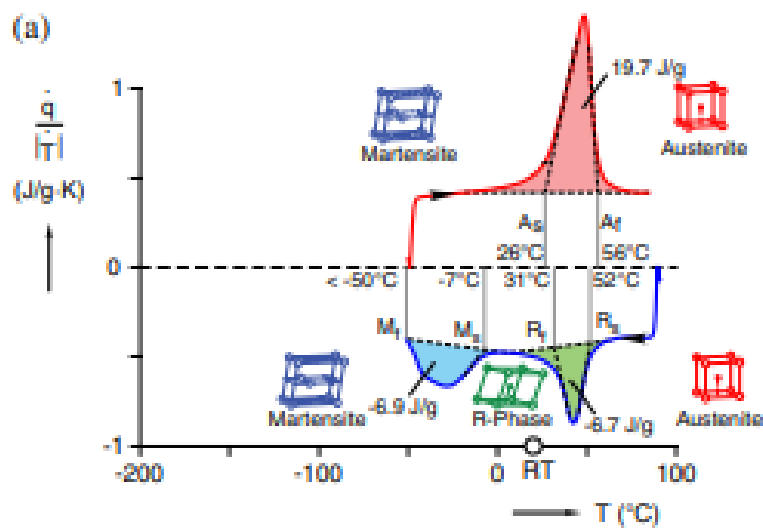
d = panjang diagonal pada sisi persegi (mm)



Gambar 2.6 Metode Vickers Indenter *Diamond Pyramid* (Avner, n.d.-a)

2.4.5 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) merupakan pengujian untuk mendapatkan nilai kapasitas panas serta entalpi yang terjadi pada spesimen. Material yang dapat diuji seperti material logam, paduan, dan keramik. Pengujian DSC dapat mengidentifikasi titik awal dan akhir pada temperatur A_s dan A_f saat pemanasan dan temperatur M_s dan M_f saat pendinginan. Identifikasi hasil pengujian DSC dapat dilihat pada Gambar 2.6.



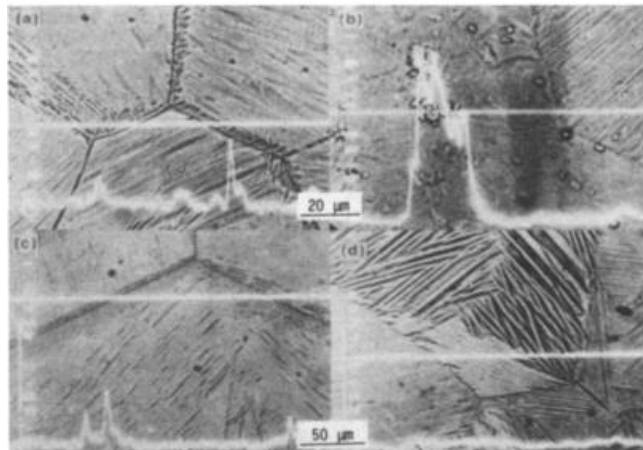
Gambar 2.7 Kurva Termogram Pengujian DSC pada Material Paduan Nitinol (Shaw et al., 2008)

Hasil pada Gambar 2.6 menunjukkan dimana puncak atas dan puncak bawah pada termogram muncul dikarenakan adanya transformasi panas laten endotermik (positif) dan eksotermik (negatif). Puncak yang terjadi berbentuk seperti bel, jadi titik mulai dan selesai temperatur transformasi didapat dari garis lurus pada sisi curam di kedua sisi puncak. Tiap puncak menggambarkan terjadinya pemanasan atau pendinginan yang dibutuhkan untuk menjaga laju temperatur dan membutuhkan energi lebih untuk mengubah struktur kristalnya (Shaw et al., 2008).

Pengujian DSC memiliki dua tipe yaitu *heat flux* DSC dan *power compensated* DSC. *Power compensated* DSC bertujuan untuk menganalisis *differential electric power* $p_s - p_r$ diperlukan untuk menjaga spesimen dan *reference holders* di temperatur yang sama dimana p_s adalah *electric power fed* ke pegangan spesimen dan p_r adalah fed ke pegangan *reference*. Tujuan utamanya adalah untuk mengukur perubahan entalpi pada spesimen sebagai fungsi waktu (Tanaka, 1992).

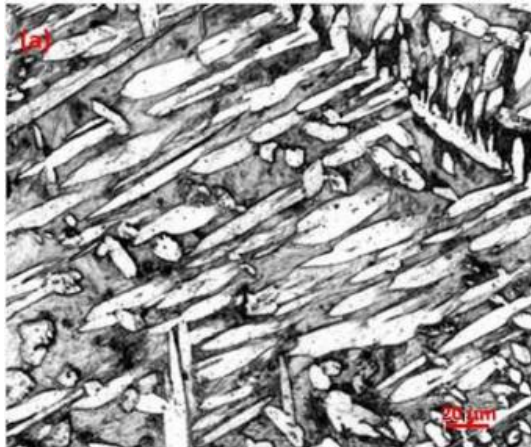
2.5 Penelitian Sebelumnya

Pada tahun 1991, Wang, et all melakukan penelitian mengenai pengaruh *microelements* pada perilaku *grain refining* dan *grain growth* pada Cu-Zn-Al *shape memory alloy*. Komposisi paduan yang digunakan adalah Cu-Zn-Al dengan penambahan *microelement*. Paduan diterapkan perlakuan panas yaitu batang *ingot* paduan SMA dilakukan proses homogenisasi di 800 °C selama 4 jam lalu dilakukan *hot-rolled* di 600 °C menjadi bar diameter 8 mm kemudian spesimen dilakukan proses *annealing* di 550 °C selama 1 jam dan dijadikan *wire*. Berdasarkan hasil penelitian tersebut didapat bahwa *time exponent* (n) dari paduan dengan penambahan sedikit *microelement* dapat meningkatkan temperatur dan ketergantungan temperatur yang lebih tinggi. Kemudian ukuran spesimen berpengaruh selama pertumbuhan butir, semakin besar butir maka semakin berpengaruh ukuran spesimen.



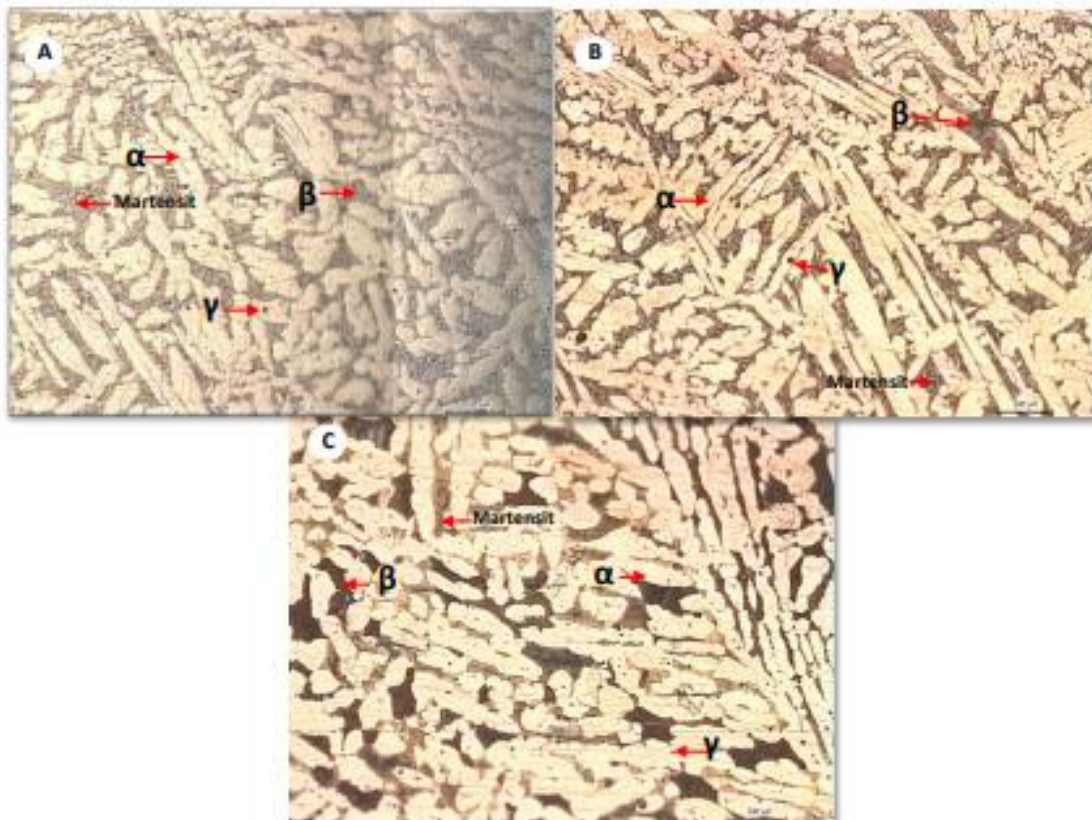
Gambar 2.8 Hasil Pengujian SEM pada *Refined Alloy* (Wang et al., 1991)

Pada tahun 2018, Alaneme, et all melakukan penelitian mengenai perilaku mekanik dan sifat *damping* dari Ni *modified* Cu-Zn-Al *shape memory alloy*. Komposisi paduan yang digunakan adalah Cu-18Zn-7Al. Paduan diterapkan perlakuan panas yaitu dilakukan homogenisasi di 800°C selama 4 jam lalu dilakukan *cold-rolling* dengan reduksi 10% kemudian *annealing* di 450°C selama 1 jam dan dilakukan *final annealing* di 400°C selama 2 jam. Berdasarkan hasil penelitian tersebut didapat nilai kekerasan pada pada *unmodified* paduan Cu-Zn-Al paling kecil sedangkan paduan Cu-Zn-Al dengan 0.2% Ni *modified* paling tinggi.



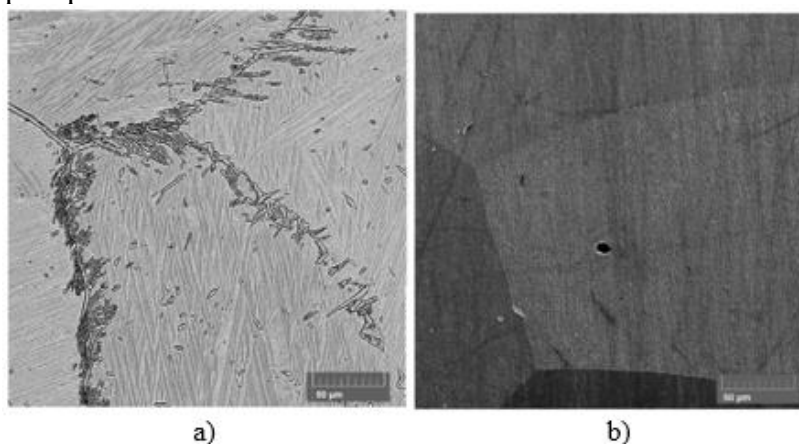
Gambar 2.9 Hasil Pengujian SEM pada Paduan Cu-Zn-Al *Unmodified* (Alaneme & Umar, 2018)

Pada tahun 2020, Rizki melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur *annealing* dan media pendingin pada proses *heat treatment* Cu-Zn-Al *shape memory alloys* terhadap *shape memory effect* dan struktur mikro. Komposisi paduan yang digunakan adalah Cu-21Zn-5Al. Paduan diterapkan perlakuan panas yaitu dilakukan homogenisasi di 850°C selama 2 jam lalu dilakukan *annealing* di 425°C, 550°C, dan 600°C selama 4 jam kemudian dilakukan *solution treatment* di 850°C selama 10 menit. Berdasarkan hasil penelitian tersebut didapat semakin tinggi temperatur *annealing* maka laju pendinginan pada paduan semakin panjang yang berpengaruh pada proses kristalisasi yang terjadi dan paduan Cu-Zn-Al dengan temperatur *annealing* terendah yaitu 425°C memiliki nilai kekerasan yang tinggi yaitu 151 ± 1 HV jika dibandingkan dengan temperatur tertinggi yaitu 600°C memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah yaitu $146,7 \pm 1,53$ HV.



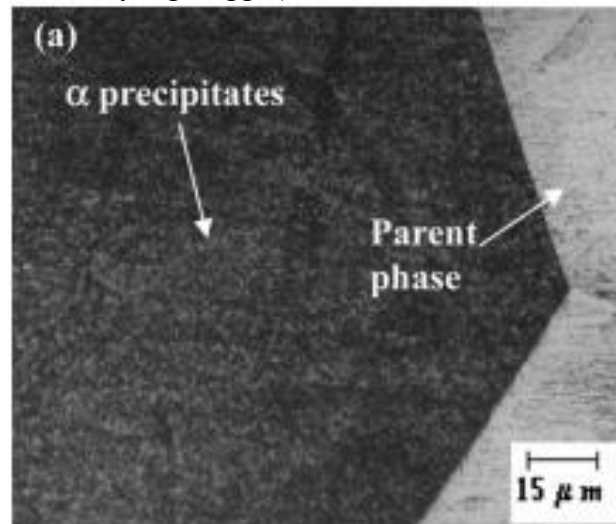
Gambar 2.10 Hasil Pengujian Metalografi Spesimen Temperatur *Annealing* Cu-Zn-Al *Shape Memory Alloys* a) 425°C b) 500°C c) 600°C Perbesaran 100x (Rziki et al., 2020)

Pada tahun 2017, Stosic, dkk melakukan penelitian mengenai pengaruh komposisi dan *thermal treatment* paduan Cu-Al-Zn dengan unsur Al rendah pada sifat *shape memory*. Komposisi paduan yang digunakan adalah Cu-25Zn-4Al dan Cu-30Zn-4Al. Paduan diterapkan perlakuan panas yaitu β -*solutionizing* di 850°C selama 30 menit kemudian diikuti *step-quenching* di air panas di 100°C selama 15 menit lalu didinginkan di air temperatur ruang. Berdasarkan hasil penelitian tersebut didapat struktur mikro dengan *step-quenched* memiliki sedikit partikel presipitasi dari fasa α .



