



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TL184834

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* DAN MEDIA
PENDINGIN *STEP QUENCH* PADA PROSES *SOLUTION
TREATMENT* PADUAN Cu-15,9Zn-6,89Al TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

MUHAMMAD FARHAN RYAMIZARD ZAIN
NRP. 02511840000128

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

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



TUGAS AKHIR – TL 184834

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* DAN MEDIA
PENDINGIN *STEP QUENCH* PADA PROSES *SOLUTION
TREATMENT* PADUAN Cu-15,9Zn-6,89Al TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

MUHAMMAD FARHAN RYAMIZARD ZAIN
NRP. 0251184000128

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

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 184834

THE INFLUENCE OF HOLDING TIME VARIATIONS AND COOLING MEDIA STEP QUENCH IN SOLUTION TREATMENT PROCESS OF Cu-15,9Zn-6,89Al ALLOY TO MICROSTRUCTURE AND HARDNESS

MUHAMMAD FARHAN RYAMIZARD ZAIN
NRP. 02511840000128

Supervisors

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

NIP. 195809101986031002

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

NIP. 198805012019031008

Study Program of Material Engineering

Departement of Materials and Metallurgical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

(This page is intentionally left blank)

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* DAN MEDIA PENDINGIN *STEP QUENCH* PADA PROSES *SOLUTION TREATMENT* PADUAN Cu-15,9Zn-6,89Al TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN

TUGAS AKHIR

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

Oleh: **MUHAMMAD FARHAN RYAMIZARD ZAIN**
NRP 02511840000128

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc (Rembimbing I)
2. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T (Pembimbing II)
3. Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc (Penguji)
4. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D (Penguji)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET





THE INFLUENCE OF HOLDING TIME VARIATIONS AND COOLING MEDIA STEP QUENCH IN SOLUTION TREATMENT PROCESS OF Cu-15,9Zn-6,89Al ALLOY TO MICROSTRUCTURE AND HARDNESS

FINAL PROJECT

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

By: **MUHAMMAD FARHAN RYAMIZARD ZAIN**
NRP 02511840000128

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc..... (Advisor) 
2. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T..... (Co-Advisor) 
3. Budi Agung Kumiawan, S.T., M.Sc..... (Examiner) 
4. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D..... (Examiner) 



(This page is intentionally left blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

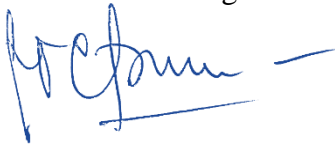
Nama mahasiswa/NRP : M. Farhan Ryamizard Zain/ 02511840000128
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing/NIP : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc./ 195809101986031002

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Varisasi *Holding Time* dan Media Pendingin *Step Quench* Pada Proses *Solution Treatment* Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 12 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing



(Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.)
NIP. 195809101986031002

Mahasiswa



(M. Farhan Ryamizard Zain)
NRP. 02511840000128

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : M. Farhan Ryamizard Zain/ 02511840000128
Departement : Material and Metallurgical Engineering
Advisor/NIP : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc./ 195809101986031002

Hereby declare that the Final Project with the title of “The Influence Of Holding Time Variations and Cooling Media Step Quench In Solution Treatment Process Of Cu-15,9Zn-6,89Al Alloy To Microstructure and Hardness” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 12 July 2022

Acknowledged
Advisor



(Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.)
NIP. 195809101986031002

Student



(M. Farhan Ryamizard Zain)
NRP. 02511840000128

(This page is intentionally left blank)

PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* DAN MEDIA PENDINGIN *STEP QUENCH* PADA PROSES *SOLUTION TREATMENT* PADUAN Cu-15,9Zn-6,89Al TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN

Nama : Muhammad Farhan Ryamizard Zain
NRP : 02511840000128
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Pembimbing II : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstrak

Shape memory alloy adalah grup material logam yang mampu untuk kembali kepada bentuk atau ukuran semula ketika dikenai prosedur pemanasan tertentu. Secara umum, material tersebut dapat dideformasi pada temperatur rendah dan ketika dikenai temperatur yang lebih tinggi akan kembali ke bentuk semula. Fenomena utama yang bertanggung jawab pada karakteristik shape memory alloy adalah perilaku termomekaniknya, yaitu pseudoelasticity dan shape memory effect (one/two way). Fenomena tersebut dipengaruhi oleh fasa austenit dan martensitnya. Paduan SMA yang digunakan dalam penelitian ini adalah Cu-15,9Zn-6,89Al yang didapat melalui proses pengecoran. Proses perlakuan panas yang dilakukan dalam penelitian ini adalah solution treatment dengan variasi holding time 10, 20, dan 30 menit, kemudian dilanjutkan dengan proses step quench dengan variasi media pendingin air dan oli. Pengujian yang dilakukan antara lain Optical Emission Spectroscopy (OES), X-Ray Diffraction (XRD), Differential Scanning Calorimetry (DSC), metalografi, kekerasan, serta pengujian Shape Memory Effect (SME). Struktur mikro yang terbentuk pada seluruh spesimen adalah α , β , dan γ tanpa adanya fasa β' (martensit). Tidak terbentuknya β' (martensit) dikarenakan temperatur martensite start (M_s) berada di bawah temperatur kamar. Ukuran butir terbesar pada spesimen solution treatment adalah $9.309 \mu\text{m}^2$ yang terdapat pada spesimen SQWB30 dan terkecil adalah $6.605 \mu\text{m}^2$ yang terdapat pada spesimen SQOB10. Hal tersebut terjadi dikarenakan semakin lama holding time pada proses solution treatment dan semakin lambat laju pendinginan yang digunakan, maka ukuran butir semakin besar. Sementara itu, spesimen as quench memiliki ukuran butir yang lebih besar dibandingkan dengan spesimen as cast akibat adanya proses annealing pada spesimen as quench. Semakin besar ukuran butir, maka nilai kekerasan dari spesimen semakin rendah. Nilai kekerasan terendah adalah $239,00 \pm 1,63$ HVN yang terdapat pada spesimen SQWB30 dan nilai kekerasan tertinggi adalah $290,67 \pm 1,70$ HVN yang terdapat pada spesimen as cast.

Kata Kunci: *Shape memory alloy, Cu-Zn-Al, solution treatment, step-quench, struktur mikro, kekerasan.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

THE INFLUENCE OF HOLDING TIME VARIATIONS AND STEP QUENCH COOLING MEDIA IN SOLUTION TREATMENT PROCESS OF Cu-15,9Zn-6,89Al ALLOY TO MICROSTRUCTURE AND HARDNESS

Student Name : Muhammad Farhan Ryamizard Zain
NRP : 02511840000128
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Co-Supervisor : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstract

Shape memory alloys are a group of metallic materials that are able to return to their original shape or size when subjected to certain heating procedures. In general, these materials can be deformed at low temperatures and when subjected to higher temperatures will return to their original shape. The main phenomenon responsible for the characteristics of shape memory alloy is its thermomechanical behavior, namely pseudoelasticity and shape memory effect (one/two way). This phenomenon is influenced by the austenite and martensite phases. The SMA alloy used in this research is Cu-15,9Zn-6,89Al obtained through the casting process. The heat treatment process carried out in this research is solution treatment with variations in holding time of 10, 20, and 30 minutes, followed by step-quench process with variations of cooling media water and oil. The tests carried out included Optical Emission Spectroscopy (OES), X-Ray Diffraction (XRD), Differential Scanning Calorimetry (DSC), metallography, hardness, and Shape Memory Effect (SME) testing. The microstructures formed in all specimens are α , β , and γ without the presence of β' (martensite) phase. No formation of β' (martensite) because the martensite start temperature (M_s) is below room temperature. The largest grain size in the solution treatment specimen was $9.309 \mu\text{m}^2$ in the SQWB30 specimen and the smallest was $6.605 \mu\text{m}^2$ in the SQOB10 specimen. This happens because the longer the holding time in the solution treatment process and the slower the cooling rate used, the larger the grain size. Meanwhile, the as quench specimen has a larger grain size than the as cast specimen due to the annealing process on the as quench specimen. The larger the grain size, the lower the hardness value of the specimen. The highest hardness value was 290.67 ± 1.70 HVN found in as cast specimens and the lowest hardness value was 239.00 ± 1.63 HVN found in SQWB30 specimens.

Keywords: *Shape memory alloy, Cu-Zn-Al, solution treatment, step-quench, microstructure, hardness.*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. karena kasih dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul **“Pengaruh Variasi *Holding Time* dan Media Pendingin *Step Quench* Pada Proses *Solution Treatment* Paduan *Cu-15,9Zn-6,89Al* Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan”** untuk memenuhi Mata Kuliah Tugas Akhir sebagai salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

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

1. Allah SWT. yang telah memberikan berkah, rahmat, dan pertolongan kepada penulis sehingga laporan penelitian Tugas Akhir ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya.
2. Kedua orang tua dan keluarga penulis yang tidak pernah berhenti untuk mendoakan, mendukung, membantu, serta memberikan segala yang terbaik dalam kehidupan penulis.
3. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc, selaku dosen pembimbing pertama yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir sekaligus sebagai dosen wali penulis.
4. Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
5. Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS, Bapak Sigit Tri Wicaksono S.Si., M.Si., Ph.D., yang telah membantu proses Tugas Akhir sampai selesai.
6. Kepala Laboratorium Metalurgi Manufaktur DTMM FTIRS – ITS, Bapak Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D., yang telah membantu proses Tugas Akhir sampai selesai.
7. Seluruh Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS yang telah membantu pengerjaan secara teknis dan non-teknis dalam proses penelitian.

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

Surabaya, 12 Juli 2022
Penulis

M. Farhan Ryamizard Zain

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN ORISINALITAS	ix
ABSTRAK	xiii
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.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 <i>Shape Memory Alloy</i>	3
2.1.1 Karakteristik Termomekanik.....	3
2.1.2 <i>Shape Memory Alloy</i> Cu-Zn-Al.....	5
2.1.3 Diagram Fasa Cu-Zn-Al.....	7
2.1.4 Aplikasi.....	11
2.2 Perlakuan Panas.....	12
2.2.1 <i>Homogenizing</i>	12
2.2.2 <i>Annealing</i>	12
2.2.3 <i>Solution Treatment</i>	13
2.3 Pengujian.....	16
2.3.1 Pengujian Komposisi Kimia.....	16
2.3.2 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC).....	16
2.3.3 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	18
2.3.4 Pengujian Metalografi.....	18
2.3.5 Pengujian Kekerasan.....	19
2.3.6 Pengujian <i>Shape Memory Effect</i>	20
2.4 Penelitian Sebelumnya.....	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2 Alat Penelitian.....	26
3.3 Bahan Penelitian.....	30
3.4 Kurva Perlakuan Panas.....	31
3.5 Prosedur Penelitian.....	32
3.5.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Homogenizing</i>	32
3.5.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Annealing</i>	32
3.5.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Solution Treatment</i>	32
3.6 Proses Pengujian.....	32
3.6.1 Pengujian Komposisi Kimia.....	32
3.6.2 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC).....	32
3.6.3 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	33
3.6.4 Pengujian Metalografi.....	33
3.6.5 Pengujian Kekerasan.....	33

3.6.6	Pengujian <i>Shape Memory Effect</i> (SME)	33
3.7	Jadwal Penelitian.....	34
3.8	Rancangan Penelitian	34
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1	Hasil Pengujian Komposisi Kimia.....	35
4.2	Hasil Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> Cu-15,9Zn-6,89Al	35
4.3	Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> Cu-15,9Zn-6,89Al.....	37
4.4	Hasil Pengujian Metalografi Cu-15,9Zn-6,89Al.....	39
4.5	Hasil Pengujian Kekerasan Cu-15,9Zn-6,89Al.....	44
4.6	Hasil Pengujian <i>Shape Memory Effect</i> Cu-15,9Zn-6,89Al.....	46
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	49
	DAFTAR PUSTAKA	51
	LAMPIRAN.....	53
	UCAPAN TERIMA KASIH	81
	BIODATA PENULIS.....	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva regangan-temperatur ($\epsilon \times T$) pada keadaan bebas tegangan	3
Gambar 2.2 Kurva <i>stress-strain</i> pada perilaku superelastis.....	4
Gambar 2.3 Kurva <i>stress-strain</i> pada perilaku <i>one-way shape memory effect</i>	4
Gambar 2.4 Karakteristik termomekanik <i>shape memory alloy</i>	5
Gambar 2.5 Diagram fasa biner	7
Gambar 2.6 Struktur kristal fasa β' kuningan	8
Gambar 2.7 Pengaruh penambahan aluminium terhadap diagram fasa biner Cu-Zn dengan acuan temperatur <i>martensite start</i> sama dengan 0°C	8
Gambar 2.8 Ilustrasi dari diagram fasa terner yang menunjukkan 3 fasa ekulibrium	9
Gambar 2.9 Proyeksi likuidus diagram fasa terner Cu-Zn-Al	10
Gambar 2.10 Potongan isothermal diagram terner Cu-Zn-Al pada temperatur 700°C.....	10
Gambar 2.11 Skema <i>sprinkler</i> yang diaktivasi oleh temperatur	11
Gambar 2.12 Skema kesetimbangan gaya pada <i>bracket</i>	12
Gambar 2.13 Pengaruh temperatur dan waktu tahan <i>solution treatment</i> terhadap ukuran butir	14
Gambar 2.14 Tiga tahap kurva pendinginan.....	15
Gambar 2.15 Kurva pendinginan kontinyu pada variasi media pendingin.....	16
Gambar 2.16 Skema alat <i>power-compensation</i> DSC.....	17
Gambar 2.17 Skema alat <i>heat-flux</i> DSC	17
Gambar 2.18 Difraksi Bragg oleh bidang kristal	18
Gambar 2.19 Skema pengujian Vickers.....	19
Gambar 2.20 Hasil pengujian struktur mikro spesimen: (a.) <i>step quench water boiling</i> dan (b.) <i>step quench oil bath</i> oleh mikroskop optik	20
Gambar 2.21 Mikrograf SEM Cu-25Zn-4Al (a) dan Cu-30Zn-4Al (b) setelah dilakukan proses <i>step quench</i>	21
Gambar 2.22 Mikrograf SEM paduan A (a) dan paduan B (b) perlakuan <i>step quench water boiling</i>	22
Gambar 2.23 Struktur Mikro Paduan Cu-11,9Zn-6,72Al yang dilakukan <i>solution treatment</i> dengan <i>holding time</i> 10 menit (a), 20 menit (b), 30 menit (c), dan 40 menit (d)	23
Gambar 2.24 Struktur mikro Cu-Zn-Al setelah mengalami <i>step-quench</i> dengan; a) <i>oilbath</i> ; b) <i>waterboiling</i>	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2 <i>High temperature furnace</i>	27
Gambar 3.3 <i>Universal Hardness Tester</i> HBRV	28
Gambar 3.4 Mikroskop optik OLYMPUS BX51MRF.....	28
Gambar 3.5 Alat bantu <i>bending</i> dan dimensi (mm).....	29
Gambar 3.6 Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al hasil pengecoran berbentuk balok dengan dimensi 329,96 × 23,28 × 25,31 (mm)	30
Gambar 3.7 Spesimen berbentuk <i>wire</i> dengan diameter 2 mm dan panjang 100 mm (a)., serta <i>plat</i> tipis dengan tebal 15 mm (b).....	30
Gambar 3.8 Kurva Perlakuan Panas	31
Gambar 3.9 Skema pengujian <i>shape memory effect</i>	33
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2 <i>High temperature furnace</i> (Dokumentasi Pribadi, 2022)	27
Gambar 3.3 <i>Universal Hardness Tester</i> HBRV (Dokumentasi Pribadi, 2022).....	28
Gambar 3.4 Mikroskop optik OLYMPUS BX51MRF (Dokumentasi Pribadi, 2022)	28

Gambar 3.5 Alat bantu <i>bending</i> dan dimensi (mm) (Dokumentasi Pribadi, 2022).....	29
Gambar 3.6 Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al hasil pengecoran berbentuk balok dengan dimensi 329,96 × 23,28 × 25,31 (mm) (Dokumentasi Pribadi, 2022).....	30
Gambar 3.7 Spesimen berbentuk <i>wire</i> dengan diameter 2 mm dan panjang 100 mm (a)., serta <i>plat</i> tipis dengan tebal 15 mm (b). (Dokumentasi Pribadi, 2022)	30
Gambar 3.8 Kurva Perlakuan Panas	31
Gambar 3.9 Skema pengujian <i>shape memory effect</i> (Chanmuang et al., 2018).....	33
Gambar 4.1 Grafik hasil pengujian DSC pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen SQWB30	35
Gambar 4.2 Grafik hasil pengujian DSC pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen SQOB30	36
Gambar 4.3 Hasil pengujian XRD paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen <i>as cast</i> , SQWB10, SQWB20, dan SQWB30	37
Gambar 4.4 Hasil pengujian XRD paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen <i>as cast</i> , SQOB10, SQOB20, dan SQOB30.....	38
Gambar 4.5 Struktur mikro paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen <i>as cast</i> dengan perbesaran 100×	40
Gambar 4.6 Struktur mikro paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen <i>as quench</i> : (a). SQWB10, (b). SQWB20, dan (c). SQWB30 dengan perbesaran 100×	41
Gambar 4.7 Struktur mikro paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen <i>as quench</i> SQOB10, SQOB20, dan SQOB30 dengn perbesaran 100×	42
Gambar 4.8 Grafik ukuran area butir (μm^2) paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada sepsimen <i>as cast</i> dan <i>as quench</i> variasi <i>holding time solution treatment</i> 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin <i>step quench</i> air dan oli.....	43
Gambar 4.9 Grafik nilai rata-rata kekerasan (HV) paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen <i>as cast</i> dan <i>as quench</i> variasi <i>holding time solution treatment</i> 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin <i>step quench</i> air dan oli.....	45

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Cu-Zn-Al	6
Tabel 2.2 Sifat Paduan Cu-Zn-Al	6
Tabel 3.1 Jadwal Penelitian	34
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian.....	34
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Cu-Zn-Al	35
Tabel 4.2 Temperatur transformasi pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen SQWB30 dan SQOB30	37
Tabel 4.3 Posisi <i>peak</i> teridentifikasi dalam 2 theta (°) pada spesimen <i>as cast</i> , SQWB10, SQWB20, dan SQWB30.....	38
Tabel 4.4 Posisi <i>peak</i> teridentifikasi dalam 2 theta (°) pada spesimen <i>as cast</i> , SQOB10, SQOB20, dan SQOB30	39
Tabel 4.5 Hasil pengukuran area butir (μm) ² paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen <i>as cast</i> dan <i>as quench</i> variasi <i>holding time solution treatment</i> 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin <i>step quench</i> air dan oli	43
Tabel 4.6 Hasil pengujian kekerasan (HV) paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen <i>as cast</i> dan <i>as quench</i> variasi <i>holding time solution treatment</i> 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin <i>step quench</i> air dan oli.....	45
Tabel 4.7 Hasil pengujian <i>shape memory effect</i> pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen <i>as quench</i>	47

(Halaman ini sengaja dikosngkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Shape memory alloy adalah grup material logam yang menunjukkan kemampuan untuk kembali kepada bentuk atau ukuran semula ketika dikenai prosedur pemanasan tertentu. Fenomena utama yang bertanggung jawab pada karakteristik *shape memory alloy* adalah perilaku termomekaniknya, yaitu *pseudoelasticity* atau *superelasticity* dan *shape memory effect (one/two way)*. Fenomena tersebut sangat dipengaruhi oleh fasa austenit dan martensitnya (Savi et al., 2016).

Shape memory alloy memiliki berbagai aplikasi di bidang *engineering*, salah satunya adalah aktuator termal. Prinsip kerja aktuator termal dapat digunakan pada *sprinkler* pemadam api. Secara umum, *sprinkler* terdiri atas aktuator dengan *frangible bolt* dan elemen *shape memory*, saluran fluida bertekanan yang ditutup dengan *poppet*, dan *bracket* yang menyangga *poppet*. Gaya yang diberikan *frangible bolt* dan *bracket* adalah berlawanan arah gaya fluida bertekanan, sehingga komponen-komponen tersebut bekerja saling meniadakan gaya dan kesetimbangan gaya tercapai. Ketika temperatur dari elemen *shape memory* mencapai atau melebihi temperatur yang dirancang, maka elemen *shape memory* ini akan memanjang dan memberikan tegangan tarik pada *frangible bolt* sehingga menyebabkan baut tersebut patah. Akibatnya, kesetimbangan gaya tidak tercapai dan katup terbuka (Johnson et al., 2014).

Diketahui banyak paduan yang menunjukkan *shape memory effect*, namun hanya beberapa saja yang telah mencapai level komersial. Diantaranya adalah paduan Ni-Ti dan paduan berbasis tembaga. Paduan berbasis tembaga memiliki beberapa kelebihan dibandingkan paduan Ni-Ti, diantaranya adalah harga yang jauh lebih murah, bisa dilelehkan dan diekstrusi di udara dengan mudah, dan memiliki rentang temperatur transformasi yang lebar. Akan tetapi, paduan *shape memory alloy* berbasis tembaga memiliki kelemahan utama, yaitu tidak stabil pada temperatur yang relatif tinggi (ASM International, 1990a). Hal tersebut memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan efek *shape memory* dan perubahan temperatur transformasi (Asanovic et al., 2004). Hal ini dapat merugikan karena pengaplikasian dari karakteristik *shape memory effect* membutuhkan temperatur transformasi yang stabil untuk mendorong aksi mekanis seperti yang telah didesain. Perubahan temperatur transformasi martensit ini dikenal dengan istilah stabilisasi martensit (Chandrasekaran et al., 1995). Stabilisasi martensit ditandai dengan meningkatnya temperatur transformasi *reverse martensite* yang merupakan efek degradasi dari *shape memory* (Leu & Hu, 1991). Sehingga stabilisasi martensit dapat mencegah transformasi martensit ke austenit (Lopez-Ferreño et al., 2013).

Berbagai variasi metode perlakuan panas telah diteliti untuk meningkatkan karakteristik *shape memory alloy* berbasis tembaga. Salah satu metode untuk mencegah stabilisasi martensit adalah melalui *step quench* (Qixuan & Hsu, 1987). Proses *step quench* dilakukan dengan mendinginkan material yang sebelumnya telah diberi perlakuan *solution treatment* pada temperatur di atas temperatur kamar dan ditahan pada temperatur tersebut selama waktu tertentu, kemudian mendinginkannya kembali ke temperatur kamar. Mengingat pada umumnya efek *shape memory* sangat dipengaruhi oleh banyaknya jumlah martensit yang terbentuk pada struktur mikro, maka laju pendinginan perlu diperhatikan untuk mencapai *critical cooling rate* pembentukan martensit. Oleh karena itu, media pendingin yang digunakan akan berpengaruh terhadap efek *shape memory* yang terbentuk (Ramadhani et al., 2020). Salah satu faktor yang mempengaruhi laju pendinginan pada media pendingin adalah *bath temperature* (Bates et al., 1985). Media pendingin berbeda memiliki respon berbeda terhadap *bath temperature*, sehingga nantinya akan mempengaruhi karakteristik pendinginan *step quench*. Selain itu, karakteristik dari *shape memory alloy* juga dipengaruhi oleh variasi perlakuan pada *solution treatment*.

Proses *solution treatment* melibatkan proses difusi, dimana bersifat *thermal activated* dan *time dependent* (Thelning, 1984). Sehingga variasi lamanya *holding time* pada proses *solution treatment* akan menghasilkan perbedaan pada struktur mikro dan karakteristik *shape memory alloy* yang dihasilkan.

Dikarenakan minimnya penelitian terkait *shape memory alloy* Cu-Zn-Al dan masih banyaknya peluang untuk mengembangkan penelitian di bidang tersebut, maka dari itu penelitian ini membahas tentang pengaruh variasi *holding time* dan media pendingin *step quench* pada proses *solution treatment* terhadap struktur mikro dan kekerasan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah yang dianalisis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi *holding time* dan media pendingin *step quench* pada proses *solution treatment* paduan Cu-15,9Zn-6,89Al terhadap struktur mikro.
2. Bagaimana pengaruh variasi *holding time* dan media pendingin *step quench* pada proses *solution treatment* paduan Cu-15,9Zn-6,89Al terhadap kekerasan.

1.3 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesimen dianggap homogen, bebas cacat, dan komposisi kimia sesuai dengan *ASM Handbook Volume 2*.
2. Waktu pengeluaran spesimen dari *furnace* saat perlakuan panas dianggap sama.
3. Pengaruh lingkungan saat perlakuan panas diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Menganalisis pengaruh variasi *holding time* dan media pendingin *step quench* pada proses *solution treatment* paduan Cu-15,9Zn-6,89Al terhadap struktur mikro.
2. Menganalisis pengaruh variasi *holding time* dan media pendingin *step quench* pada proses *solution treatment* paduan Cu-15,9Zn-6,89Al terhadap kekerasan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi untuk pengembangan ilmu terkait pengaruh perlakuan panas pada paduan Cu-Zn-Al dan dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu teknologi khususnya di bidang Teknik Material dan Metalurgi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Shape Memory Alloy*

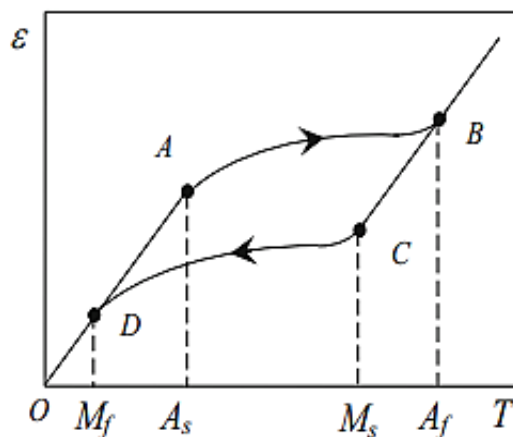
Shape memory alloy adalah grup material logam yang menunjukkan kemampuan untuk kembali kepada bentuk atau ukuran semula ketika dikenai prosedur pemanasan tertentu. Secara umum, material tersebut dapat di deformasi pada temperatur rendah dan ketika dikenai temperatur yang lebih tinggi akan kembali ke bentuk semula (ASM International, 1990a).