Gambar 2.11 Hasil Pengujian SEM pada a) Cu-25Zn-4Al b) Cu-30Zn-4Al (Stošić et al., 2017)

Pada tahun 2007, Sampath melakukan penelitian mengenai *effect of thermal processing on microstructure and shape memory characteristics of a copper-zinc-aluminum shape memory alloy*. Komposisi paduan yang digunakan adalah Cu-30.36Zn-2.19Al. Paduan diterapkan perlakuan panas yaitu *solution treatment* di 800°C selama 30 menit kemudian dilakukan *step quenching* di dalam oli temperatur 100°C selama 10 menit lalu *quenching* dengan oli temperatur ruang. Berdasarkan hasil penelitian tersebut didapat material menghasilkan fasa β dan presipitat α dan memiliki nilai kekerasan yang tinggi (152-159 VHN).



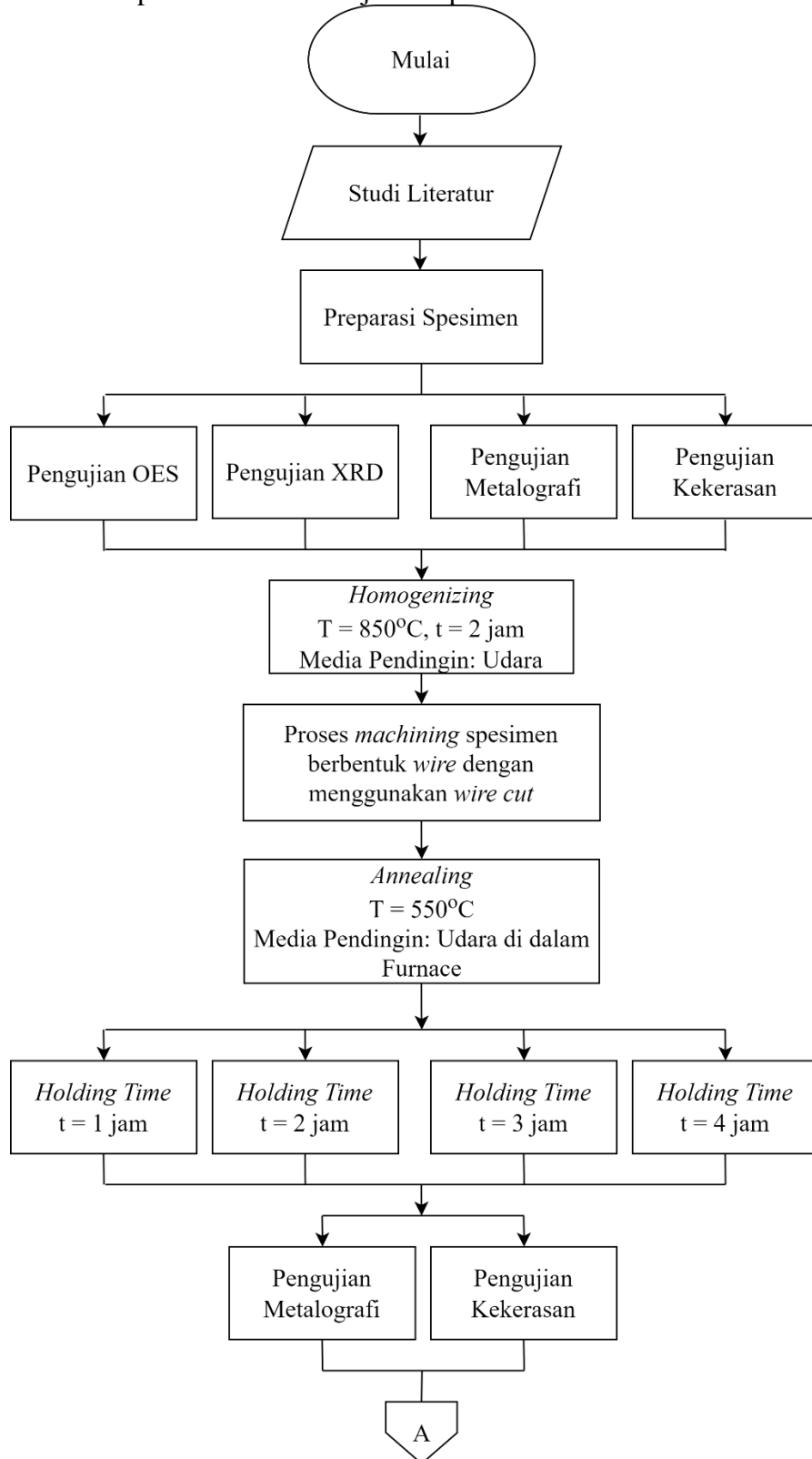
Gambar 2.12 Struktur Mikro Cu-Zn-Al Setelah *Step Quench* Oli (Sampath, 2007)

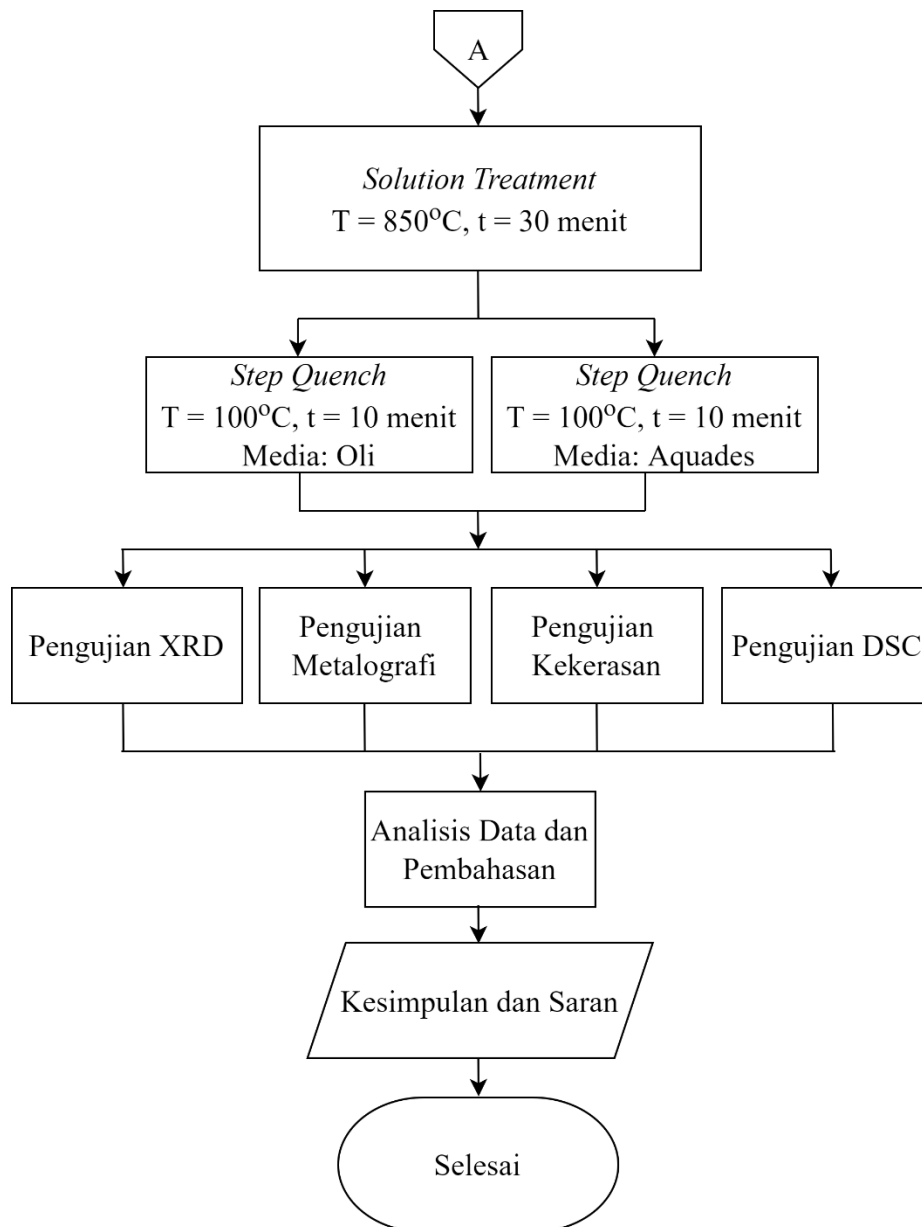
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Diagram alir dari percobaan ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir

3.2 Alat Penelitian

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

1. Gelas Ukur
Alat ini berfungsi untuk mengukur penggunaan bahan larutan etsa yang merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS.
2. *Beaker Glass*
Alat ini berfungsi untuk mencampur bahan larutan etsa yang merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS.
3. Gerinda Tangan
Alat ini berfungsi untuk memotong bahan logam pada proses preparasi spesimen dan proses *machining*.



Gambar 3.2 Gerinda Tangan (Dokumentasi Pribadi, 2022)

4. Mesin *Grinding* dan *Polishing*

Alat ini berfungsi untuk melakukan proses *grinding* dan *polishing* pada spesimen untuk pengujian metalografi yang merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS.

5. Kertas Abrasif

Alat ini berfungsi untuk mengabrasif permukaan spesimen menjadi halus untuk pengujian metalografi.

6. *High Temperature Furnace*

Alat ini berfungsi untuk melakukan proses perlakuan panas pada spesimen. Alat ini merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS.



Gambar 3.3 *High Temperature Furnace* (Dokumentasi Pribadi, 2022)

7. Alat Uji *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Alat ini berfungsi untuk melakukan pengujian komposisi kimia yang terdapat pada paduan. Alat ini merupakan inventasi PPNS, Surabaya.

8. Alat Uji Kekerasan

Alat ini berfungsi untuk menganalisis nilai kekerasan dari paduan Cu-Zn-Al sebelum dan sesudah proses perlakuan panas. Alat ini merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS.



Gambar 3.4 Alat Uji Kekerasan (Dokumentasi Pribadi, 2022)

9. Mikroskop Optik

Alat ini berfungsi untuk menganalisis struktur mikro yang terbentuk pada spesimen. Alat ini merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS.



Gambar 3.5 Mikroskop Optik (Dokumentasi Pribadi, 2022)

10. Alat Uji *X-Ray Diffraction* (XRD)

Alat ini berfungsi untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk pada spesimen dengan cara memancarkan *x-ray* pada spesimen tersebut. Alat ini merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS.

11. Alat Uji *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Alat ini berfungsi untuk mengetahui puncak terjadinya reaksi endotermik dan eksotermik saat terjadinya pemanasan dan pendinginan pada spesimen. Alat ini merupakan inventasi Departemen Farmasi UBAYA, Surabaya.

12. *Oilbath*

Alat ini berfungsi untuk melakukan proses *step quench* untuk menginkubasi spesimen di dalam air dan oli pada temperatur tertentu secara konstan selama waktu tertentu.

3.3 Bahan Penelitian

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

1. Paduan Cu-Zn-Al

Paduan Cu-Zn-Al didapatkan melalui proses pengecoran dengan komposisi yang sesuai dengan *ASM Handbook Volume 2*. Paduan Cu-Zn-Al hasil pengecoran dengan dimensi P x L x T sebesar 320 mm x 18 mm x 20 mm dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Paduan Cu-Zn-Al Hasil Pengecoran (Dokumentasi Pribadi, 2022)

2. Bahan Etsa

Bahan-bahan etsa yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan Aleneme, et al, yaitu:

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

3. Oli

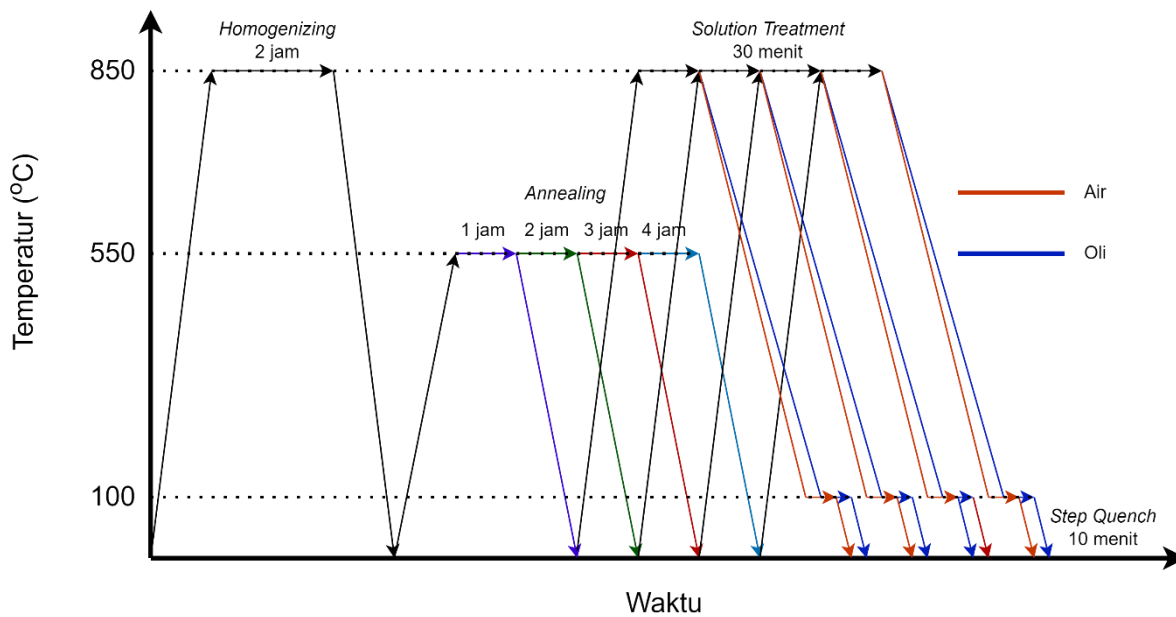
Oli yang digunakan pada penelitian ini adalah oli SAE 10W-30 sebagai media pendingin.

4. Aquades

Aquades digunakan pada penelitian ini sebagai media pendingin.

3.4 Kurva Variabel Penelitian

Perlakuan panas yang diterapkan pada penelitian ini adalah *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment*. Sedangkan variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah *holding time annealing* dan metode *step quench* pada *solution treatment*.



Gambar 3.7 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 diterapkan pada proses perlakuan panas *homogenizing* pada 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 didiamkan hingga dingin oleh udara ruang.

3.5.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Annealing*

Prosedur yang diterapkan pada proses perlakuan panas *annealing* pada 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 didiamkan hingga dingin di dalam *furnace*.
5. Langkah 1-4 diulangi, namun waktu tahan yang diterapkan pada *annealing* diubah menjadi 2, 3, dan 4 jam.

3.5.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Solution Heat Treatment*

Prosedur yang diterapkan pada proses perlakuan panas *solution treatment* pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesimen disiapkan.
2. *Furnace* untuk perlakuan panas disiapkan.