Shape memory alloy pertama kali ditemukan oleh Arne Ölander pada tahun 1932, dan istilah *shape memory* pertama kali dideskripsikan oleh Vernon pada tahun 1941. Pada tahun 1962, William Buehler dan Fredrick Wang menemukan *shape memory effect* pada nickel-titanium (NiTi) yang juga dikenal sebagai Nitinol. Sejak saat itu *shape memory alloy* mulai diminati di dunia teknik dan aplikasinya mulai meningkat di beberapa bidang (ASM International, 1990a).

2.1.1 Karakteristik Termomekanik

Fenomena utama yang bertanggung jawab pada karakteristik *Shape Memory Alloy* adalah perilaku termomekaniknya, yaitu *pseudoelasticity* atau *superelasticity* dan *shape memory effect (one/two way)*. Fenomena tersebut dipengaruhi oleh fasa austenit dan martensitnya. Fasa martensit memiliki beberapa varian sedangkan fasa austenit hanya satu. A_s dan A_f masing-masing merupakan temperatur mulai dan selesainya transformasi austenit, sedangkan M_s dan M_f merupakan temperatur mulai dan selesainya transformasi martensit (Savi et al., 2016).

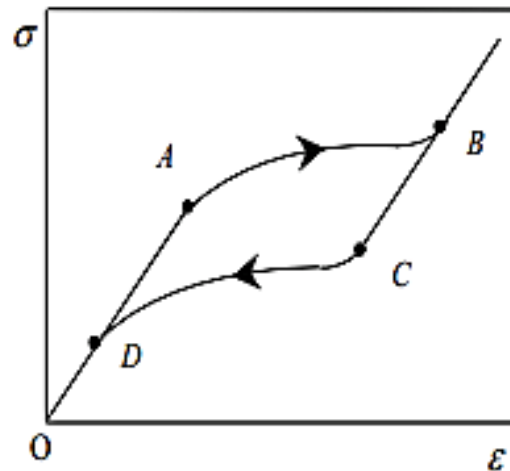
Transformasi pada keadaan bebas tegangan ditunjukkan oleh Gambar 2.1. Pada temperatur di bawah M_f , sampel berada di fasa martensit (*twinned martensite*) yang terdiri dari beberapa varian. Dengan menaikkan temperatur, martensit mulai berubah menjadi austenit pada temperatur A_s (titik A) dan selesai pada temperatur A_f (titik B). Dengan menurunkan temperatur, *reverse transformation* dimulai pada temperatur M_s (titik C) dan selesai pada temperatur M_f (titik D). Karena temperatur transformasi pada tiap fasa berbeda, maka transformasi bersifat *dissipative hysteretic* (Savi et al., 2016).



Gambar 2.1 Kurva regangan-temperatur ($\epsilon \times T$) pada keadaan bebas tegangan (Savi et al., 2016)

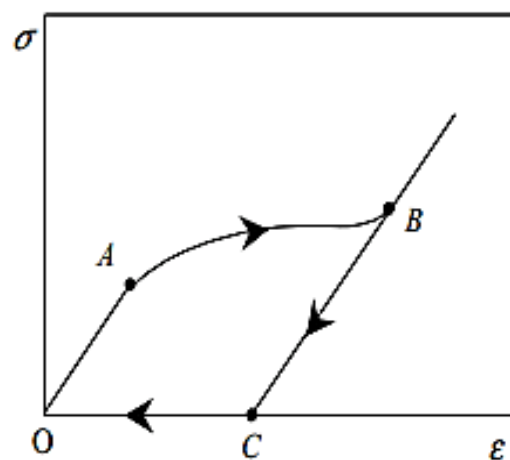
Pseudoelasticity atau *superelasticity* terjadi ketika SMA berada di atas temperatur A_f . Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2, beban mekanis menyebabkan respon elastik yang linier sampai nilai kritis tercapai (titik A) ketika transformasi martensit (austenit menjadi martensit) terjadi dan selesai pada titik B. Pada titik B, struktur kristal pada sampel seluruhnya

merupakan *detwinned martensite* (varian tunggal). Untuk nilai tegangan yang lebih tinggi, SMA kembali menunjukkan respon elastik yang linier. Ketika beban dihilangkan, sampel menunjukkan *elastic recovery* pada titik B ke C. Sedangkan dari titik C ke D, *reverse martensitic transformation* (martensit ke austenit) terjadi. Oleh karena itu, sampel akan menunjukkan sifat elastisnya selama penurunan tegangan. Ketika proses pembebanan dan pelepasan beban selesai, SMA tidak memiliki regangan sisa. Jalur *forward martensitic transformation* tidak akan sama dengan jalur *reverse martensitic transformation*, sehingga terbentuklah kurva *hysteresis* yang menunjukkan adanya kehilangan energi (Savi et al., 2016).



Gambar 2.2 Kurva *stress-strain* pada perilaku superelastis (Savi et al., 2016)

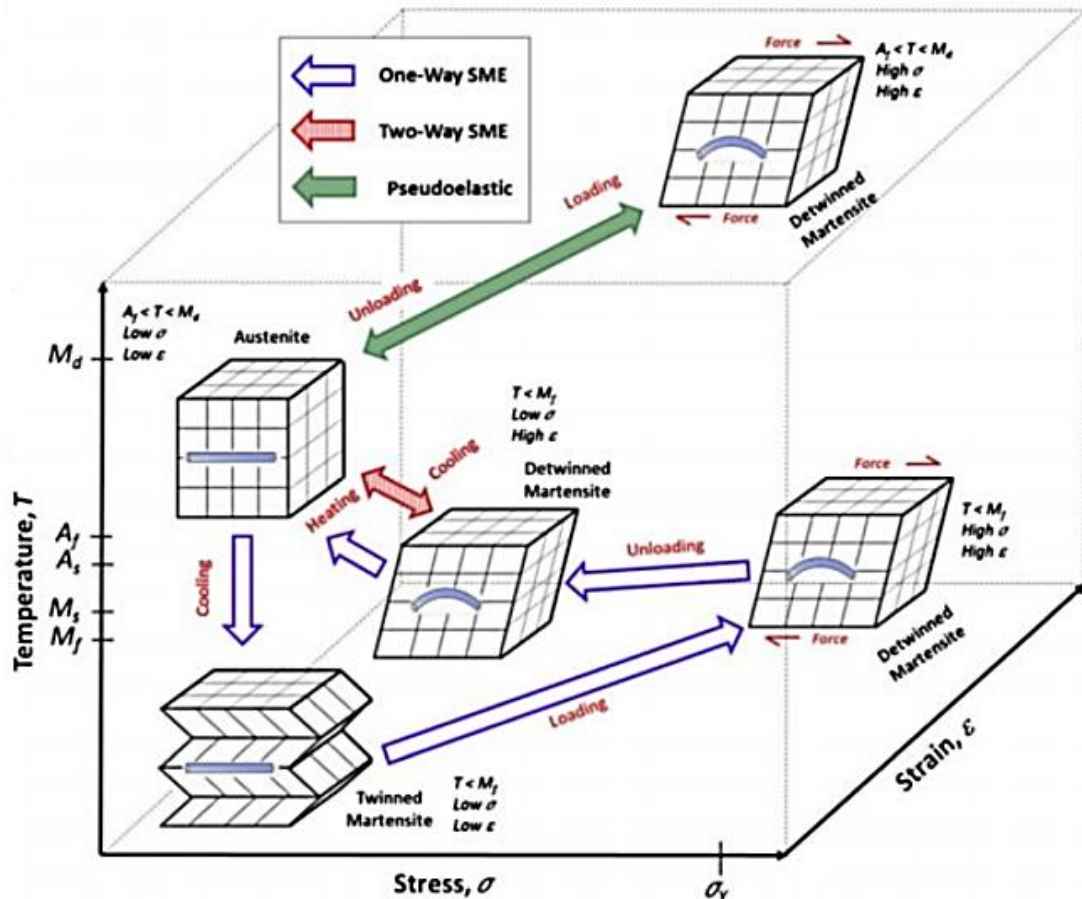
Sementara itu, *shape memory effect* terjadi pada temperatur di bawah A_s . Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3, ketika sampel berada pada $T < M_f$ diberikan beban mekanis, sampel akan mencapai nilai kritis di titik A. Pada tahap ini proses reorientasi dari *twinned martensite* ke *detwinned martensite* dimulai dan akan selesai di titik B. Ketika proses pembebanan selesai, sampel menunjukkan *elastic recovery* pada titik B ke C. Akan tetapi, sampel SMA masih menunjukkan regangan sisa (titik C). Regangan sisa ini dapat dipulihkan dengan pemanasan yang menyebabkan transformasi fasa berbalik dari *detwinned martensite* ke austenit. Transformasi ini dikenal dengan SME satu arah (Savi et al., 2016).



Gambar 2.3 Kurva *stress-strain* pada perilaku *one-way shape memory effect* (Savi et al., 2016)

Sedangkan pada SME dua arah, fasa martensit dan fasa austenit memiliki bentuk yang berbeda. Perbedaan bentuk ini didapat tanpa melalui proses pembeban mekanis, melainkan hanya dari perubahan temperatur (Savi et al., 2016).

Adapun perbedaan karakteristik termomekanik dari *shape memory alloy* tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.4 sebagai berikut (Mohd. Jani et al., 2014).



Gambar 2.4 Karakteristik termomekanik *shape memory alloy* (Mohd. Jani et al., 2014)

2.1.2 Shape Memory Alloy Cu-Zn-Al

Diketahui banyak paduan yang menunjukkan *shape memory effect*, namun hanya beberapa saja yang telah mencapai level komersial. Diantaranya adalah paduan Ni-Ti dan paduan berbasis tembaga. Paduan Ni-Ti bersifat lebih aplikatif dibandingkan paduan berbasis tembaga dikarenakan memiliki beberapa kelebihan, diantaranya memiliki regangan *shape memory* lebih baik (diatas 8%) dari pada paduan berbasis tembaga yang hanya 4-5% saja, lebih stabil terhadap pemanasan, lebih tahan terhadap korosi dibanding paduan berbasis tembaga yang rentan terhadap *stress-cracking corrosion*, dan memiliki keuletan yang lebih tinggi. Akan tetapi, paduan berbasis tembaga memiliki harga yang jauh lebih murah, dapat dilelehkan dan diekstrusi di udara dengan mudah, dan memiliki rentang temperatur transformasi yang lebih lebar (ASM International, 1990a).

Proses peleburan paduan logam biasanya menggunakan mesin pelelehan induksi. Selain itu, fluks pelindung juga ditambahkan pada proses pengecoran untuk mengikat zat - zat pengotor dan menahan unsur tertentu (ASM International, 1988). Fluks CUPRIT-49 umum digunakan untuk pengecoran kuningan, yang mana memiliki fungsi khusus untuk menghindari hilangnya berat seng karena evaporasi akibat jauhnya perbedaan temperatur *melting* antara

tembaga dan seng. Fluks jenis ini juga dapat mencegah kontaminasi lelehan oleh atmosfer di dalam *furnace*, melindungi paduan dari oksidasi dengan membentuk lapisan pelindung di permukaan *molten metal*, dan mencegah terbentuknya busa yang dihasilkan seng (Brown, 1999).

Paduan Cu-Zn-Al akan menunjukkan sifat *shape memory effect* apabila memiliki rentang komposisi seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.1 berikut (ASM International, 1990a).

Tabel 2.1 Komposisi Cu-Zn-Al (ASM International, 1990a)

Unsur	Komposisi
Cu	65-80 %
Zn	10-30 %
Al	5-10 %

Paduan Cu-Zn-Al memiliki temperatur transformasi yang bervariasi dari -180°C sampai 200°C sebagai hasil dari perubahan sangat kecil pada komposisi (ASM International, 1990a). Sedikit perubahan komposisi, baik zinc atau aluminium (misal $\pm 0,5\%$), dapat menggeser temperatur transformasi sebesar $\pm 50^{\circ}\text{C}$ (Archekar, 2007). Menurut *ASM Metal Handbook Volume 2*, temperatur *martensite start* (M_s) pada paduan Cu-Zn-Al dapat ditentukan secara teoritis melalui perhitungan dengan menggunakan Persamaan 2.1 sebagai berikut (ASM International, 1990a).

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66.9(\text{at. \%Zn}) - 90.65(\text{at. \%Al}) \dots \dots \dots (2.1)$$

Adapun menurut *Engineering Aspect of Shape Memory Alloy*, temperatur *martensite start* (M_s) dapat ditentukan secara teoritis melalui perhitungan dengan menggunakan Persamaan 2.2 sebagai berikut (Duerig & Melton, 1990).

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66.9[1,355(\text{at. \%Al}) + 1(\text{at. \%Zn})] \dots \dots \dots (2.2)$$

Sifat paduan Cu-Zn-Al dapat dilihat pada Tabel 2.2 sebagai berikut (ASM International, 1990a).

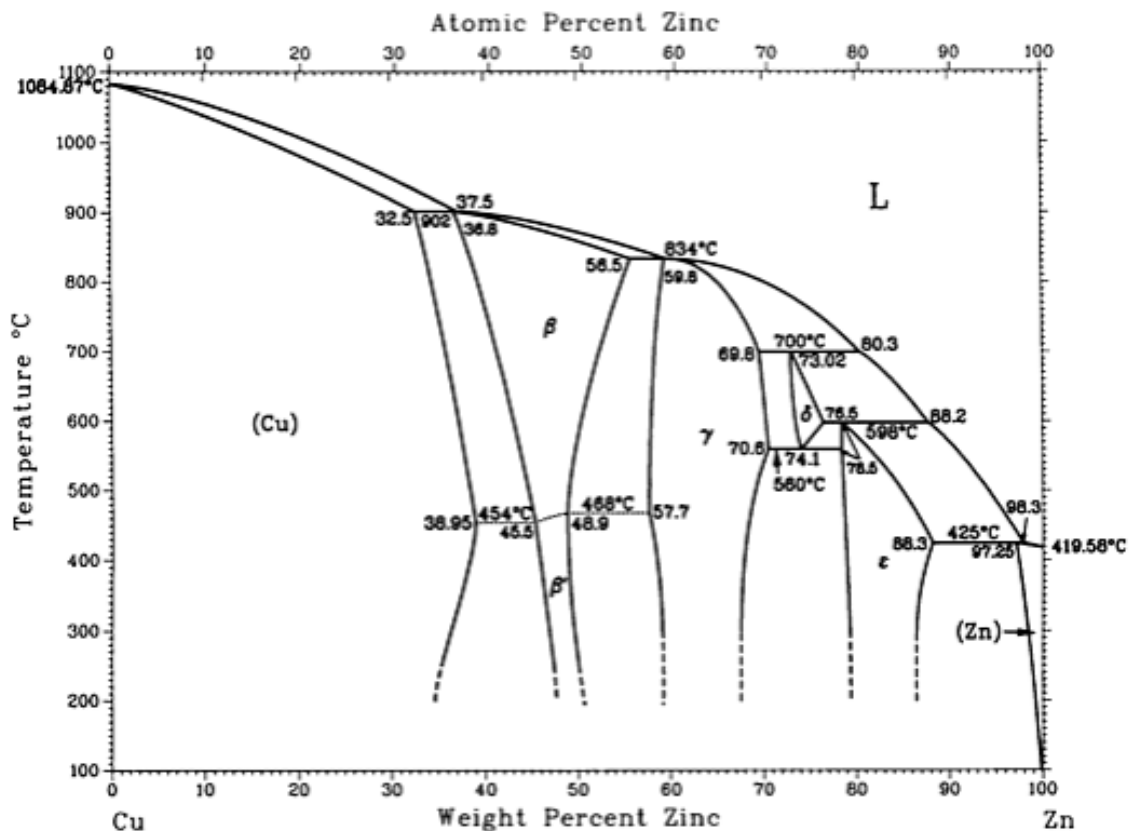
Tabel 2.2 Sifat Paduan Cu-Zn-Al (ASM International, 1990a)

Sifat	Nilai
Temperatur leleh ($^{\circ}\text{C}$)	950 – 1020
Densitas (g/cm^3)	7,64
Resistivitas ($\mu\Omega.\text{cm}$)	8,5 – 9,7
Konduktivitas Termal ($\text{W}/\text{m}.\text{^{\circ}\text{C}}$)	120
Kapasitas panas (J/kg)	400
Modulus Young (GPa) Fasa β	72
Modulus Young (GPa) Martensit	70
Kekuatan Luluh (MPa) Fasa β	350
Kekuatan Luluh (MPa) Martensit	80
Kekuatan Tarik Maksimum (MPa)	600
Temperatur Transformasi ($^{\circ}\text{C}$)	<120
Regangan Elastis (%)	4
Hysteresis ($\Delta^{\circ}\text{C}$)	15 – 25

2.1.3 Diagram Fasa Cu-Zn-Al

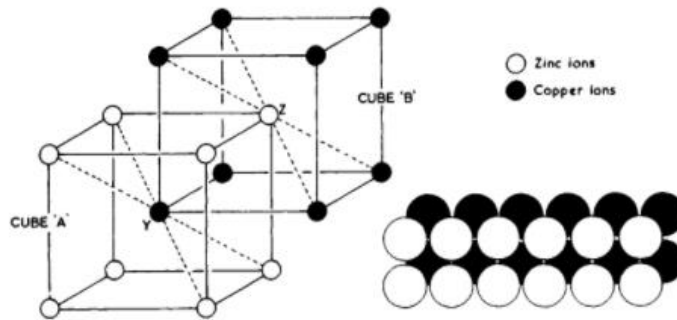
Diagram terner paduan Cu-Zn-Al berasal dari diagram fasa biner Cu-Zn, Cu-Al, dan Al-Zn. Karena Cu-Zn merupakan paduan utama pada sistem terner Cu-Zn-Al, maka transformasi fasa dapat diamati melalui diagram fasa biner Cu-Zn dengan penambahan Al.

Dapat dilihat pada Gambar 2.5 bahwa dalam pendinginan ekuilibrium, tembaga dapat melarutkan zinc hingga 32,5% pada temperatur solidus 902°C dan porsinya akan maksimal sebanyak 39% pada temperatur 454°C. Pada temperatur ruang, tembaga dapat melarutkan zinc sebanyak 39% apabila didinginkan dengan laju pendinginan yang umum digunakan pada industri. Larutan padat yang terbentuk direpresentasikan dengan simbol α . Fasa α memiliki sifat yang lunak dan tangguh. Karena transformasi pada *solid solution* tidak teratur, maka pembentukan fasa α rentan terhadap fenomena *coring*. Jika jumlah zinc naik melewati 39%, fasa *intermediate* β' yang ekuivalen dengan CuZn akan timbul pada struktur mikro apabila dilakukan pendinginan lambat. Fasa ini keras tetapi cukup tangguh pada temperatur ruang dan bersifat plastis apabila berubah menjadi β pada temperatur 454°C (Higgins, 1973).



Gambar 2.5 Diagram fasa biner (ASM International, 1992)

Tidak sama dengan tembaga yang memiliki struktur kristal FCC dan zinc yang memiliki struktur HCP, β' memiliki struktur yang dideskripsikan sebagai BCC walaupun tidak dapat dikatakan sepenuhnya tepat karena BCC mendeskripsikan struktur dimana semua atom sama. Struktur β' memiliki tipe serupa dengan caesium chloride dimana digambarkan oleh Gambar 2.6. Karena tembaga dan zinc menempati posisi yang tetap, maka tidak terjadi fenomena *coring* pada saat pembentukan β' (Higgins, 1973).



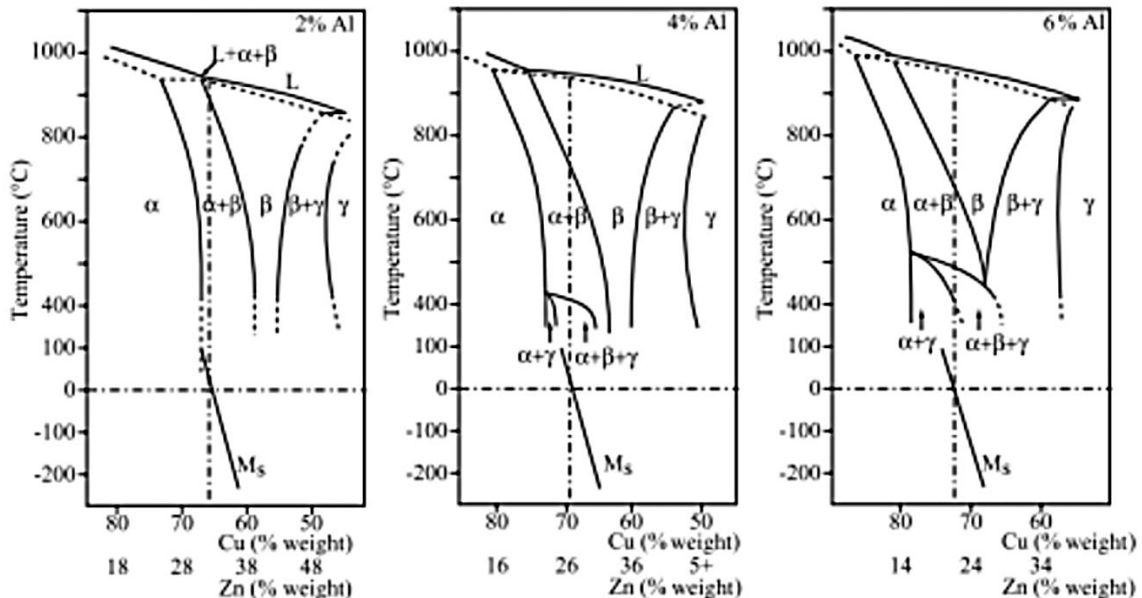
Gambar 2.6 Struktur kristal fasa β' kuningan (Higgins, 1973)

Apabila fasa β' didinginkan secara sangat lambat, maka transformasi eutektoid dapat terjadi pada temperatur 240°C menghasilkan fasa $\alpha+\gamma$. Akan tetapi apabila kuningan yang mengandung β' didinginkan dengan laju pendinginan yang umum digunakan pada industri, maka β' tetap berada sampai temperatur kamar. Lebih lanjut, kandungan zinc di atas 50% akan menimbulkan fasa γ yang memiliki sifat sangat getas (Higgins, 1973).

Sistem terner paduan Cu-Zn-Al pada dasarnya merupakan paduan Cu-Zn dengan penambahan unsur ketiga berupa aluminium. Ekuivalensi zinc terhadap aluminium adalah enam, dimana 1% Al memiliki efek yang sama dengan 6% zinc ($1\text{Al} = 6\text{Zn}$) (West, 1982). Ekuivalensi zinc dapat diketahui untuk *shape memory alloy* Cu-Zn-Al melalui Persamaan 2.3 sebagai berikut (Greaves & Wrington, 1971).

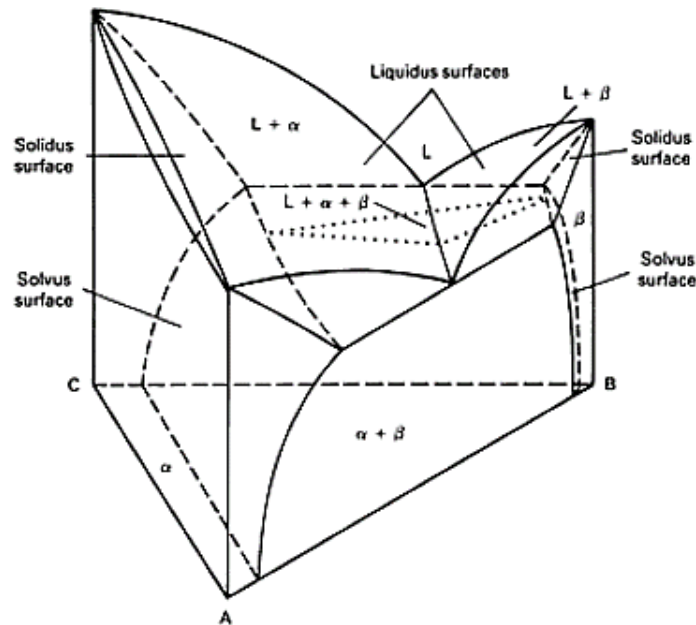
$$\text{Ekuivalensi Zinc} = \frac{\% \text{Zn} + 6 \times \% \text{Al} \times 100}{\% \text{Cu} + \% \text{Zn} + 6 \times \text{Al}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Adapun pengaruh penambahan Al terhadap diagram fasa biner Cu-Zn dapat diamati melalui Gambar 2.7 sebagai berikut (Lexcelent, 2013).



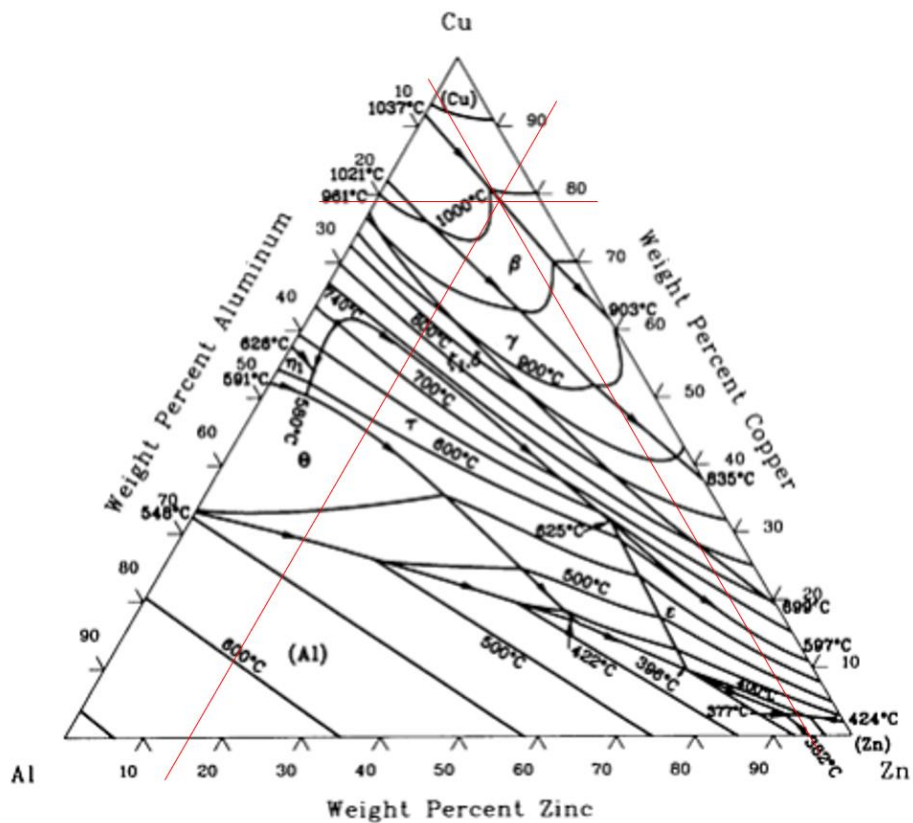
Gambar 2.7 Pengaruh penambahan aluminium terhadap diagram fasa biner Cu-Zn dengan acuan temperatur *martensite start* sama dengan 0°C (Lexcelent, 2013)

Diagram fasa biner Cu-Zn dengan penambahan Al di atas hanya dapat menggambarkan transformasi fasa hanya dengan komposisi Al tertentu. Oleh karena itu, dibuatlah diagram terner yang merupakan diagram modifikasi yang berbentuk proyeksi isometrik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8 berikut (ASM International, 1992).