3. Spesimen dimasukkan ke dalam *furnace*, kemudian spesimen dipanaskan hingga 800°C dan ditahan selama 30 menit.
4. Spesimen dikeluarkan dari *furnace*, kemudian dimasukkan ke dalam media pendingin air bertemperatur 100°C dengan metode *step quenching*.
5. Langkah 1-4 diulangi, namun media pendingin diubah menjadi oli bertemperatur 100°C.

3.6 Pengujian

Pengujian yang digunakan pada penelitian ini yaitu pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES), pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), pengujian metalografi, pengujian kekerasan, dan pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Proses pengujiannya adalah sebagai berikut:

3.6.1 Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Pengujian OES bertujuan untuk menganalisis komposisi kimia yang terkandung pada spesimen. Jenis pengujian yang digunakan adalah *Spark OES* dengan cara menggunakan perbedaan *potential electric* antara spesimen dan elektroda yang menghasilkan *electrical discharge* dimana permukaan material tipis mengalami pemanasan dan menguap.

3.6.2 Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pengujian XRD yang bertujuan untuk menganalisis fasa serta struktur kristal yang terbentuk pada material. Pengujian ini bekerja dengan memanfaatkan *x-ray*.

3.6.3 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi yang bertujuan untuk mengamati topografi dan struktur mikro pada material ini menggunakan larutan etsa sebelum diamati di mikroskop. Larutan etsa yang digunakan berdasarkan standar pada *ASM Handbook Volume 9*. Mikroskop optik yang digunakan adalah *Metallurgical Microscope* OLYMPUS BX51MRF.

3.6.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan yang bertujuan untuk menganalisis nilai kekerasan yang dimiliki oleh material sebelum dan sesudah diterapkan proses perlakuan panas. Metode pengujian kekerasan yang digunakan adalah metode Vickers berdasarkan standar ASTM E92-17 menggunakan indentor piramida *diamond* dengan sudut 136° dan beban 30 kgf dengan waktu tahan 10 detik.

3.6.5 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Pengujian DSC yang bertujuan untuk mengukur energi kalor yang diserap dan dikeluarkan oleh material ketika material tersebut dipanaskan dan didinginkan di rentang temperatur transformasi tertentu. Spesimen material yang digunakan sangat kecil yaitu beberapa miligram. Puncak endotermik dan eksotermik selama pengujian akan muncul saat spesimen menyerap dan mengeluarkan energi akibat terjadinya transformasi. Kemudian hasil pengujian berupa grafik titik awal, puncak, dan akhir perubahan fasa material akan muncul. Pada material paduan, pengujian DSC bertujuan untuk menganalisis temperatur transformasi yaitu M_s , M_f , A_s , dan A_f .

3.7 Rancangan Penelitian

Rancangan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

Nama Spesimen	Holding Time Annealing	Media Pendingin	Pengujian				
			OES	XRD	Metalografi	Kekerasan	DSC
<i>As Cast</i>	-	-	✓	✓	✓	✓	-
AN1	1 jam	-	-	-	✓	✓	-
AN2	2 jam	-	-	-	✓	✓	-
AN3	3 jam	-	-	-	✓	✓	-
AN4	4 jam	-	-	-	✓	✓	-
SQO1	1 jam	Oli	-	✓	✓	✓	-
SQO2	2 jam	Oli	-	✓	✓	✓	-
SQO3	3 jam	Oli	-	✓	✓	✓	-
SQO4	4 jam	Oli	-	✓	✓	✓	✓
SQA1	1 jam	Air	-	✓	✓	✓	-
SQA2	2 jam	Air	-	✓	✓	✓	-
SQA3	3 jam	Air	-	✓	✓	✓	-
SQA4	4 jam	Air	-	✓	✓	✓	-

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Berikut ini adalah hasil pengujian OES dari paduan Cu-16,8Zn-6,99Al yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

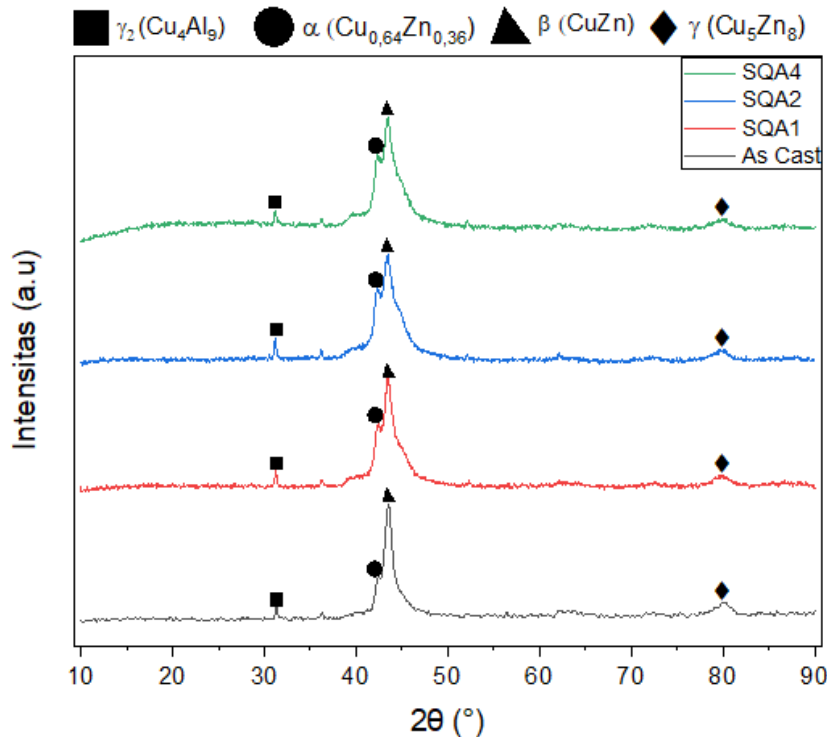
Tabel 4.1 Hasil Pengujian OES

Keterangan	Komposisi		
	Cu (%)	Zn (%)	Al (%)
ASM Handbook Vol 2	Balanced	10-30	5-10
Hasil Pengujian	Balanced	16,8	6,99

Berdasarkan hasil pengujian OES di atas maka paduan Cu-Zn-Al bernama Cu-16,8Zn-6,99Al.

4.2 Hasil Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pengujian XRD dilakukan pada spesimen paduan Cu-16,8Zn-6,99Al menggunakan XRD PANalytical. Data yang didapatkan dari pengujian XRD kemudian diolah dan dianalisis menggunakan *software High Score* untuk mengetahui *peak* yang terbentuk dengan cara membandingkannya dengan *peak* yang sesuai standar *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) yang sesuai dengan fasa yang didapat.



Gambar 4.1 Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan Metode *Step Quench* Media Pendingin Air

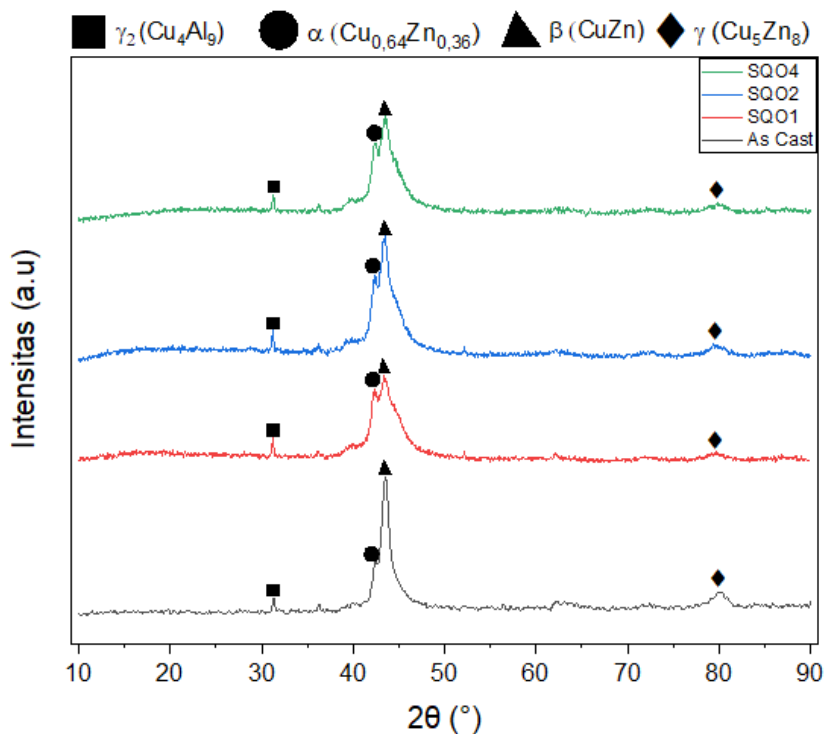
Gambar 4.1 menunjukkan posisi tiap fasa di semua spesimen dimana spesimen *As Cast* memiliki *peak* fasa γ_2 -brass (Cu_4Al_9) yang terletak di 2θ $30,801^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-024-0003, *peak* fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak di 2θ $42,325^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333,

peak fasa β -brass (CuZn) yang terletak di 2θ $43,473^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231, dan *peak* fasa γ -brass (Cu₅Zn₈) yang terletak di 2θ $79,417^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-025-1228.

Pada spesimen SQA1 memiliki *peak* fasa γ_2 -brass (Cu₄Al₉) yang terletak di 2θ $30,802^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-024-0003, *peak* fasa α -brass (Cu_{0,64}Zn_{0,36}) yang terletak di 2θ $42,324^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333, *peak* fasa β -brass (CuZn) yang terletak di 2θ $43,487^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231, dan *peak* fasa γ -brass (Cu₅Zn₈) yang terletak di 2θ $79,412^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-025-1228.

Pada spesimen SQA2 memiliki *peak* fasa γ_2 -brass (Cu₄Al₉) yang terletak di 2θ $30,803^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-024-0003, *peak* fasa α -brass (Cu_{0,64}Zn_{0,36}) yang terletak di 2θ $42,324^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333, *peak* fasa β -brass (CuZn) yang terletak di 2θ $43,474^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231, dan *peak* fasa γ -brass (Cu₅Zn₈) yang terletak di 2θ $79,415^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-025-1228.

Pada spesimen SQA4 memiliki *peak* fasa γ_2 -brass (Cu₄Al₉) yang terletak di 2θ $30,803^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-024-0003, *peak* fasa α -brass (Cu_{0,64}Zn_{0,36}) yang terletak di 2θ $42,326^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333, *peak* fasa β -brass (CuZn) yang terletak di 2θ $43,474^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231, dan *peak* fasa γ -brass (Cu₅Zn₈) yang terletak di 2θ $79,434^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-025-1228.



Gambar 4.2 Hasil Pengujian XRD Spesimen dengan Metode *Step Quench* Media Pendingin Oli

Gambar 4.2 menunjukkan posisi tiap fasa di semua spesimen dimana untuk spesimen *As Cast* pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 merupakan spesimen yang sama maka memiliki data yang sama juga. Pada spesimen SQO1 memiliki *peak* fasa γ_2 -brass (Cu_4Al_9) yang terletak di 2θ $30,802^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-024-0003, *peak* fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak di 2θ $42,325^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333, *peak* fasa β -brass (CuZn) yang terletak di 2θ $43,476^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231, dan *peak* fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak di 2θ $79,425^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-025-1228.

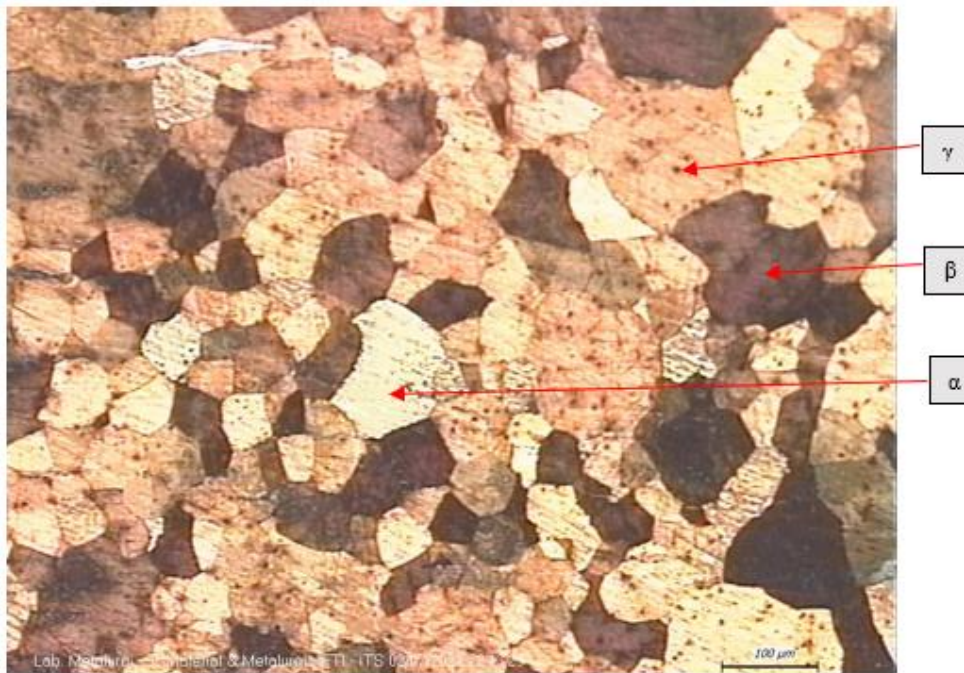
Pada spesimen SQO2 memiliki *peak* fasa γ_2 -brass (Cu_4Al_9) yang terletak di 2θ $30,801^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-024-0003, *peak* fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak di 2θ $42,325^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333, *peak* fasa β -brass (CuZn) yang terletak di 2θ $43,472^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231, dan *peak* fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak di 2θ $79,429^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-025-1228.

Pada spesimen SQO4 memiliki *peak* fasa γ_2 -brass (Cu_4Al_9) yang terletak di 2θ $30,802^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-024-0003, *peak* fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak di 2θ $42,324^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333, *peak* fasa β -brass (CuZn) yang terletak di 2θ $43,473^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231, dan *peak* fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak di 2θ $79,433^\circ$ dengan struktur kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-025-1228.