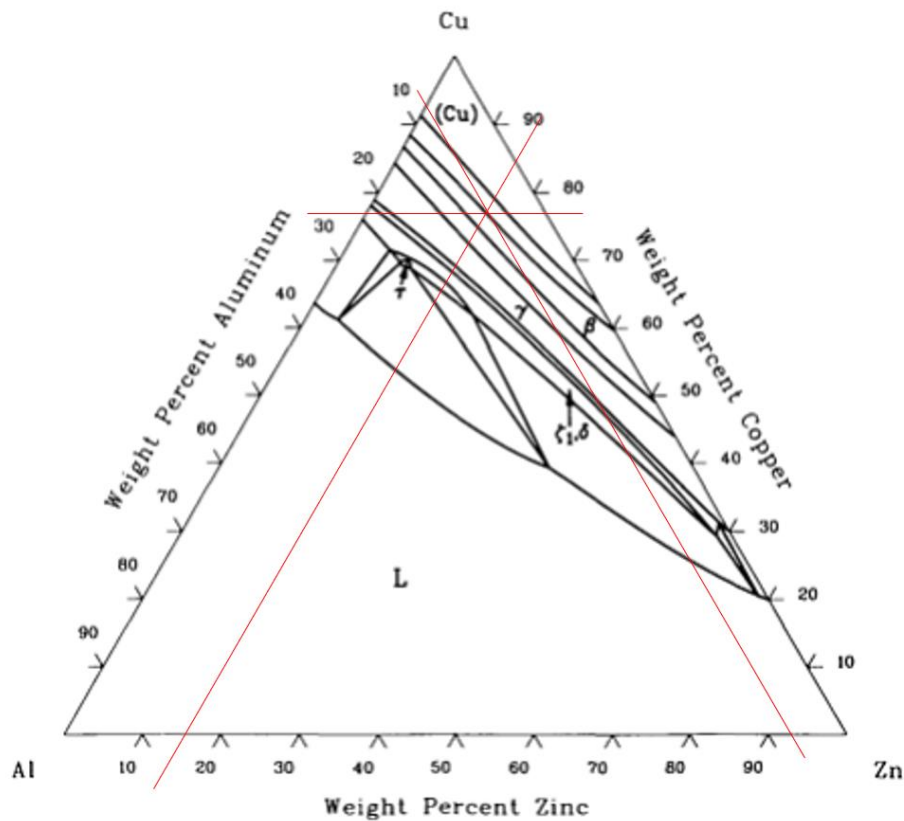


Gambar 2.8 Ilustrasi dari diagram fasa terner yang menunjukkan 3 fasa ekulibrium (ASM International, 1992)

Meskipun proyeksi tiga dimensi dapat membantu dalam memahami hubungan dalam diagram, tetapi diagram ini relatif sulit dibaca. Sehingga, sistem terner sering kali diwakilkan oleh diagram biner yang merupakan hasil potongan bagian horizontal (*isotherms*) dan vertikal (*isopleths*) dari diagram terner seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9 dan Gambar 2.10 berikut.



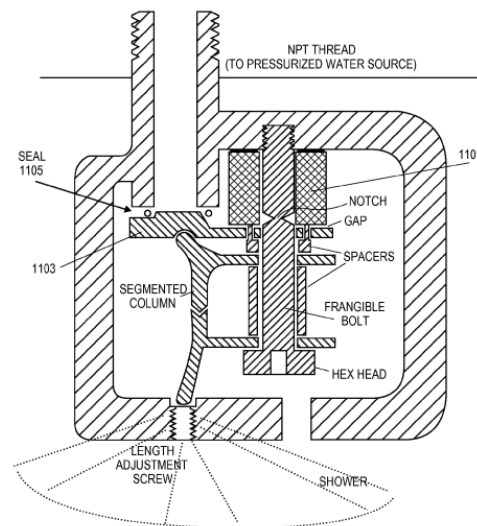
Gambar 2.9 Proyeksi likuidus diagram fasa terner Cu-Zn-Al (ASM International, 1992)



Gambar 2.10 Potongan isothermal diagram terner Cu-Zn-Al pada temperatur 700°C (ASM International, 1992)

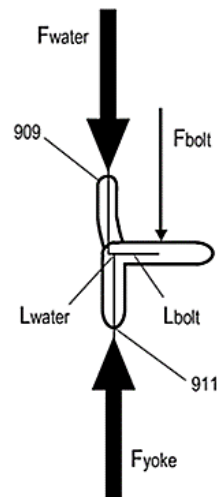
2.1.4 Aplikasi

Shape memory alloy memiliki berbagai aplikasi di bidang *engineering*, salah satunya adalah aktuator termal. Prinsip kerja aktuator termal dapat digunakan pada *sprinkler* pemadam api. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.11, *sprinkler* terdiri atas aktuator dengan *frangible bolt* dan elemen *shape memory* (1101), katup saluran fluida bertekanan yang ditutup dengan *poppet* (1103) dan dikunci oleh *seal* (1105), serta *bracket* yang menyangga *poppet* (Johnson et al., 2014).



Gambar 2.11 Skema *sprinkler* yang diaktivasi oleh temperatur (Johnson et al., 2014)

Sprinkler ini bekerja berdasarkan prinsip kesetimbangan gaya. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.12, cabang pertama (909) pada *bracket* diposisikan untuk terhubung langsung dengan katup dan melawan gaya pada fluida bertekanan (F_{water}). Cabang yang lain (911) diposisikan untuk terhubung dengan *bracket* bawah melalui *yoke* sehingga kedua *bracket* menjadi berpasangan. *Bracket* bawah terhubung langsung dengan *frame*, sehingga cabang (911) mampu memberikan gaya tolakan (F_{yoke}) untuk menyeimbangkan gaya sehingga katup dapat tertutup. Untuk menyeimbangkan gaya lebih lanjut, baut pada aktuator juga turut memberikan gaya (F_{bolt}) yang searah dengan F_{yoke} . Gaya yang dihasilkan dikali lengannya harus sama dengan nol. Ketika aktivasi, gaya yang diterapkan akan tidak seimbang karena baut akan rusak. Oleh karena itu, terjadi rotasi yang menyebabkan *bracket* tidak terhubung satu sama lain dan menghilangkan *linkage* sehingga katup akan terbuka (Johnson et al., 2014).



Gambar 2.12 Skema kesetimbangan gaya pada *bracket* (Johnson et al., 2014)

Elemen *shape memory* yang digunakan harus memiliki daerah *plateu stress* yang jelas pada kurva tegangan-regangannya. *Plateu stress* pada elemen *shape memory* harus disesuaikan dengan *ultimate tensile strength* dari *frangible bolt*. Misalnya *ultimate tensile strength* dimana baut akan rusak dapat disamakan dengan *plateu stress* dari elemen *shape memory*. Hal ini dimaksudkan untuk memastikan aktuator dapat bekerja secara terprediksi pada temperatur yang dirancang. Lebih lanjut, *elemen shape memory* dapat dikompres sesuai dengan persen elongasi pada material tersebut sehingga memperpendek panjang elemen tersebut ketika berada di bawah temperatur A_f (Johnson et al., 2014).

2.2 Perlakuan Panas

Perlakuan panas dapat didefinisikan sebagai serangkaian proses yang terdiri atas kombinasi pemanasan dan pendinginan selama waktu tertentu pada logam atau paduannya dalam keadaan fasa padatnya. Perlakuan panas dapat merubah fasa atau struktur pada logam, sehingga perubahan struktur ini menyebabkan terjadinya perubahan sifat mekanik (Avner, 1982).

2.2.1 Homogenizing

Homogenizing merupakan proses perlakuan panas yang melibatkan temperatur tinggi dan waktu tahan yang lama untuk mengurangi segregasi kimia atau segregasi metalurgi yang dikenal sebagai *coring* yang merupakan hasil alami dari proses *solidifikasi*. *Homogenizing* sangat diperlukan untuk paduan yang memiliki rentang pembekuan lebar karena paduan tersebut rentan terjadi *coring*. Meskipun demikian, *coring* juga mungkin terjadi pada paduan yang memiliki rentang pembekuan sempit seperti pada kuningan apabila logam tersebut didinginkan dengan laju pendinginan yang tinggi. Hal tersebut menyebabkan distribusi elemen paduan tidak merata di dalam struktur mikro. Waktu dan suhu yang diperlukan untuk proses *homogenizing* bergantung pada paduan, ukuran butir cor, dan derajat keseragaman yang diinginkan. *Homogenizing* dilakukan pada temperatur di atas rentang anil hingga 50°C di bawah suhu solidus. *Homogenizing* dapat menurunkan kekuatan tarik, kekerasan, dan kekuatan luluh, namun dapat menaikkan elongasi patah dan *necking* (ASM International, 1990b).

2.2.2 Annealing

Annealing merupakan salah satu proses perlakuan panas yang bertujuan untuk melunakkan, serta meningkatkan keuletan dan ketangguhan logam beserta paduannya. Proses

ini biasanya dilakukan pada produk hasil tempa, produk yang sedang atau telah melalui pemrosesan pabrik, dan produk hasil pengecoran. Proses *annealing* meliputi pemanasan, penahanan, dan pendinginan (ASM International, 1990b).

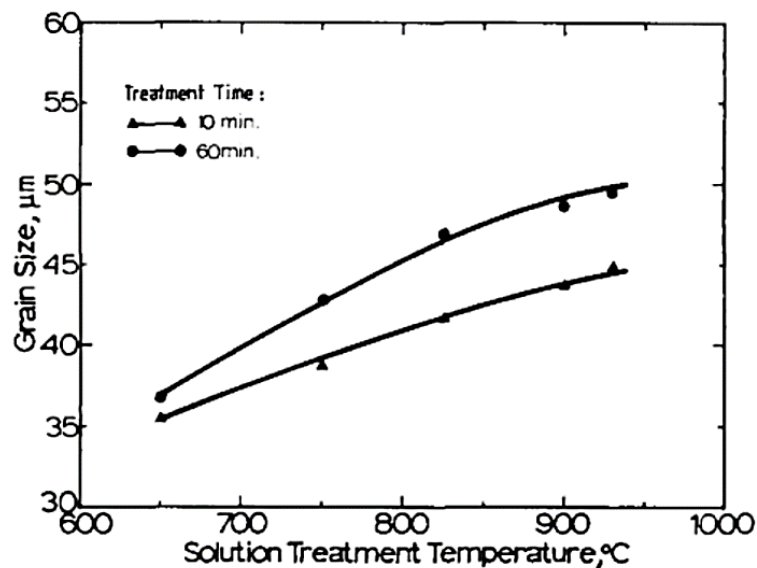
Stress-relief annealing merupakan jenis *annealing* yang bertujuan untuk menghilangkan tegangan dalam pada material. Jenis *annealing* ini biasanya diterapkan pada produk hasil tempa dan cor pada tembaga dan paduannya. Selama proses fabrikasi dan pengerjaan dingin, kekuatan dan kekerasan tembaga dan paduannya akan meningkat akibat adanya regangan plastis. Karena regangan plastis disertai dengan regangan elastis, maka tegangan sisa akan ada pada produk. Pada besaran tertentu, tegangan sisa tersebut dapat menyebabkan *stress-corrosion cracking*, distorsi, dan *hot cracking*. Pada kuningan dengan kandungan Zn lebih dari 15%, *stress-corrosion cracking* dapat terjadi apabila terdapat tegangan tarik sisa dalam jumlah yang cukup dan adanya kontaminasi amoniak hanya dalam jumlah yang sedikit pada atmosfer. *Stress-relief annealing* dilakukan pada temperatur di bawah temperatur *annealing* pada umumnya (ASM International, 1990b).

2.2.3 Solution Treatment

Solution treatment merupakan proses perlakuan panas yang dilakukan untuk melarutkan paduan ke fasa tunggalnya melalui pemanasan pada temperatur di atas garis solvus, kemudian ditahan selama waktu tertentu, lalu dilakukan proses pendinginan cepat (*quenching*) (ASM International, 1990b).

Paduan Cu-Zn-Al *shape memory alloy* memiliki fasa ekuilibrium α , β , dan γ . Fasa α dan γ secara umum dihindari karena tidak bertransformasi secara martensit, menghalangi transformasi martensit, dan masing-masing menjadi sangat lunak dan sangat keras. Fasa β adalah satu-satunya fasa yang berguna untuk perilaku *shape memory effect*. (Bojoreanu, 2008) Karena paduan Cu-Zn-Al *shape memory alloy* memiliki fasa α dan γ di temperatur kamar, maka proses *solution treatment* dilakukan untuk mendapatkan fasa β (martensit) di temperatur kamar dengan cara memanaskan paduan dari temperatur ruang ke temperatur di atas garis solvus, kemudian paduan tersebut ditahan selama beberapa waktu untuk membiarkan pelarutan fasa α dan γ ke dalam β (austenit), selanjutnya paduan tersebut didinginkan cepat ke temperatur ruang sehingga fasa α dan γ tidak sempat berdifusi dan didapatkan fasa tunggal β (martensit) (Adnyana, 1986).

Temperatur dan waktu tahan pada proses *solution treatment* perlu diperhatikan agar menghasilkan kelarutan yang cukup serta ukuran butir yang diinginkan. Pengaruh temperatur dan waktu tahan *solution treatment* terhadap ukuran butir ditunjukkan oleh Gambar 2.13 sebagai berikut (Adnyana, 1986).

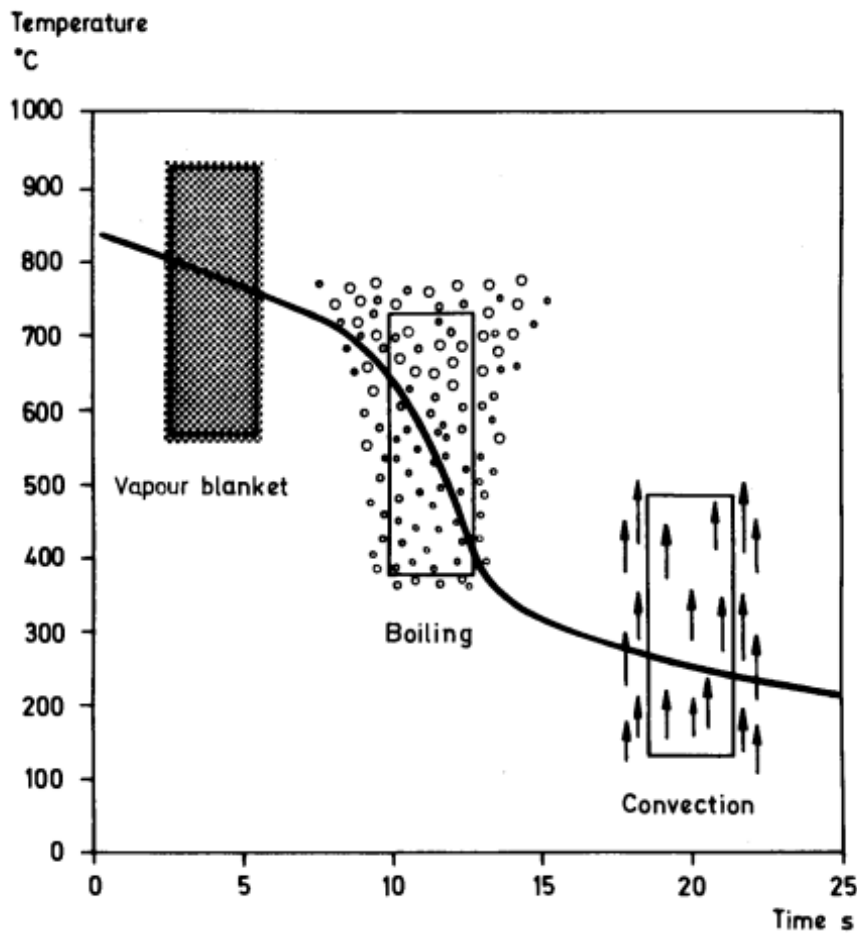


Gambar 2.13 Pengaruh temperatur dan waktu tahan *solution treatment* terhadap ukuran butir (Adnyana, 1986)

Selain itu, metode *quenching* dan karakteristik media pendingin juga perlu diperhatikan. Pada paduan Cu-Zn-Al, pendinginan langsung ke fasa martensit dengan laju yang terlalu cepat akan menyebabkan efek stabilisasi martensit. Stabilisasi martensit ditandai dengan meningkatnya temperatur transformasi *reverse martensite* yang merupakan efek degradasi dari *shape memory* (Leu & Hu, 1991). Stabilisasi martensit dapat mencegah transformasi martensit ke austenit (Lopez-Ferreño et al., 2013). Salah satu metode untuk mencegah stabilisasi martensit adalah melalui *step quench* (Qixuan & Hsu, 1987). Proses *step quench* dilakukan dengan mendinginkan material yang sebelumnya telah diberi perlakuan *solution treatment* pada temperatur di atas temperatur kamar dan ditahan pada temperatur tersebut selama waktu tertentu, kemudian mendinginkannya kembali ke temperatur kamar.

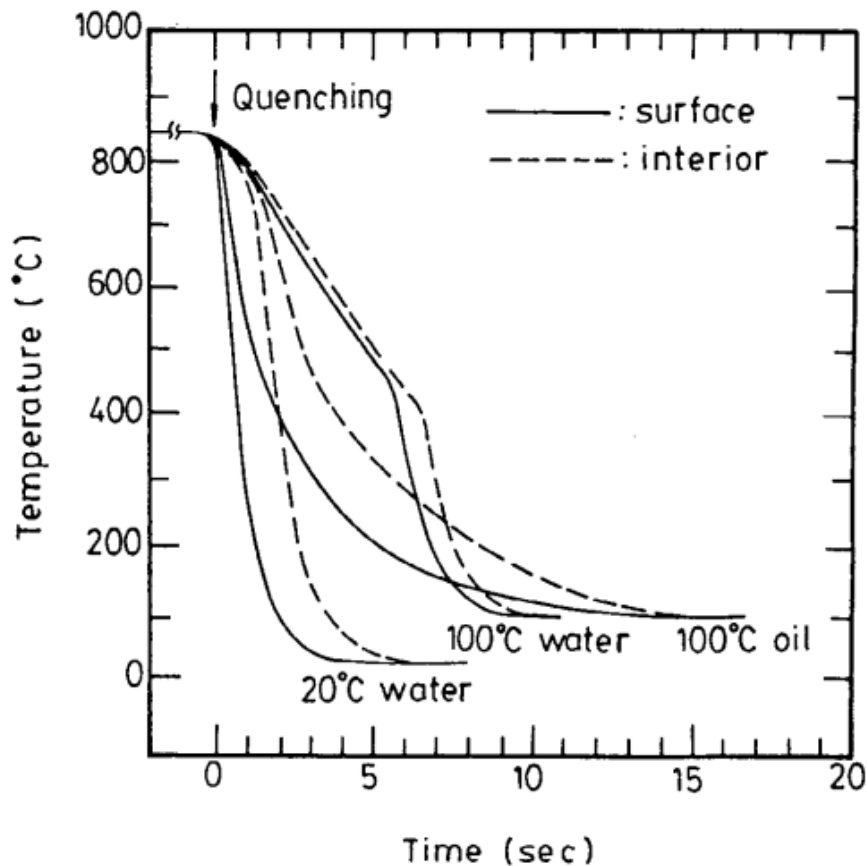
Mengingat pada umumnya efek *shape memory* sangat dipengaruhi oleh banyaknya jumlah martensit yang terbentuk pada struktur mikro, maka laju pendinginan perlu diperhatikan untuk mencapai *critical cooling rate* pembentukan martensit. Oleh karena itu, media pendingin yang digunakan akan berpengaruh terhadap efek *shape memory* yang terbentuk (Ramadhani et al., 2020). Salah satu faktor yang mempengaruhi laju pendinginan pada media pendingin adalah *bath temperature* (Bates et al., 1985). Media pendingin likuid memiliki respon berbeda terhadap *bath temperature*.

Diketahui pada Gambar 2.14 bahwa proses pendinginan pada media likuid melalui tiga tahapan, yaitu *vapour blanket stage*, *boiling stage*, dan *convection stage*. Pada tahap *vapour blanket stage*, lapisan tipis uap terbentuk dan bertindak sebagai insulator panas. Dengan demikian, transfer panas terhambat yang ditandai oleh kurva berbentuk landai. Tahap selanjutnya adalah *boiling stage*, dimana tahap ini memiliki laju transfer panas yang tinggi akibat konsumsi energi pembentukan uap dan adanya agitasi. Tahap terakhir adalah *convection stage*, dimana transfer panas berlangsung lebih lambat dan kurva kembali datar (Thelning, 1984).



Gambar 2.14 Tiga tahap kurva pendinginan (Thelning, 1984)

Tidak dapat dikatakan bahwa semakin rendah *bath temperature*, maka semakin tinggi laju pendinginannya. Secara umum, semakin tinggi *bath temperature* akan menyebabkan laju pendinginan semakin rendah. Hal ini dikarenakan temperatur awal pada media pendingin sudah tinggi yang mana memperkecil energi yang dibutuhkan untuk sampai ke tahap *vapour blanket stage*. Oleh karenanya *vapour blanket stage* akan terjadi ketika benda kerja masih memiliki temperatur yang tinggi, dimana hal ini menyebabkan durasi *vapour blanket stage* akan semakin lama (Bates et al., 1993). Di sisi lain, laju pendinginan media pendingin oli justru meningkat seiring naiknya *bath temperature*. Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur maka fluiditas akan semakin tinggi, sehingga kapasitas pendinginan akan semakin besar (Thelning, 1984). Karakteristik pendinginan pada media pendingin oli dan air terhadap *bath temperature* ditunjukkan oleh Gambar 2.15 sebagai berikut (Leu & Hu, 1991).



Gambar 2.15 Kurva pendinginan kontinyu pada variasi media pendingin (Leu & Hu, 1991)

2.3 Pengujian

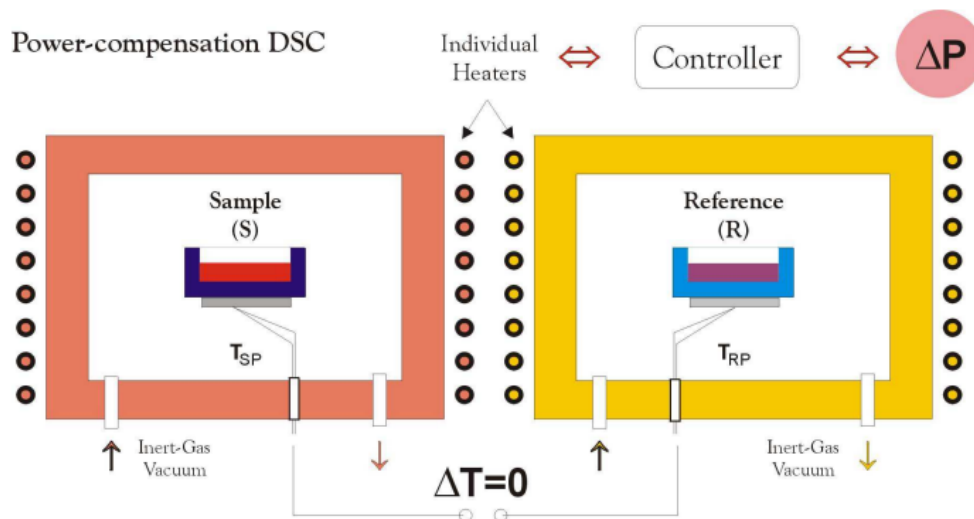
Karakteristik *shape memory alloy* dianalisis melalui pengujian komposisi kimia, pengujian metalografi, pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), pengujian kekerasan, pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), dan pengujian *Shape Memory Effect* (SME).

2.3.1 Pengujian Komposisi Kimia

Optical Emission Spectroscopy merupakan salah satu jenis pengujian untuk mendapatkan komposisi atau konsentrasi unsur pada spesimen dengan menggunakan teknik *atomic spectrometry*. Metode pengujian *Spark OES* adalah salah satu metode pengujian OES yang paling umum digunakan untuk menganalisis komposisi kimia dari spesimen logam dan paduannya dikarenakan memiliki akurasi dan kecepatan analisis yang tinggi. *Spark OES* bekerja mengeksitasi atom spesimen menggunakan panas yang dihasilkan oleh *electrical discharge* akibat perbedaan potensial elektrik antara elektroda dan spesimen. Atom-atom yang tereksitasi akan menghasilkan emisi yang unik pada setiap unsur. Intensitas emisi tersebut selanjutnya digunakan untuk menganalisis konsentrasi unsur di dalam spesimen tersebut (Widyastuti et al., 2019).