Berdasarkan Gambar 4.1 dan Gambar 4.2, pengujian XRD pada paduan Cu-16,8Zn-6,99Al menghasilkan 3 fasa dengan 2 jenis fasa γ yaitu fasa γ_2 -brass (Cu_4Al_9), α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) β -brass (CuZn) γ -brass (Cu_5Zn_8). Fasa β (CuZn) pada diagram biner Cu-Zn mengalami dekomposisi menjadi fasa α dan γ (Cu_5Zn_8) di temperatur 427°C dengan pendinginan lambat. Fasa β (CuZn) pada diagram biner Al-Cu mengalami dekomposisi menjadi fasa α dan γ_2 (Cu_9Al_4) di temperatur 565°C dengan pendinginan lambat (Otsuka & Wayman, 1998). Banyaknya fasa α dan γ pada spesimen dengan pendinginan metode *step quench* disebabkan karena fasa α dan γ tidak larut secara menyeluruh menjadi fasa β sehingga fasa α dan γ pada struktur mikro terlihat banyak (Masrul et al., 2021).

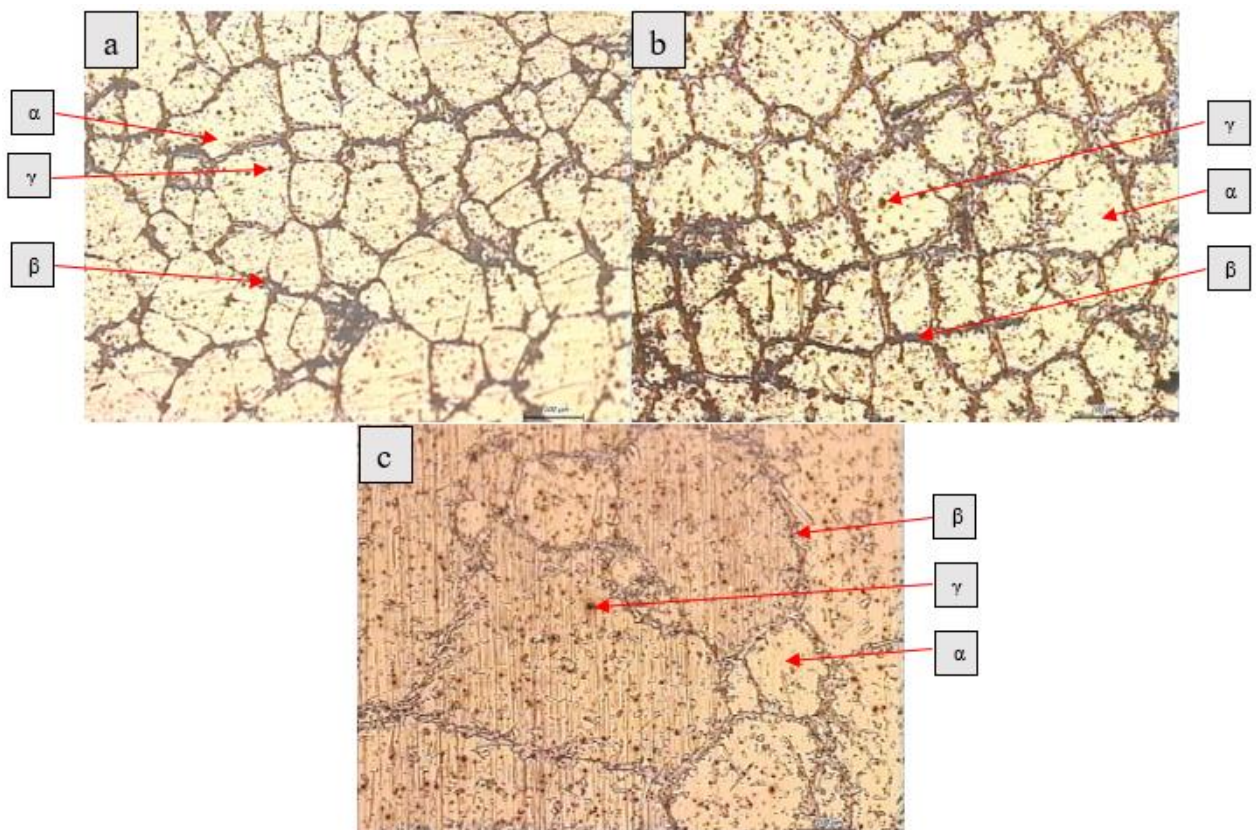
4.3 Hasil Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan pada semua spesimen paduan Cu-16,8Zn-6,99Al yaitu spesimen *as cast*, *annealing* dengan variasi *holding time* 1, 2, 3, dan 4 jam, dan *solution treatment* yang diikuti *step quench* media pendingin air dan oli.



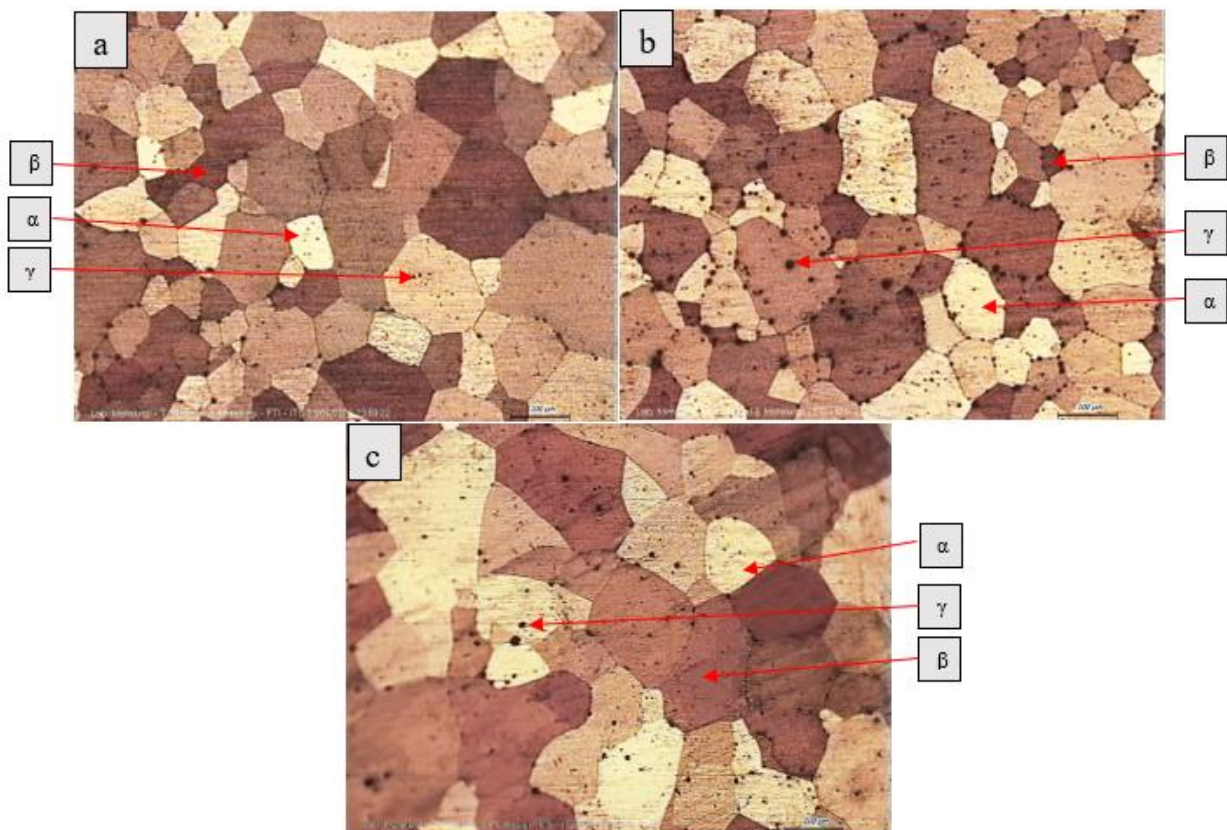
Gambar 4.3 Hasil Pengujian Metalografi Spesimen *As Cast* dengan Perbesaran 100x Menggunakan Etsa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Gambar 4.3 merupakan hasil pengujian metalografi spesimen *As Cast* Cu-16,8Zn-6,99Al. Pada gambar tersebut terbentuk tiga fasa yaitu fasa α , β , dan γ . Fasa α ditunjukkan dengan karakteristik butir yang berwarna terang lalu fasa β ditunjukkan dengan karakteristik butir yang berwarna gelap, dan fasa γ ditunjukkan dengan karakteristik yang berbentuk butiran yang berwarna gelap. Ketiga fasa yang ada pada Gambar 4.3 terdeteksi dan dapat dikonfirmasi pada hasil pengujian XRD. Kemudian fasa β yang berwarna terang kegelapan pada Gambar 4.3 lebih mendominasi dibandingkan dengan fasa α dan γ dimana hal tersebut menunjukkan intensitas *peak* fasa β memiliki nilai paling tinggi dibandingkan fasa α dan γ pada hasil pengujian XRD.



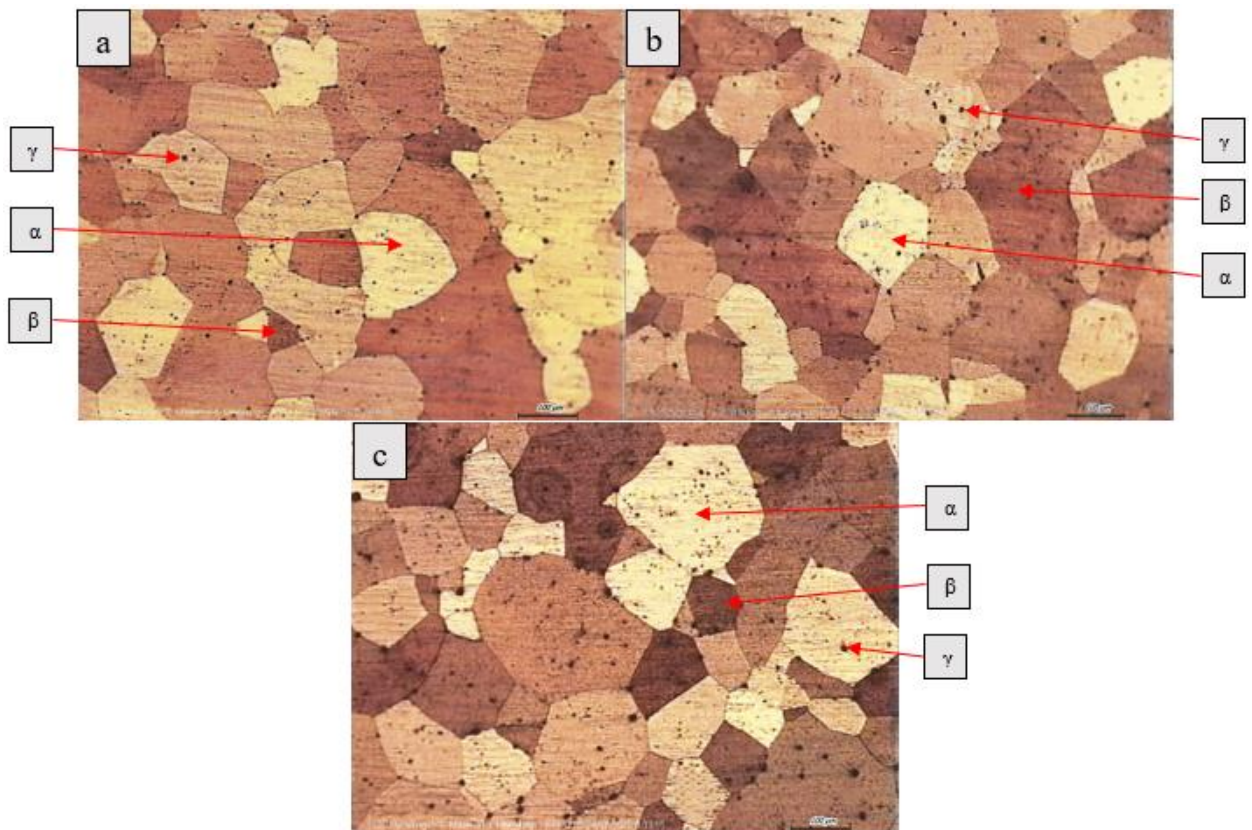
Gambar 4.4 Hasil Pengujian Metalografi Spesimen *Annealing*: a) AN1, b) AN2, dan c) AN4 dengan Perbesaran 100x Menggunakan Etsa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Gambar 4.4 merupakan hasil pengujian metalografi spesimen *annealing* dengan waktu tahan selama 1, 2, 3, dan 4 jam dimana fasa yang terbentuk yaitu fasa α , β , dan γ . Fasa yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 sama dengan spesimen *As Cast*. Hal tersebut dikarenakan proses *annealing* bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang mengakibatkan pelunakan benda kerja dan meningkatkan keuletan. Perbedaan ukuran diameter butir juga disebabkan adanya pengaruh waktu tahan proses *annealing* dimana semakin lama waktu tahannya maka semakin besar ukuran butir yang didapatkan, begitupun sebaliknya (Arai et al., 1991). Hal tersebut dapat dibuktikan dengan melihat hasil perhitungan ukuran diameter butir pada Tabel 4.2.



Gambar 4.5 Hasil Pengujian Metalografi Spesimen *Solution Treatment* Diikuti *Step Quench* dengan Media Pendingin Air: a) SQA1, b) SQA2, dan c) SQA4 dengan Perbesaran 100x Menggunakan Etsa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Gambar 4.5 merupakan hasil pengujian metalografi spesimen *solution treatment* yang menggunakan metode *step quench* dengan media pendingin air dengan waktu tahan *annealing* 1, 2, 3, dan 4 jam. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini yaitu fasa α , β , dan γ . Fasa β yang berwarna terang kegelapan lebih mendominasi dibandingkan fasa α dan γ dimana hal tersebut dapat ditunjukkan pada hasil pengujian XRD dengan intensitas *peak* fasa β memiliki nilai intensitas paling tinggi dibandingkan dengan fasa α dan γ .