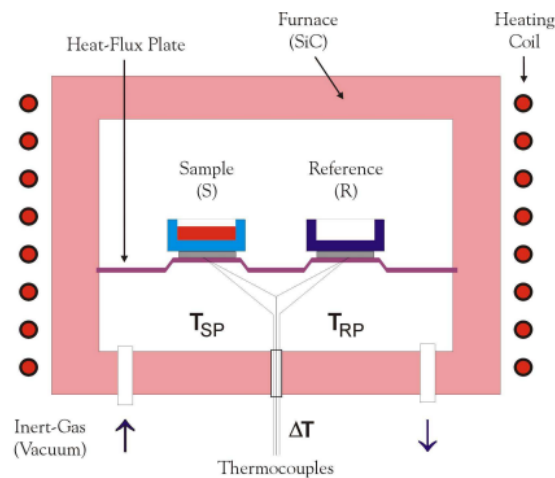
2.3.2 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Differential Scanning Calorimetry (DSC) adalah pengujian untuk mengukur kalor yang dapat diserap atau dikeluarkan dari sebuah material yang dipanaskan atau didinginkan dalam jangka temperatur tertentu. Pengujian DSC memiliki prinsip, yaitu menaikkan temperatur secara terus-menerus pada sampel dan referen secara terkontrol (Setiabudi, 2012).



Gambar 2.16 Skema alat *power-compensation* DSC (Nikula, 2002)

Pengujian DSC secara umum terdiri atas *power-compensation* DSC dan *heat-flux* DSC. *Power-compensation* DSC mengontrol temperatur sampel uji dan referen secara independen pada oven yang terpisah seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.16. Perbedaan temperatur antara sampel uji dan referen dipertahankan nol dengan memvariasikan *power input* pada dua *furnace*. Kemudian energi ini dihitung sebagai perubahan entalpi atau kapasitas panas pada sampel uji yang mana relatif terhadap referen (Nikula, 2002).

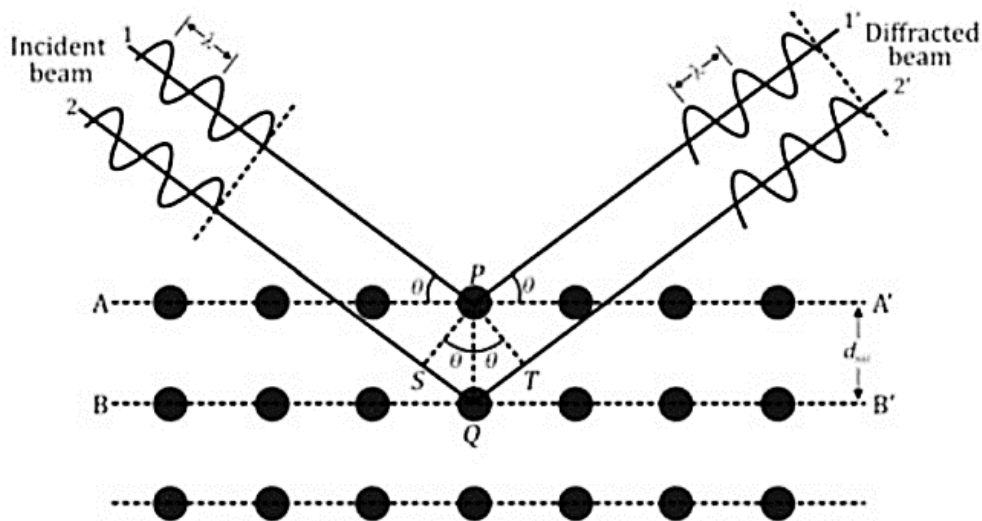


Gambar 2.17 Skema alat *heat-flux* DSC (Nikula, 2002)

Sedangkan, *heat-flux* DSC menggunakan *furnace* yang sama dimana sampel uji dan referen dimasukkan bersama ke dalam *furnace* dengan blok metal yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi. Perbedaan temperatur antara sampel uji dan referen dicatat sebagai perubahan entalpi pada sampel (Nikula, 2002). Perbedaan temperatur antara kedua material tersebut dideteksi dan dicatat sebagai suatu puncak kurva. Suhu sampel akan lebih rendah daripada suhu referen apabila mengalami reaksi endotermik, sedangkan reaksi eksotermik terjadi apabila suhu sampel lebih tinggi daripada suhu referen (Setiabudi, 2012). Skema pengujian heat flux DSC ditunjukkan oleh Gambar 2.17. Pengujian DSC dapat digunakan untuk menganalisis empat karakteristik temperatur transformasi fasa yang terdapat pada *shape memory alloy* (Jiang et al., 2018).

2.3.3 Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Setiap unsur atau senyawa memiliki pola difraksi tertentu. Oleh karena itu, teknik difraksi sinar-X dapat digunakan untuk mengidentifikasi suatu unsur atau senyawa apabila pola difraksi dari suatu unsur atau senyawa tersebut telah diketahui. Ketika suatu material dikenai sinar-X, adanya penyerapan dan penghamburan sinar oleh atom-atom dalam material tersebut menyebabkan intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Berkas sinar-X yang dihamburkan akan saling menghilangkan apabila fasanya berbeda dan akan saling menguatkan apabila fasanya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi (Kaufmann, 2003).



Gambar 2.18 Difraksi Bragg oleh bidang kristal (Callister & Rethwisch, 2014)

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.18, bidang kristalografi akan menghamburkan sinar-X apabila ditembakkan pada material kristalin. Ketika ada dua gelombang dalam satu fasa yang terdefleksi oleh bidang kristal, maka gelombang tersebut akan tetap dianggap memiliki fasa yang sama apabila memenuhi Persamaan 2.4 sebagai berikut (Callister & Rethwisch, 2014).

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

Dimana:

n = Orde difraksi

λ = Panjang gelombang sinar-X

d = Jarak antar kisi kristal

θ = Sudut sinar datang

2.3.4 Pengujian Metalografi

Metalografi merupakan disiplin ilmu yang mempelajari struktur mikro dari suatu logam atau paduannya dengan menggunakan mikroskop optik, mikroskop elektron, atau peralatan analisis permukaan material lainnya. Analisis struktur mikro dilakukan untuk mengidentifikasi keandalan suatu material. Oleh karena itu, pengujian metalografi banyak digunakan pada inovasi material, inspeksi, produksi, manufaktur, dan analisis kegagalan (Zipperian, 2011).

Preparasi spesimen dibutuhkan sebelum melakukan uji metalografi, diantaranya adalah sebagai berikut (Scott & Schwab, 2019).

A. Sampling

Tahap awal dalam pengujian metalografi adalah mengambil sampel material uji dengan dimensi tertentu yang dapat mewakili keseluruhan spesimen.

B. Mounting

Spesimen yang berukuran kecil tersebut dilakukan proses *mounting* agar lebih mudah di-handle dengan menggunakan wax atau paduan dengan titik lebur yang rendah.

C. Grinding dan Polishing

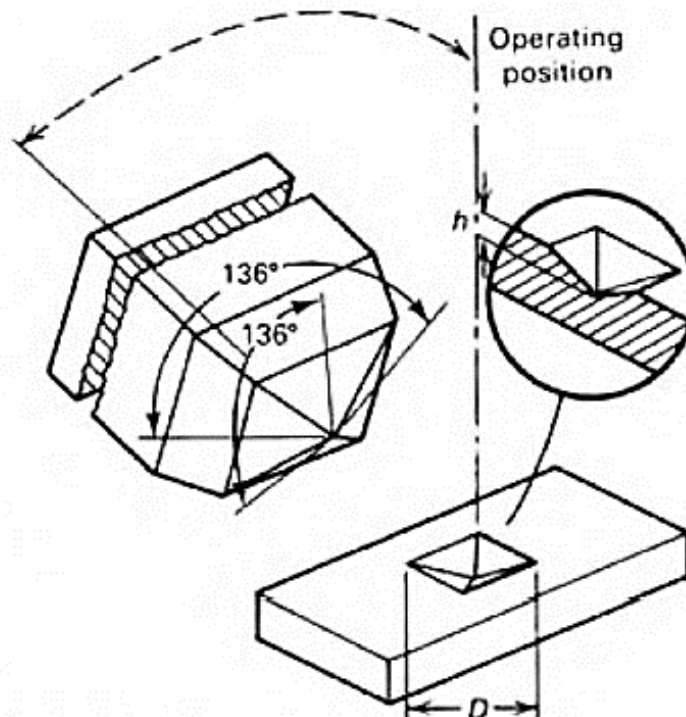
Proses *Grinding* dilakukan untuk menghilangkan kekasaran permukaan spesimen dengan menggunakan material abrasif secara progresif. Kemudian, proses *polishing* dilakukan untuk memperhalus spesimen menggunakan *polishing agent*. Setelah dilakukan *polishing*, permukaan spesimen harus dibersihkan dengan hati-hati menggunakan alkohol untuk kemudian dikeringkan.

D. Etching

Proses *etching* dilakukan dengan mengkorosikan bagian tertentu pada permukaan spesimen untuk mengekspos struktur mikro dari spesimen. Proses *etching* dilakukan menggunakan larutan etsa yang nantinya akan bereaksi terhadap fasa-fasa spesifik pada struktur mikro spesimen.

2.3.5 Pengujian Kekerasan

Kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan deformasi plastis berupa goresan, tusukan, dsb. Pengujian yang paling sering digunakan dalam menentukan nilai kekerasan adalah pengujian dengan proses indentasi. Kekerasan indentasi diukur dengan memperkirakan ukuran deformasi plastis akibat tusukan indentor pada pembebanan dan bentuk tertentu. Tiga jenis tes kekerasan indentasi yang paling umum adalah kekerasan Brinell, kekerasan Vickers, dan tes kekerasan Rockwell (Sharma et al., 2011).



Gambar 2.19 Skema pengujian Vickers (Avner, 1982)

Uji kekerasan indentasi metode Vickers dinilai lebih efektif dan presisi. Skema pengujian Vickers ditunjukkan oleh Gambar 2.19. Indentor yang digunakan adalah piramida berlian dengan dasar persegi. Sudut yang digunakan antar wajah piramida yang berlawanan adalah 136° . Pengujian Vickers memiliki beban yang bervariasi mulai dari 1 kg hingga 120 kg. Angka kekerasan Vickers (VHN) diperoleh dengan membagi beban dengan luas permukaan indentasi. Hubungan antara nilai kekerasan Vickers dan parameter yang terukur ditunjukkan oleh Persamaan 2.5 sebagai berikut (Avner, 1982).

$$VHN = \frac{1,854P}{D^2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

P = Pembebanan yang diterapkan

D = Panjang diagonal indentasi

2.3.6 Pengujian *Shape Memory Effect*

Pengujian *Shape Memory Effect* digunakan untuk menganalisis persentase *shape recovery* dari paduan *shape memory alloy* setelah dilakukan deformasi. *Shape memory effect* dianalisis dengan menekuk sampel hingga derajat tertentu dan dipanaskan untuk memulihkan bentuknya. Selanjutnya, sudut akhir diukur dan persentase *shape memory effect* dihitung menggunakan Persamaan 2.6 sebagai berikut (Chanmuang et al., 2018).

$$SME = \frac{\theta_0 - \theta_1}{\theta_0} \times 100\% \dots\dots\dots (2.6)$$

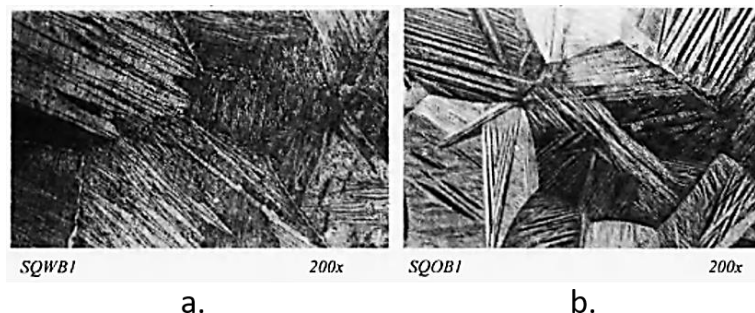
Dimana:

θ_0 = Sudut awal

θ_1 = Sudut akhir

2.4 Penelitian Sebelumnya

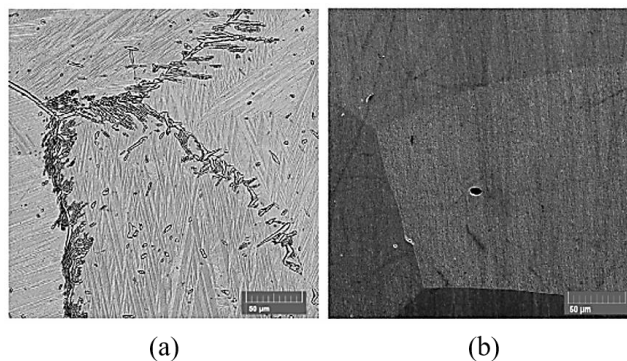
Vanja Asanovic telah melakukan penelitian pada tahun 2004 berjudul “Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Transformasi Martensit dan Sifat Paduan Cu-Zn-Al”. Metode *step quench* dengan variasi media air mendidih dan oli dilakukan pada spesimen Cu-20,8 Zn-5,8 Al. *Step quench water boiling* (SQWB) dilakukan dengan mendinginkan cepat spesimen yang telah dilakukan *solution treatment* ke dalam air mendidih selama 10 menit, kemudian mendinginkan kembali ke dalam air pada temperatur 27°C . Sementara itu, *step quench oil bath* (SQOB) dilakukan dengan mendinginkan cepat spesimen yang telah dilakukan *solution treatment* ke dalam oli pada temperatur 105°C selama 10 menit, kemudian mendinginkan kembali ke dalam air pada temperatur 27°C . Selanjutnya spesimen dilakukan analisis struktur mikro, temperatur transformasi, dan efek *shape memory*. Hasil pengujian struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 2.20 sebagai berikut (Asanovic et al., 2004).