Gambar 4.6 Hasil Pengujian Metalografi Spesimen *Solution Treatment* Diikuti *Step Quench* dengan Media Pendingin Oli: a) SQO1, b) SQO2, dan c) SQO4 dengan Perbesaran 100x Menggunakan Etsa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Gambar 4.6 merupakan hasil pengujian metalografi spesimen *solution treatment* yang menggunakan metode *step quench* dengan media pendingin oli dengan waktu tahan *annealing* 1, 2, 3, dan 4 jam. Fasa yang terbentuk pada spesimen ini yaitu fasa α , β , dan γ . Fasa β dengan warna terang kegelapan lebih mendominasi dibandingkan fasa α dan γ dimana hal tersebut dapat ditunjukkan pada hasil pengujian XRD dengan intensitas *peak* fasa β memiliki nilai intensitas paling tinggi dibandingkan fasa α dan γ . Pada Gambar 4.5 dan 4.6 tidak terbentuk fasa β' yang merupakan *twinned martensite*. Hal tersebut terjadi karena temperatur transformasi martensit berada di bawah temperatur ruang dimana temperatur tersebut lebih rendah yang dapat dicapai dengan proses pendinginan yang menggunakan media pendingin air dan oli. sehingga proses pendinginan tidak dapat mencapai *critical cooling rate* (CCR) dari pembentukan martensit (Lohan et al., 2014).

Proses *solution treatment* yang dilakukan pada spesimen Cu-16,8Zn-6,99Al memberikan pengaruh terhadap ukuran diameter butir. Perhitungan ukuran diameter butir dilakukan dengan cara mengolah gambar hasil metalografi pebesaran 100x menggunakan *software ImageJ*. Pada perhitungan ukuran diameter butir ini dilakukan pada semua spesimen yaitu *As Cast*, AN1, AN2, AN3, AN4, SQA1, SQA2, SQA3, SQA4, SQO1, SQO2, SQA03, dan SQO4 sebagai perbandingan ukuran butir spesimen di tiap tahap perlakuan panas. Hasil dari perhitungan ukuran diameter butir dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Ukuran Diameter Butir

Nama spesimen	Rata-Rata Ukuran Diameter Butir (μm)
<i>As Cast</i>	94,644
AN1	112,929
AN2	120,257
AN3	144,105
AN4	181,404
SQA1	103,911
SQA2	111,132
SQA3	123,968
SQA4	142,954
SQO1	107,335
SQO2	116,508
SQO3	134,977
SQO4	162,697

Tabel 4.2 menunjukkan ukuran diameter butir terbesar dimiliki oleh spesimen AN4 dengan nilai sebesar 181,404 μm dan terkecil dimiliki oleh spesimen *As Cast* dengan nilai sebesar 94,644 μm . Hal tersebut dapat terjadi karena waktu tahan proses *annealing* memiliki pengaruh terhadap ukuran diameter butir dimana semakin lama waktu tahan proses *annealing* maka ukuran diameter butir semakin besar, begitupun sebaliknya (Callister & David Rethwisch, 2014). Perbandingan rata-rata ukuran diameter butir yang berada pada Tabel 4.2 menunjukkan bahwa spesimen *step quench* media pendingin air memiliki rata-rata ukuran diameter butir lebih kecil dibandingkan dengan spesimen *step quench* media pendingin oli. Hal tersebut disebabkan karena media pendingin air memiliki nilai *Grossman Hardness* yang lebih tinggi dibandingkan dengan media pendingin oli maka semakin tinggi nilai *Grossman Hardness* maka semakin tinggi *cooling rate* yang terjadi (Avner, n.d.-b).

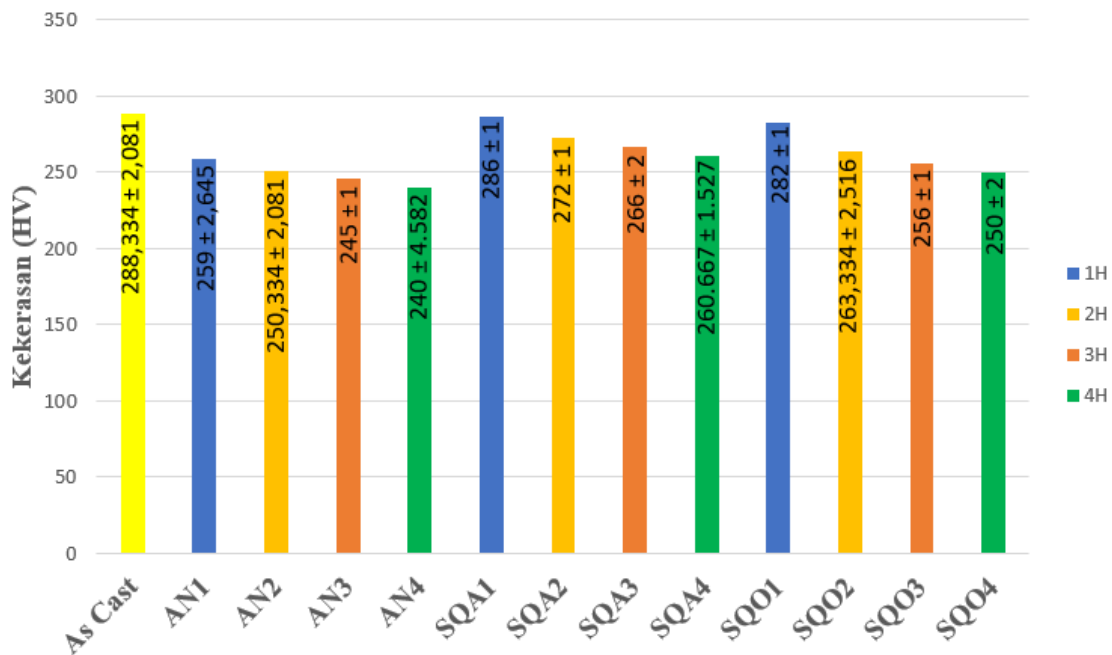
4.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan pengujian kekerasan Vickers pada spesimen paduan Cu-16,8Zn-6,99Al. Hasil pengujian kekerasan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Nama Spesimen	Rata-Rata Nilai Kekerasan (HV)
<i>As Cast</i>	288,334 \pm 2,081
AN1	259 \pm 2,645
AN2	250,334 \pm 2,081
AN3	245 \pm 1
AN4	240 \pm 4,582
SQA1	286 \pm 1
SQA2	272 \pm 1
SQA3	266 \pm 2
SQA4	260,667 \pm 1,527
SQO1	282 \pm 1
SQO2	263,334 \pm 2,516
SQO3	256 \pm 1
SQO4	250 \pm 2

Pada Gambar 4.7 ditampilkan grafik perbandingan nilai kekerasan dari spesimen *As Cast*, AN1, AN2, AN3, AN4, SQA1, SQA2, SQA3, SQA4, SQO1, SQO2, SQO3, dan SQO4.



Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengujian Kekerasan

Tabel 4.3 menunjukkan rata-rata nilai kekerasan semua spesimen yang telah dilakukan pengujian kekerasan. Spesimen *As Cast* memiliki rata-rata nilai kekerasan paling tinggi sebesar $288,334 \pm 2,081$ HV. Hal tersebut dikarenakan spesimen *As Cast* tidak diberikan perlakuan panas sama sekali seperti perlakuan *homogenizing* dan *annealing* dimana perlakuan *homogenizing* bertujuan untuk menyeragamkan ukuran butir serta memperbaiki sifat mekanik dan perlakuan *annealing* bertujuan untuk meningkatkan keuletan serta mengurangi tegangan sisa yang ada di dalam spesimen (Arai et al., 1991)(ASM, 2015). Maka dari itu, rata-rata nilai kekerasan *As Cast* tertinggi dibandingkan dengan spesimen lainnya yang telah diberikan perlakuan *annealing* dan *solution treatment*.

Pada spesimen yang hanya diberi perlakuan *annealing*, spesimen AN1 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar $259 \pm 2,645$ HV lalu spesimen AN2 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar $250,334 \pm 2,081$ HV lalu spesimen AN3 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 245 ± 1 HV kemudian spesimen AN4 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar $240 \pm 4,582$ HV. Pada spesimen yang diberi perlakuan *annealing* saja mengalami penurunan rata-rata nilai kekerasan. Hal ini dapat terjadi karena semakin lama waktu tahan perlakuan *annealing* dilakukan maka semakin besar butir yang terbentuk dan spesimen semakin lunak. (ASM, 2015). Spesimen mengalami pembesaran butir seiring lamanya waktu tahan perlakuan *annealing* yang dapat dilihat pada hasil pengujian metalografi.

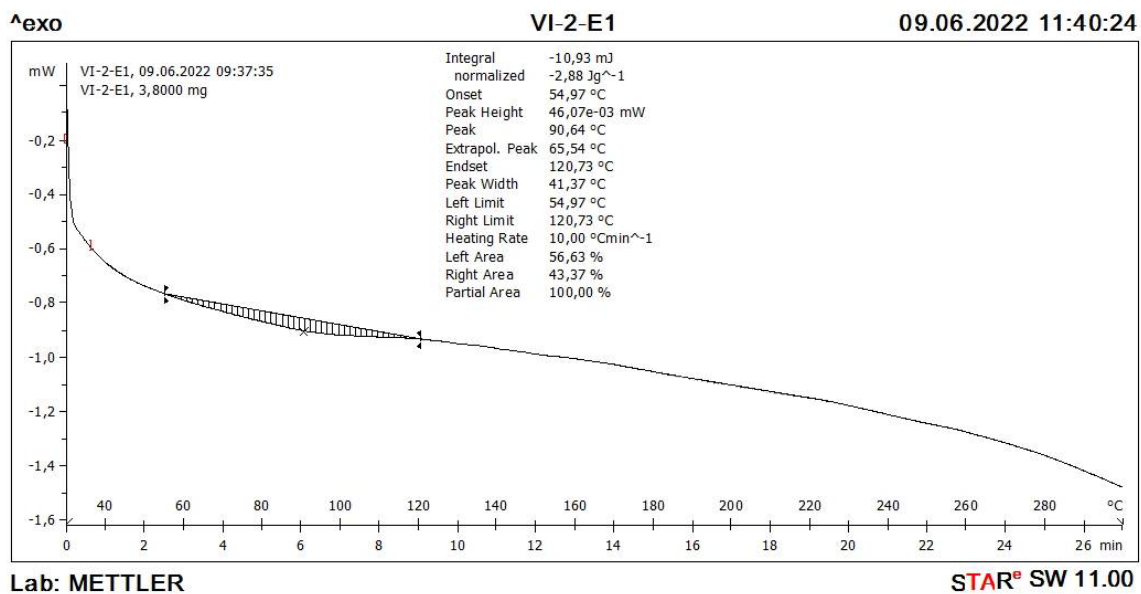
Pada spesimen setelah diberi perlakuan *solution treatment* diikuti dengan metode pendinginan *step quench* yang menggunakan media pendingin air, spesimen SQA1 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 286 ± 1 HV lalu spesimen SQA2 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 272 ± 1 HV lalu spesimen SQA3 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 266 ± 2 HV kemudian spesimen SQA4 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar $260,667 \pm 1,527$ HV. Pada spesimen yang diberi perlakuan *solution treatment* diikuti dengan metode pendinginan *step quench* yang menggunakan media pendingin oli, spesimen SQO1 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 282 ± 1 HV lalu spesimen SQO2 memiliki rata-rata nilai

kekerasan sebesar $263,334 \pm 2,516$ HV lalu spesimen SQO3 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 256 ± 1 HV kemudian spesimen SQO4 memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 250 ± 2 HV.

Pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada spesimen *step quench* media pendingin air memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen *step quench* media pendingin oli. Hal tersebut terjadi karena media pendingin air memiliki nilai *Grossman Hardness* lebih tinggi daripada media pendingin oli yang membuat tingginya *cooling rate* media pendingin air serta semakin tinggi temperatur media pendingin oli maka semakin rendah *cooling rate* (Avner, n.d.-b).

4.5 Hasil Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Berikut ini adalah grafik hasil pengujian DSC dari spesimen SQO4 yang ditunjukkan pada Gambar 4.8



Gambar 4.8 Hasil Pengujian DSC Spesimen SQO4

Kurva DSC yang ditunjukkan pada Gambar 4.8, hanya terdapat 1 buah *peak* di masing-masing gambar yaitu *peak* endotermik dimana *peak* tersebut mewakili temperatur transformasi dari fasa austenit. *Peak* tersebut terjadi karena adanya kenaikan *heat flow* di masing-masing kurva. *Left limit* atau titik paling kiri merupakan titik *austenite start* (A_s), *peak* atau titik puncak merupakan titik *austenite peak* (A_p), dan *right limit* atau batas kanan merupakan titik *austenite finish* (A_f). Pada Gambar 4.8 terlihat adanya *range* temperatur yang ditandai adanya daerah arsir pada grafik yang disebut sebagai daerah *austenitic transformation temperature* dimana *left limit* (*austenite start*, A_s) berada di temperatur $54,97^\circ\text{C}$, puncak *peak* berada di temperatur $90,64^\circ\text{C}$, dan *right limit* (*austenite finish*, A_f) berada di temperatur $120,73^\circ\text{C}$.

Pada Gambar 4.8 hanya menunjukkan *peak* endotermik yang menandakan *austenitic transformation temperature* dan tidak menunjukkan adanya *peak* eksotermik yang menandakan adanya *martensitic transformation temperature* dimana transformasi martensit terjadi di bawah temperatur kamar ($<30^\circ\text{C}$) yang sesuai dengan hasil pengujian metalografi dengan tidak terbentuknya martensit. Persamaan 4.1 di bawah ini dapat mencari perkiraan temperatur *martensite start* (M_s) dari paduan *shape memory* Cu-Zn-Al (Nunes, Adams, Bean, et al., 1990).

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

Terdapat persamaan lainnya dari buku *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* untuk mencari perkiraan temperatur *martensite start* (M_s) dari paduan *shape memory* Cu-Zn-Al (Duerig, 1990).

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

Dari persamaan diatas dapat dilakukan perhitungan dari temperatur *martensite start* (M_s) yaitu $\sim(-155,826)^{\circ}\text{C}$ dimana temperatur tersebut tetap di dalam *range* temperatur transformasi martensit dari *shape memory alloy* yaitu -180°C hingga 200°C (Nunes, Adams, Bean, et al., 1990). Berikut ini adalah Tabel 4.4 yang menunjukkan temperatur transformasi dari paduan Cu-16,8Zn-6,99Al.

Tabel 4.4 Temperatur Transformasi Spesimen SQO4

Nama Spesimen	<i>Martensite Start</i> (M_s)	<i>Austenite Start</i> (A_s)	<i>Asutenite Finish</i> (A_f)
SQO4	$\sim(-155,826)^{\circ}\text{C}$	$54,97^{\circ}\text{C}$	$120,73^{\circ}\text{C}$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berikut ini adalah kesimpulan dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Semakin lama *holding time* perlakuan panas *annealing* terjadi maka semakin besar ukuran diameter butir pada struktur mikro dan semakin kecil nilai kekerasannya dimana rata-rata ukuran diameter butir terbesar adalah spesimen AN4 sebesar 181,404 μm dan terkecil adalah spesimen AN1 sebesar 112,929 μm , sedangkan nilai kekerasan tertinggi adalah spesimen AN1 sebesar $259 \pm 2,645$ HV dan terendah adalah spesimen AN4 sebesar $240 \pm 4,582$ HV.
2. Semakin tinggi *cooling rate* yang dimiliki oleh media pendingin saat proses *step quench* maka semakin kecil diameter ukuran butir dan semakin tinggi nilai kekerasan yang dimiliki dimana rata-rata ukuran diameter butir terbesar adalah spesimen SQO4 sebesar 162,697 μm dan terkecil adalah spesimen SQA1 sebesar 103,911 μm , sedangkan nilai kekerasan tertinggi adalah spesimen SQA1 sebesar 286 ± 1 HV dan terendah adalah spesimen SQO4 sebesar 250 ± 2 HV.

5.2 Saran

Berikut ini adalah saran dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Menentukan komposisi unsur paduan Cu-Zn-Al lebih teliti kembali untuk mendapatkan komposisi yang diinginkan.
2. Melakukan preparasi spesimen metalografi lebih teliti dan rapi agar mendapatkan spesimen dengan *scratch* lebih sedikit.
3. Merencanakan jadwal penelitian lebih baik agar semua progress dapat terjadwal dengan baik

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Alaneme, K. K., & Umar, S. (2018). Mechanical behaviour and damping properties of Ni modified Cu–Zn–Al shape memory alloys. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 3(3), 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2018.05.002>
- Alkan, S., Wu, Y., Ojha, A., & Sehitoglu, H. (2018). Transformation stress of shape memory alloy CuZnAl: Non-Schmid behavior. *Acta Materialia*, 149, 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.02.011>
- Arai, T., Baker, G. M., & Bates, C. E. (1991). *ASM Handbook Volume 4 Heat Treating* (Vol. 4). ASM Handbook Volume 4 Heat Treating. (1991).
- ASM, I. (2015). *Subject Guide Heat Treating*. www.asminternational.org
- Avner, S. H. (n.d.-a). *Introduction to Physical Metallurgy*.
- Avner, S. H. (n.d.-b). *Introduction to Physical Metallurgy* (2nd ed.).
- Buku Karakterisasi Material 2020 (1)*. (n.d.).
- Callister, W. D., & David Rethwisch, J. G. (n.d.). *MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING*.
- Callister, W. D., & David Rethwisch, J. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.).
- Duerig, T. W. (1990). *Engineering aspects of shape memory alloys*. Butterworth-Heinemann.
- International, A. (1992). *ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams* (Vol. 3).
- International, A. (2015). *ASM International Subject Guide Heat Treating*. www.asminternational.org
- Kadletz, P. M., Krooß, P., Chumlyakov, Y. I., Gutmann, M. J., Schmahl, W. W., Maier, H. J., & Niendorf, T. (2015). Martensite stabilization in shape memory alloys - experimental evidence for short-range ordering. *Materials Letters*, 159, 16–19. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.06.048>
- Kim, S. J., Kim, K. S., Kim, S. S., Kang, C. Y., & Sukanuma, K. (2008). Characteristics of Zn-Al-Cu alloys for High Temperature Solder Application. *Materials Transactions*, 49(7), 1531–1536. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF200809>
- Lohan, N. M., Suru, M. G., Pricop, B., & Bujoreanu, L. G. (2014). Cooling rate effects on the structure and transformation behavior of Cu-Zn-Al shape memory alloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 21(11), 1109–1114. <https://doi.org/10.1007/s12613-014-1015-5>
- Longauer, S., Makroczy, P., Sladik, S., Janak, G., Hirjak, J., & Bochnak, I. (n.d.). *The shape memory effect in CuZnAl alloy with the α/β two-phase structure of different morphology*. <https://www.researchgate.net/publication/296227222>
- 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*.
- Mehrpouya, M., & Bidsorkhi, H. C. (2017). MEMS Applications of NiTi Based Shape Memory Alloys: A Review. *Micro and Nanosystems*, 8(2), 79–91. <https://doi.org/10.2174/1876402908666161102151453>
- Mohamed, A. M. A., & Samuel, F. H. (2012). *A Review on the Heat Treatment of Al-Si-Cu/Mg Casting Alloys*. <https://doi.org/10.5772/79832>
- Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. In *Materials and Design* (Vol. 56, pp. 1078–1113). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>

- Nunes, R., Adams, J. H., Bean, J. C., Laboratories, B., Beaudry, • B J, David, •, & Berry, F. (1990). *ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (Vol. 2).
- Nunes, R., Adams, J. H., & et all. (1990). *ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special -Purpose Materials* (Vol. 2).
- Ōtsuka, K., & Wayman, C. M. (1998). *Shape memory materials*. Cambridge University Press. *Publication Information and Contributors*. (n.d.).
- Rziki, M. A., Rochiem, R., & Ramadhani, M. (2020). *Studi Karakterisasi Variasi Temperatur Annealing Paduan Cu-Zn-Al Terhadap Hardness Test dan Differential Scanning Calorimetry (DSC)*.
- 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>
- Shaw, J. A., Churchill, C. B., & Iadicola, M. A. (2008). Tips and tricks for characterizing shape memory alloy wire: Part 1-differential scanning calorimetry and basic phenomena. *Experimental Techniques*, 32(5), 55–62. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2008.00410.x>
- 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>
- Tanaka, S. (1992). Theory of power-compensated DSC. *Thermochimicu Acta*, 210, 67–76.
- Vilarinho, C., Soares, D., & Castro, F. (2003). Phase equilibria of the Al-Cu-Zn system for compositions close to brass alloys. *Journal of Phase Equilibria*, 24(3), 236–239. <https://doi.org/10.1361/105497103770330532>
- Wang, F. T., Chen, F. X., Wd, Z. G., & Yang, D. Z. (1991). *THE EFFECTS OF MICROELEMENTS ON THE GRAIN REFINING AND THE GRAIN GROWTH BEHAVIORS OF CuZnAl SHAPE MEMORY ALLOY* (Vol. 25).
- Werner, W. S. (2013). *Related Titles Characterization of Surfaces and Nanostructures Academic and Industrial Applications Characterization of Solid Materials and Heterogeneous Catalysts From Structure to Surface Reactivity Characterization Techniques for Polymer Nanocomposites Basic Concepts of X-Ray Diffraction Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells*. <http://dnb.d-nb.de>

LAMPIRAN

1. Hasil Perhitungan *Mass Balance* Komposisi Paduan Cu-Zn-Al

Target komposisi bahan:

Cu (Tembaga) : 71,4%

Zn (Seng) : 23,6%

Al (Aluminium) : 5%

Kebutuhan bahan untuk membuat satu spesimen:

As Tembaga : 581,76 gram

As Kuningan : 976,74 gram

Ingot Al : 79,88 gram

Kebutuhan bahan untuk membuat enam spesimen:

As Tembaga : $581,76 \times 3 = 174,28$ gram

As Kuningan : $976,74 \times 3 = 2930,22$ gram

Ingot Al : $79,88 \times 3 = 239,64$ gram

2. Hasil Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES)



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

LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN
ATTACHMENT OF THE TEST RESULT

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

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

F.08-LUB-PPNS

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



Keterangan / Notes :

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

Halaman
2 dari 2



**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY RESULT

No. SPK : 19-IV/PL19/BJP/2022 Penandaan : -
Pelanggan : Riza M. Alifandi - T. Material ITS Material : CuZnAl
Proyek : - Dimensi : 29x27x24mm
Kepala Lab. : Hendri Budi K., S.ST., M.T. Heat No. : -
Program : CU_200 Keterangan : -

	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
1	73.6	16.8	1.72	0.187	0.0006	< 0.0002	0.148	0.0815
2	73.7	16.7	1.72	0.169	< 0.0001	< 0.0002	0.143	0.0838
3	73.5	16.9	1.62	0.187	< 0.0001	< 0.0002	0.147	0.0856
Ave	73.6	16.8	1.69	0.181	0.0002	< 0.0002	0.146	0.0836
	Si	Mg	Cr	Al	S	As	Ag	Co
1	0.453	< 0.0005	< 0.0005	> 3.00	0.0010	0.0033	0.0145	0.0064
2	0.444	< 0.0005	< 0.0005	> 3.00	0.0009	0.0032	0.0133	0.0044
3	0.441	< 0.0005	< 0.0005	> 3.00	0.0012	0.0023	0.0162	0.0056
Ave	0.446	< 0.0005	< 0.0005	> 3.00	0.0010	0.0030	0.0147	0.0055
	Bi	Cd	Sb	Zr				
1	0.0030	0.0035	0.0430	< 0.0002				
2	0.0188	0.0028	0.0191	< 0.0002				
3	0.0115	0.0026	0.0277	0.0008				
Ave	0.0111	0.0029	0.0299	0.0002				

Surabaya, 4/20/2022

Diuji oleh: Muharror



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

3. *Pattern List* Spesimen *As Cast*

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	S...	Display Color		
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	30	-	Blue		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	25	-	Lime		
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	10	-	Gray		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	18	-	Maroon		

4. *Pattern List* Spesimen *SQA1*

Refinement Control		Structure Plot		Fourier Map		Distances and Angles			
Pattern List		Scan List		Peak List		Anchor Scan Data		Quantification	
Accepted Ref. Pattern: 00-004-0831									
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	S...	Display Color		
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	38	-	Blue		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	40	-	Lime		
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	32	-	Gray		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	32	-	Maroon		
5	<input checked="" type="checkbox"/>	00-004-0831	Zinc	Zn	14	-	Aqua		

5. *Pattern List* Spesimen *SQA2*

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	S...	Display Color		
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	12	-	Blue		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	9	-	Lime		
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	18	-	Gray		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	11	-	Maroon		

6. *Pattern List* Spesimen *SQA4*

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	S...	Display Color		
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	16	-	Blue		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	12	-	Lime		
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	20	-	Gray		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	6	-	Maroon		

7. *Pattern List* Spesimen SQO1

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	S...	Display Color		
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	24	-	Blue		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	9	-	Lime		
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	7	-	Gray		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	13	-	Maroon		

8. *Pattern List* Spesimen SQO2

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	S...	Display Color		
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	28	-	Blue		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	21	-	Lime		
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	9	-	Gray		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	17	-	Maroon		

9. *Pattern List* Spesimen SQO4

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	S..	Display Color		
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	21	-	Blue		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	32	-	Lime		
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	8	-	Gray		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	19	-	Maroon		

10. *PDF Card alpha*

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.

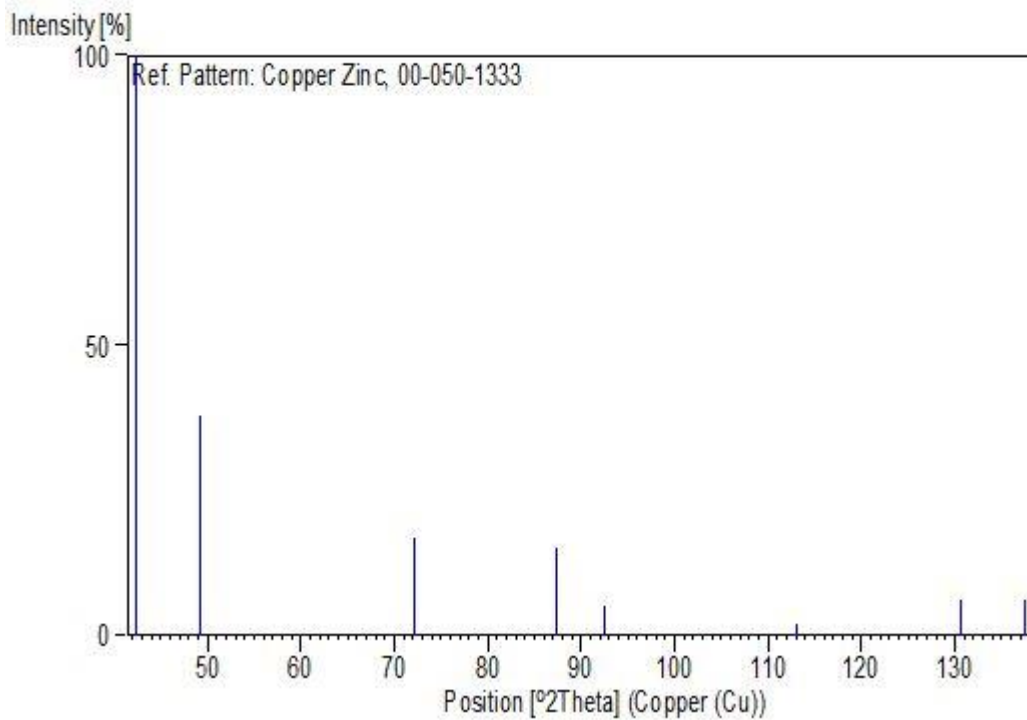
References

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



11. PDF Card beta

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 8-349
Color: Yellow
Analysis: Analysis (wt.%): Cu 51.0, Zn 49.0.

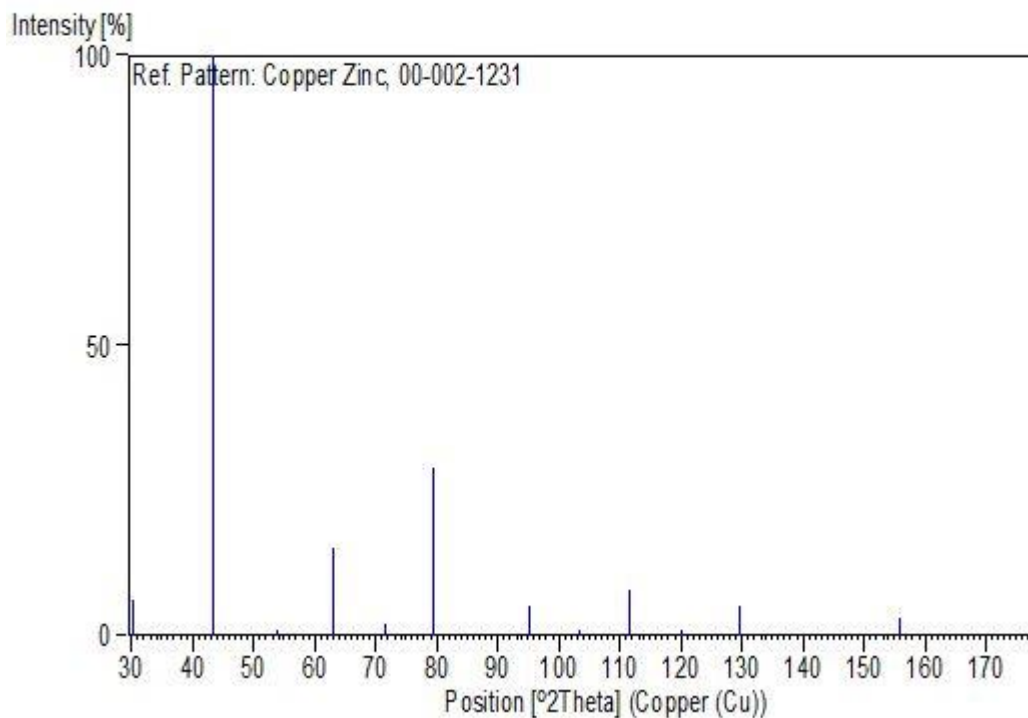
References

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

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	2.95000	30.273	6.0
2	1	1	0	2.08000	43.473	100.0
3	1	1	1	1.70200	53.819	1.0
4	2	0	0	1.47400	63.013	15.0
5	2	1	0	1.31900	71.465	2.0
6	2	1	1	1.20300	79.631	29.0
7	2	2	0	1.04200	95.335	5.0
8	3	0	0	0.98300	103.187	1.0
9	3	1	0	0.93200	111.482	8.0
10	3	1	1	0.88900	120.104	1.0
11	2	2	2	0.85100	129.692	5.0
12	3	2	1	0.78800	155.666	3.0
13	4	0	0	0.73800		4.0

Stick Pattern



12. PDF Card gama

Name and formula

Reference code:	00-025-1228
Compound name:	Copper Zinc
Common name:	g-brass
PDF index name:	Copper Zinc
Empirical formula:	Cu ₅ Zn ₈
Chemical formula:	Cu ₅ Zn ₈

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	I-43m
Space group number:	217
a (Å):	8.8600
b (Å):	8.8600
c (Å):	8.8600
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Calculated density (g/cm 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

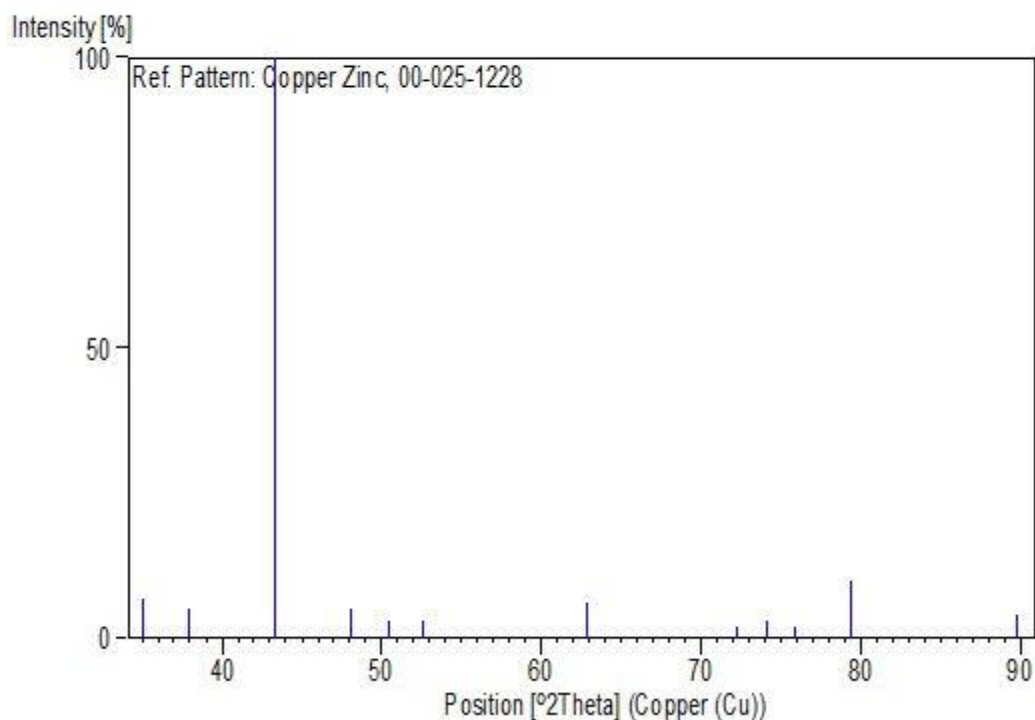
References

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



13. *PDF Card gama₂*

Name and formula

Reference code:	00-024-0003
Compound name:	Aluminum Copper
Common name:	g-brass
PDF index name:	Aluminum Copper
Empirical formula:	Al ₄ Cu ₉
Chemical formula:	Cu ₉ Al ₄

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	P-43m
Space group number:	215
a (Å):	8.7027
b (Å):	8.7027
c (Å):	8.7027
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Calculated density (g/cm ³):	6.85
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	659.12
Z:	4.00

RIR: -

Subfiles and Quality

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

Comments

Creation Date:	1/1/1970
Modification Date:	1/1/1970
Additional Patterns:	See ICSD 1625 (PDF 71-307).

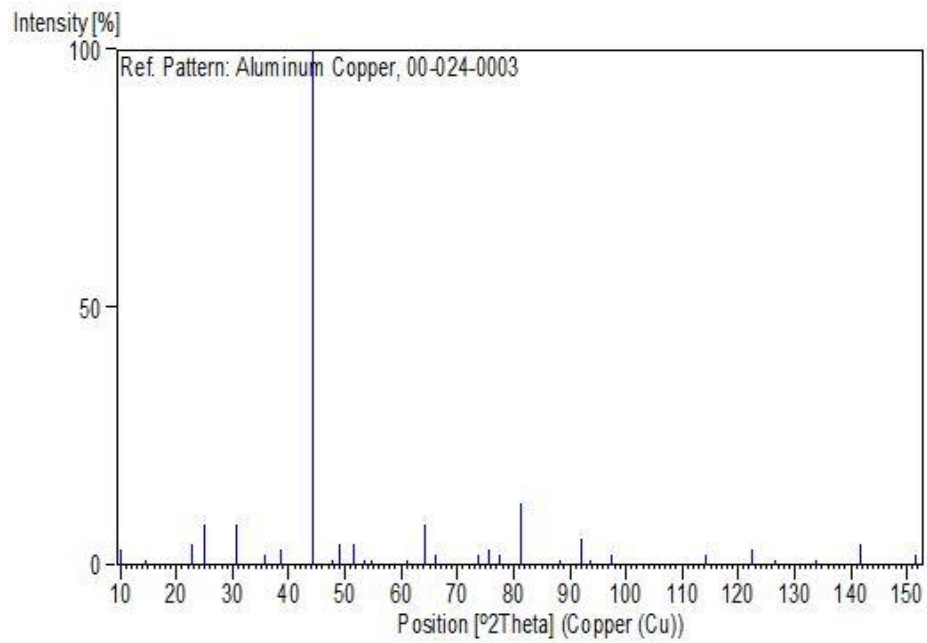
References

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

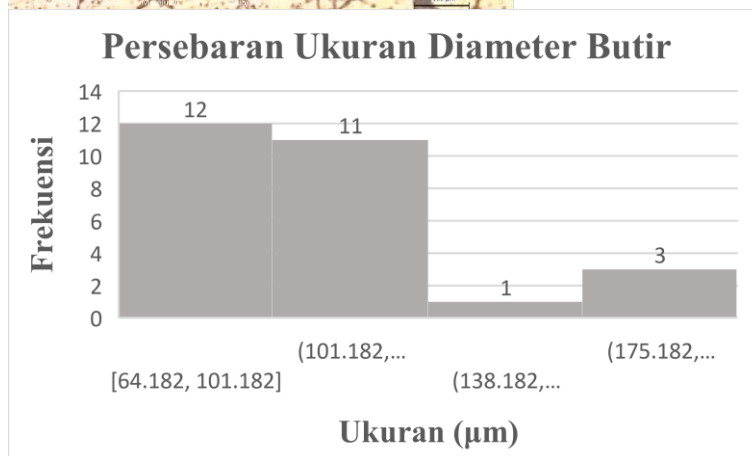
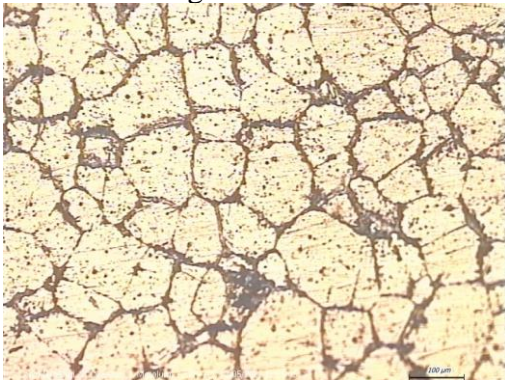
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	8.69881	10.161	3.0
2	1	1	0	6.15412	14.381	1.0
3	2	1	0	3.89030	22.841	4.0
4	2	1	1	3.55330	25.040	8.0
5	3	0	0	2.90060	30.801	8.0
6	2	2	2	2.51160	35.721	2.0
7	3	2	1	2.32590	38.681	3.0
8	3	3	0	2.05090	44.122	100.0
9	4	2	1	1.89900	47.862	1.0
10	3	3	2	1.85530	49.062	4.0
11	4	2	2	1.77620	51.402	4.0
12	5	1	0	1.70660	53.663	1.0
13	5	1	1	1.67490	54.762	1.0
14	4	4	1	1.51500	61.121	1.0
15	6	0	0	1.45030	64.164	8.0
16	6	1	1	1.41160	66.144	2.0
17	6	3	1	1.28320	73.782	2.0
18	4	4	4	1.25620	75.642	3.0
19	5	5	0	1.23060	77.505	2.0
20	7	2	1	1.18440	81.139	12.0
21	6	5	1	1.10530	88.360	1.0
22	7	4	1	1.07120	91.960	5.0
23	8	2	0	1.05530	93.762	1.0
24	6	6	0	1.02560	97.367	2.0
25	9	3	0	0.91730	114.227	2.0
26	7	7	0	0.87910	122.383	3.0
27	10	1	1	0.86170	126.743	1.0
28	10	2	2	0.83740	133.814	1.0
29	8	7	1	0.81510	141.831	4.0
30	10	4	2	0.79440	151.702	2.0

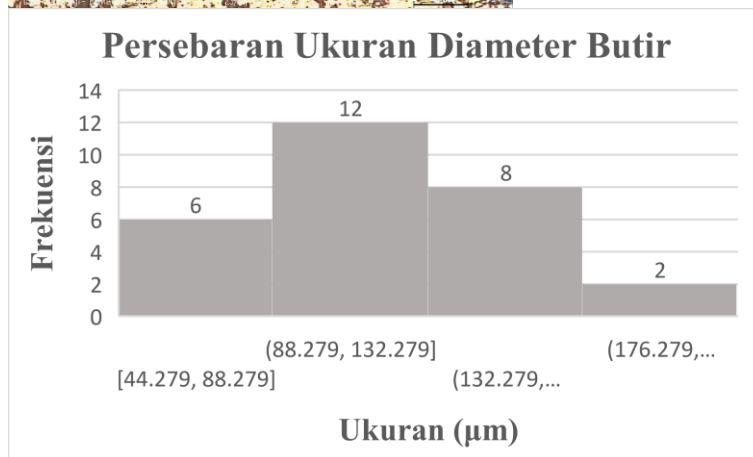
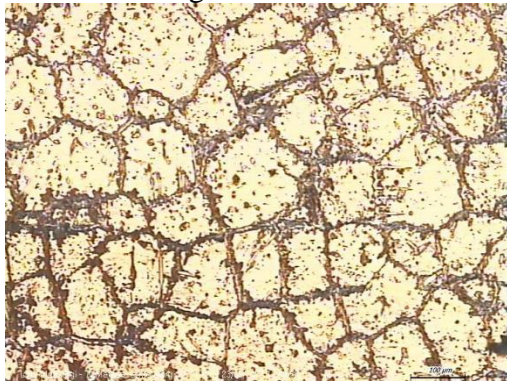
Stick Pattern



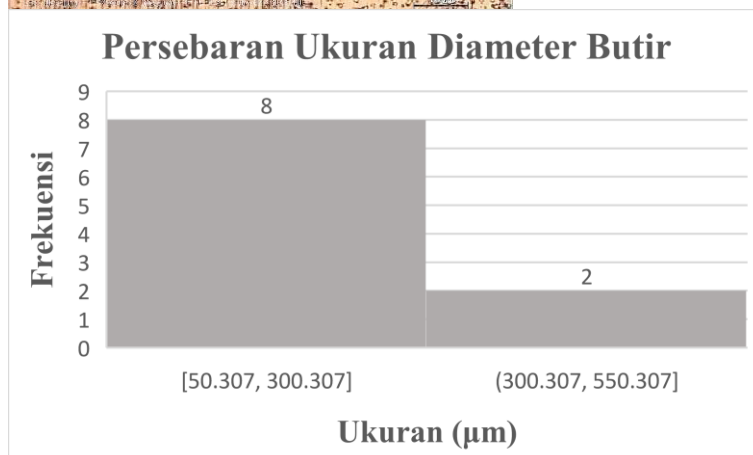
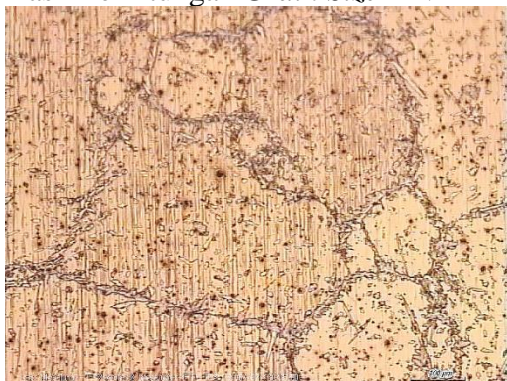
14. Hasil Perhitungan *Grain Size* AN1



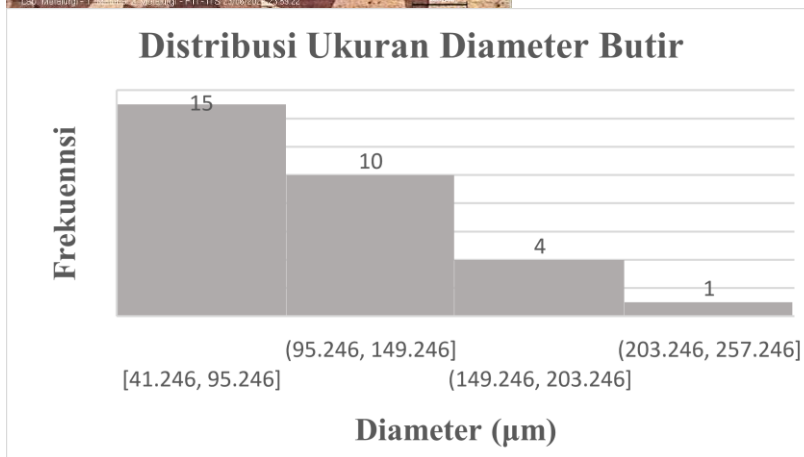
15. Hasil Perhitungan *Grain Size* AN2



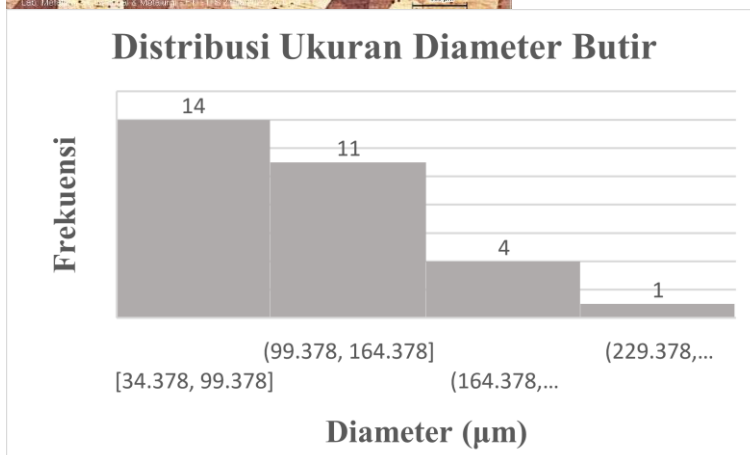
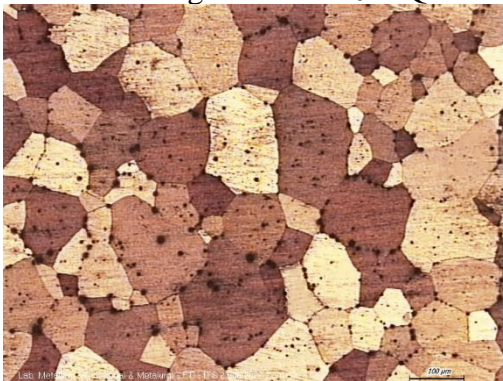
16. Hasil Perhitungan *Grain Size* AN4



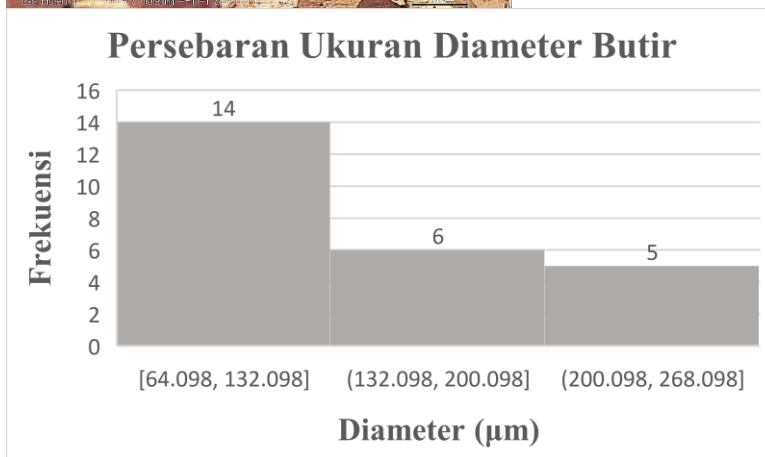
17. Hasil Perhitungan *Grain Size SQA1*



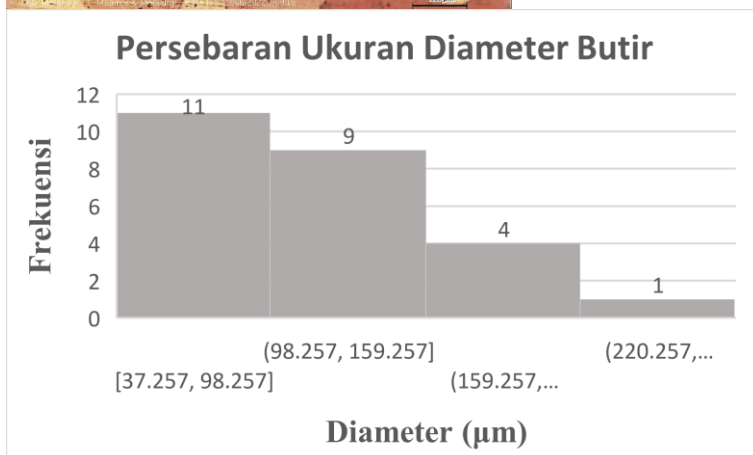
18. Hasil Perhitungan *Grain Size SQA2*



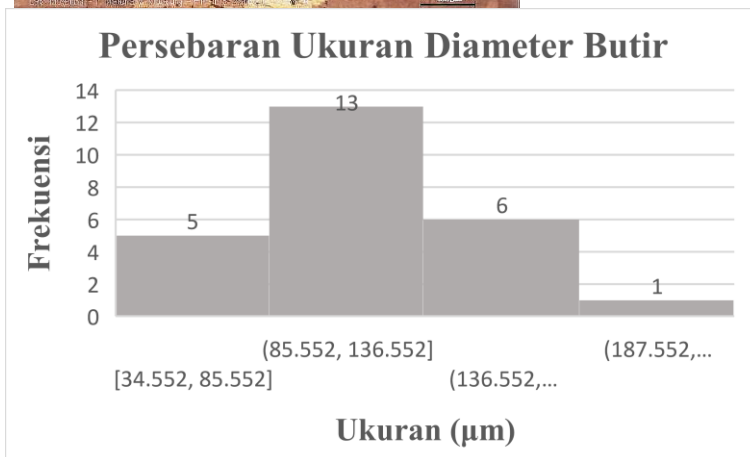
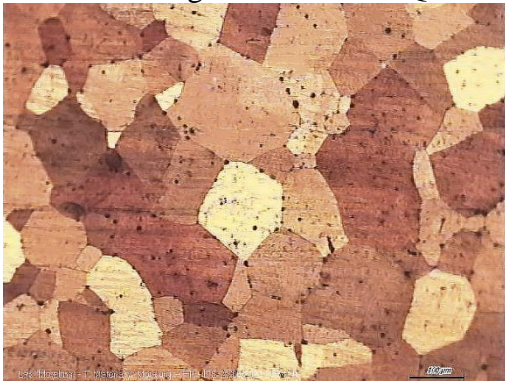
19. Hasil Perhitungan *Grain Size SQA4*



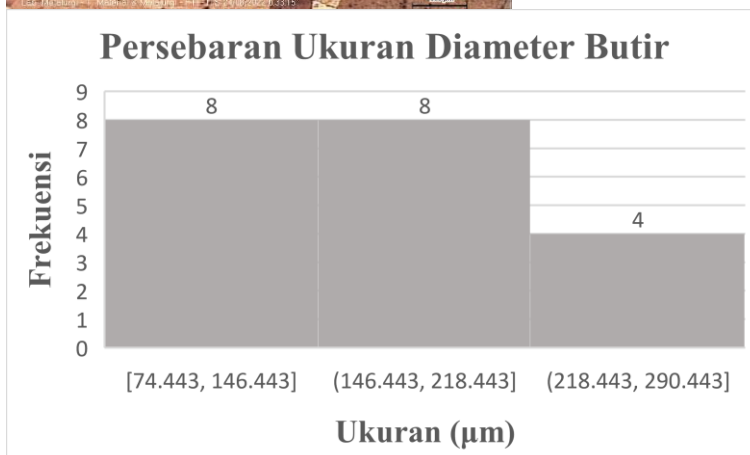
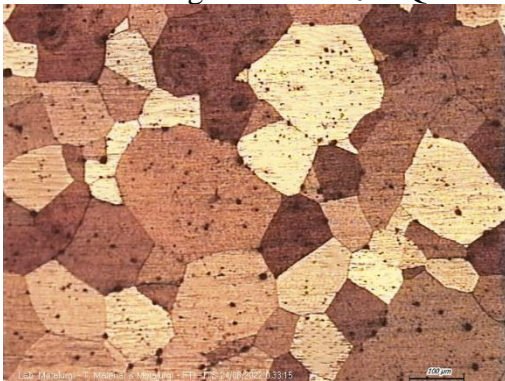
20. Hasil Perhitungan *Grain Size SQO1*



21. Hasil Perhitungan *Grain Size* SQO2



22. Hasil Perhitungan *Grain Size* SQO4



23. Hasil Pengujian Kekerasan

Spesimen	Nilai Kekerasan (HV)				
	Indentasi 1	Indentasi 2	Indentasi 3	Rata-Rata	Standar Deviasi
<i>As Cast</i>	286	289	290	288,334	2,081
AN1	258	262	257	259	2,645
AN2	252	251	248	250,3	2,081
AN3	244	245	246	245	1
AN4	245	236	239	240	4,582
SQA1	285	286	287	286	1
SQA2	273	272	271	272	1
SQA3	266	264	268	266	2
SQA4	259	261	262	260,667	1,527
SQO1	281	282	283	282	1
SQO2	263	266	261	263,334	2,516
SQO3	256	255	257	256	1
SQO4	250	248	252	250	2

23. Perhitungan Temperatur *Martensite Start* (M_s)

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

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

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

$$at\% Zn = 14,927$$

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

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

$$at\% Al = 15,102$$

Perhitungan persamaan 4.1

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

$$M_s(^{\circ}C) = 2212 - 66,9 (14,927) - 90,65 (15,102)$$

$$M_s(^{\circ}C) = -155,826^{\circ}C$$

Perhitungan persamaan 4.2

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

$$M_s(^{\circ}C) = 2212 - 66,9 [1,355(15,102) + 1(14,927)]$$

$$M_s(^{\circ}C) = -155,826^{\circ}C$$

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama proses pengerjaan laporan penelitian Tugas Akhir ini, Penulis mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung Penulis, diantaranya:

1. Allah SWT Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang yang senantiasa memberikan rahmat dan kelancaran kepada Penulis sehingga laporan penelitian Tugas Akhir ini dapat selesai tepat waktu.
2. Ayah, Ibu, dan Abang Evan yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan moral dan materiil kepada Penulis sampai sekarang di tahap perkuliahan.
3. Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pertama yang selalu sabar dalam membimbing dan memberikan ilmu kepada Penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. selaku dosen pembimbing kedua yang selalu sabar dalam membimbing dan memberikan ilmu kepada Penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
5. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang telah membimbing Penulis selama masa perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS.
6. Seluruh dosen Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS yang telah memberikan ilmu yang sangat berguna bagi masa perkuliahan dan masa depan Penulis.
7. 5 CM (Mischell, Alm. Irsyad, Krisna, dan Selsa) yang menjadi sahabat Penulis semenjak semester 1 perkuliahan yang selalu menjadi tempat istirahat dan selalu bersama-sama dengan Penulis dalam senang dan sedih di kondisi apapun selama masa perkuliahan.
8. Fransisca yang menjadi sahabat Penulis sejak COVID-19 yang selalu menjadi teman yang baik, partner Kerja Praktik 1 bulan di Kota Tegal, dan teman Surabaya-an.
9. Ferdy yang menjadi sahabat baru Penulis sekaligus partner Tugas Akhir dan Tugas Besar DPI, teman yang selalu baik dan membantu Penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
10. Alvin, Leon, dan Edric yang menjadi sahabat baru Penulis di semester akhir perkuliahan, teman yang seru, lawak, dan selalu membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir.
11. Pasukan Fundincionco (Ferdy, Rama, Juki, Riza, Nafis, Zain, dan Denby) yang selalu berjuang bersama bersama Penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
12. HMMT FTIRS – ITS kepengurusan serasi dan kontribusi yang telah mmenjadi wadah berkembang dan mengabdikan bagi Penulis selama perkuliahan, khususnya Departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTIRS – ITS.
13. Semua pihak yang telah berkontribusi dalam proses pengerjaan Tugas Akhir yang tidak bisa Penulis sebutkan satu per satu.
Semoga segala kebaikan yang telah diberikan oleh seluruh pihak di atas selalu diberikan keberkahan oleh Allah SWT. Penulis berharap penelitian ini bermanfaat bagi pembaca dan semua pihak yang membutuhkan.

Surabaya, 13 Juli 2022
Penulis

Ezra Elkaar Zainuddin

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis dengan nama Ezra Elkaar Zainuddin lahir di Bogor, 12 Maret 2000 sebagai anak kedua dari dua bersaudara dengan kakak laki-laki yang bernama Evan Eyckman Zainuddin dari orang tua yang bernama Firman Agussetiawan dan Sri Surya Dani. Penulis menempuh pendidikan di SD Negeri Polisi 1 Kota Bogor tahun 2006-2012. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 7 Kota Bogor tahun 2012-2015 dan selanjutnya menempuh pendidikan di SMA Negeri 4 Kota Bogor tahun 2015-2018. Penulis menempuh pendidikan sarjana di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Penulis aktif dalam kegiatan organisasi kampus, yaitu sebagai Kepala Departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTIRS – ITS pada tahun 2021 dan Staff Departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTIRS – ITS pada tahun 2019/2020. Penulis juga pernah memimpin tim KKN Tematik oleh Kemdikbud untuk wilayah Bogor pada bulan Agustus-September tahun 2020. Penulis memiliki pengalaman profesional keprofesional melalui kegiatan Kerja Praktik di PT Barata Indonesia Divisi Sumber Daya Air Tegal pada Divisi *Quality Control* pada bulan Januari tahun 2022.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)