Gambar 2.20 Hasil pengujian struktur mikro spesimen: (a.) *step quench water boiling* dan (b.) *step quench oil bath* oleh mikroskop optik (Asanovic et al., 2004)

Terlihat pada Gambar 2.20 bahwa kedua spesimen menunjukkan batas butir fasa induk dan fasa martensit dengan beberapa arah berbeda. Martensit pada perlakuan SQOB memiliki arah pelat yang tersusun lebih seragam dalam butir. Sedangkan, pada spesimen SQWB teridentifikasi adanya presipitat fasa α . Selama proses perlakuan *quenching*, laju pendinginan paling lambat dialami oleh spesimen SQWB dikarenakan terbentuknya lapisan uap pada permukaan spesimen yang bertindak sebagai insulator panas dari daerah sekitar media pendingin. Selanjutnya pada analisis temperatur transformasi, terlihat bahwa perlakuan *quenching* sangat berpengaruh terhadap temperatur transformasi. Spesimen SQWB memiliki M_s , M_f , A_s , dan A_f berturut-turut adalah 88°C, 58°C, 83°C, dan 121°C. Sedangkan, pada spesimen SQOB memiliki M_s , M_f , A_s , dan A_f berturut-turut adalah 82°C, 56°C, 76°C, dan 121°C. Kemudian pada pengujian efek *shape memory*, spesimen SQOB memiliki *recovery* sebesar 95-98% dan spesimen SQWB hanya memiliki *recovery* sebesar 68-72%. Buruknya efek *shape memory* pada spesimen SQWB dikarenakan hadirnya presipitat fasa α (Asanovic et al., 2004).

Zorica Stosic, dkk. telah melakukan penelitian pada tahun 2017 berjudul “Pengaruh Komposisi dan Perlakuan Panas Terhadap Sifat *Shape Memory* Paduan Cu-Zn-Al dengan Kandungan Al Rendah”. Metode *step quench* dilakukan pada paduan Cu-25Zn-4Al (Spesimen A) dan Cu-30Zn-4Al (Spesimen B) dengan media *quenching* air mendidih pada temperatur 100°C selama 15 menit, kemudian didinginkan kembali pada air dengan temperatur kamar. Spesimen Cu-25Zn-4Al *as cast* memiliki fasa $\alpha + \beta$ (FCC + BCC) dengan fasa α berbentuk dendritik yang secara acak menyebar di matriks β . Sementara Cu-30Zn-4Al *as cast* hanya memiliki fasa tunggal β (Stošić et al., 2017).

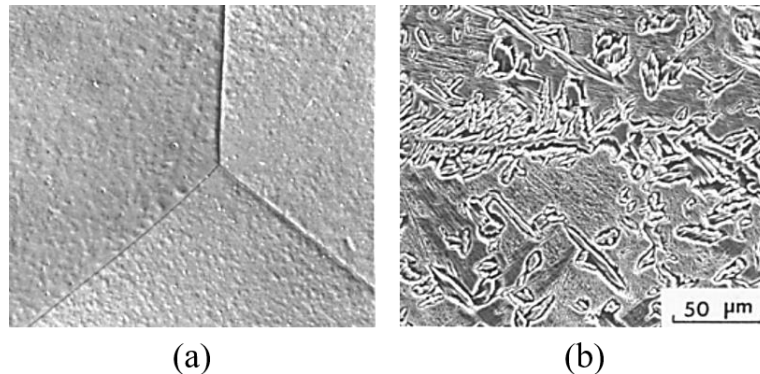


Gambar 2.21 Mikrograf SEM Cu-25Zn-4Al (a) dan Cu-30Zn-4Al (b) setelah dilakukan proses *step quench* (Stošić et al., 2017)

Terlihat pada Gambar 2.21 (a) bahwa spesimen Cu-25Zn-4Al yang dilakukan *step quench* pada media air mendidih dengan temperatur 100°C selama 15 menit dan dilakukan pendinginan kembali pada air dengan temperatur kamar memiliki struktur seluruhnya martensit berbentuk “V” dan martensit berbentuk jarum, serta terlihat adanya presipitat halus fasa α di dalam butir dan di batas butir. Sementara itu, spesimen Cu-30Zn-4Al hanya memiliki fasa β sama seperti struktur pada spesimen *as cast*. Hal ini dikarenakan Cu-30Zn-4Al memiliki *martensite start* di bawah temperatur kamar. Selanjutnya, temperatur *austenite start* dan *finish* pada sampel Cu-25Zn-4Al diamati menggunakan teknik DSC dengan pemanasan dari temperatur kamar ke temperatur 100°C dengan laju 5°C/menit sebanyak tiga kali *heating run*. Temperatur *austenite start* berada pada rentang 32,5°C-37,8°C dan *austenite finish* berada pada rentang 51,3°C - 56,1°C. Sementara itu, rata-rata entalpi untuk transformasi adalah 0,47 (J/g) (Stošić et al., 2017).

S. S. Leu, dkk. telah melakukan penelitian pada tahun 1991 berjudul “Pengaruh *Aging* Terhadap Paduan *Shape Memory Alloy* Cu-Zn-Al dengan Kandungan Al Rendah”. Metode *step*

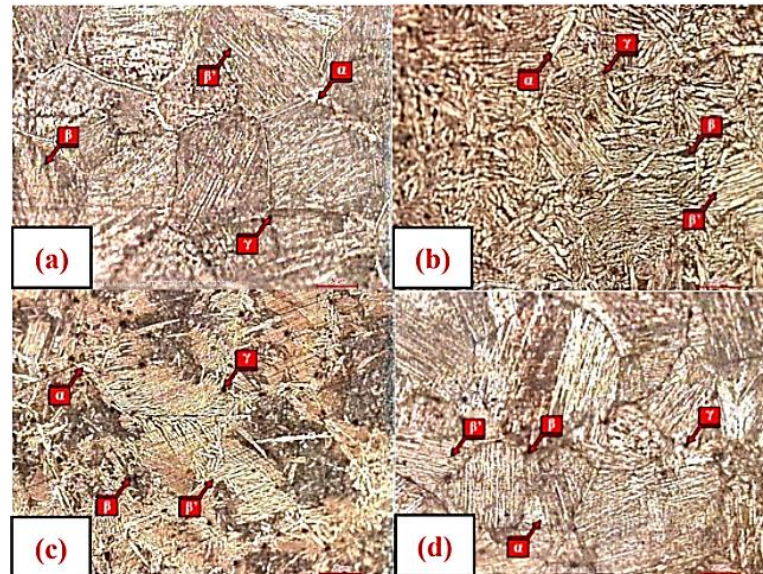
quench dengan variasi media air mendidih dan oli dilakukan pada paduan Cu-27,4Zn-3,72Al (Spesimen A) dan Cu-28,2Zn-3,14Al (Spesimen B). *Step quench water boiling* (SQWB) dilakukan dengan mendinginkan cepat spesimen yang telah dilakukan *solution treatment* ke dalam air mendidih dengan temperatur 100°C selama 10 menit, kemudian mendinginkan kembali ke dalam air pada temperatur 20°C. Sementara itu, *step quench oil bath* (SQOB) dilakukan dengan mendinginkan cepat spesimen yang telah dilakukan *solution treatment* ke dalam oli pada temperatur 100°C selama 10 menit, kemudian mendinginkan kembali ke dalam air pada temperatur 20°C. Mikrostruktur pada semua spesimen memiliki ukuran yang mirip, yaitu sebesar 600 μm (Leu & Hu, 1991).



Gambar 2.22 Mikrograf SEM paduan A (a) dan paduan B (b) perlakuan *step quench water boiling* (Leu & Hu, 1991)

Seperti yang terlihat dalam Gambar 2.22, spesimen paduan A hanya menunjukkan fasa induk β , sementara paduan B yang dilakukan *step quench water boiling* menunjukkan fasa martensit dengan presipitat kasar di dalam butir dan batas butir. Hal ini ditunjukkan juga pada pengujian XRD dimana pada spesimen SQWB dan SQOB paduan A teridentifikasi fasa induk β (DO_3), sementara SQWB paduan B teridentifikasi fasa α + martensit 18R dan SQOB paduan B teridentifikasi martensit 18R. Perubahan resistensi terhadap temperatur dari semua spesimen *as-quench* diamati untuk menentukan temperatur transformasi M_s , dimana spesimen SQWB dan SQOB paduan A memiliki temperatur M_s masing-masing adalah -9°C dan -19°C. Sementara itu, pada SQWB dan SQOB paduan B memiliki temperatur M_s masing-masing adalah 54°C dan 43°C (Leu & Hu, 1991).

Falqi Yusuf dkk. telah melakukan penelitian pada tahun 2021 berjudul “Analisis Pengaruh Variasi *Holding Time Solution Treatment* dan Proses *Artificial Aging* terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Cu-Zn-Al *Shape Memory Alloy*”. Variasi *holding time solution treatment* dengan waktu tahan 10, 20, 30, dan 40 menit dilakukan pada paduan Cu-11,9Zn-6,72Al. Kemudian dilakukan analisis struktur mikro, kekerasan, dan efek *shape memory* (Yusuf et al., 2021).

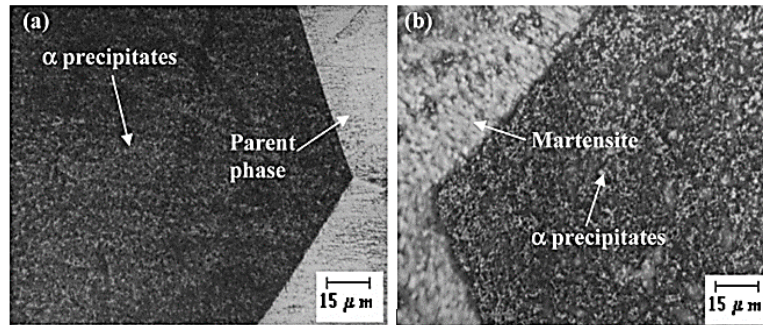


Gambar 2.23 Struktur Mikro Paduan Cu-11,9Zn-6,72Al yang dilakukan *solution treatment* dengan *holding time* 10 menit (a), 20 menit (b), 30 menit (c), dan 40 menit (d) (Yusuf et al., 2021)

Pada Gambar 2.23, dapat diamati bahwa seluruh spesimen memiliki fasa α , β , γ , dan β' (martensit). Selanjutnya dapat diamati bahwa semakin lama waktu tahan pada *proses solution treatment*, maka ukuran butir akan semakin besar. Dimana spesimen dengan waktu tahan 10, 20, 30, dan 40 menit berturut-turut memiliki diameter butir sebesar 142,88 μm , 144,67 μm , 150,03 μm , dan 156,47 μm . Dengan bertambahnya ukuran butir, dapat menyebabkan jumlah batas butir yang semakin sedikit sehingga nilai kekerasan pada paduan Cu-11,9Zn-6,72Al akan semakin menurun. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian kekerasan pada paduan Cu-11,9Zn-6,72Al, dimana spesimen dengan waktu tahan 10, 20, 30, dan 40 menit memiliki kekerasan sebesar $181,33 \pm 5,44$, $175 \pm 1,63$, $174,33 \pm 1,25$, dan $173,67 \pm 1,25$. Kemudian pada hasil pengujian efek *shape memory*, terlihat penurunan nilai *recovery* seiring bertambahnya waktu tahan. Pertambahan waktu tahan *solution treatment*, dapat meningkatkan temperatur transformasi. Dengan meningkatnya temperatur transformasi, efek *shape memory* akan semakin berkurang dikarenakan semakin sulitnya fasa martensit untuk kembali ke fasa austenit. Dimana nilai *recovery* pada waktu tahan 10, 20, 30, dan 40 menit secara berturut-turut adalah 25%, 12,5%, 12,5%, dan 10% (Yusuf et al., 2021).

Sampath telah melakukan penelitian pada tahun 2007 berjudul “Pengaruh *Thermal Processing* Terhadap Mikrostruktur dan Karakteristik *Shape Memory* dari Paduan Cu-Zn-Al *Shape Memory Alloy*”. Spesimen yang digunakan pada penelitian adalah Cu-30.36Zn-2.19Al. *Solution treatment* dilakukan pada suhu 800°C dengan *holding time* selama 30 menit, kemudian di *step quench* dengan menggunakan *water boiling* dan *oil bath* pada suhu 100°C dengan waktu tahan 10 menit (Sampath, 2007).

Struktur mikro paduan Cu-Zn-Al setelah mengalami perlakuan *step quench* ditunjukkan pada Gambar 2.24. Teridentifikasi adanya fasa α dan β tanpa martensit pada spesimen *step quench oil bath*. Sedangkan pada spesimen *step quench water boiling* teridentifikasi fasa α dan martensit (Sampath, 2007).



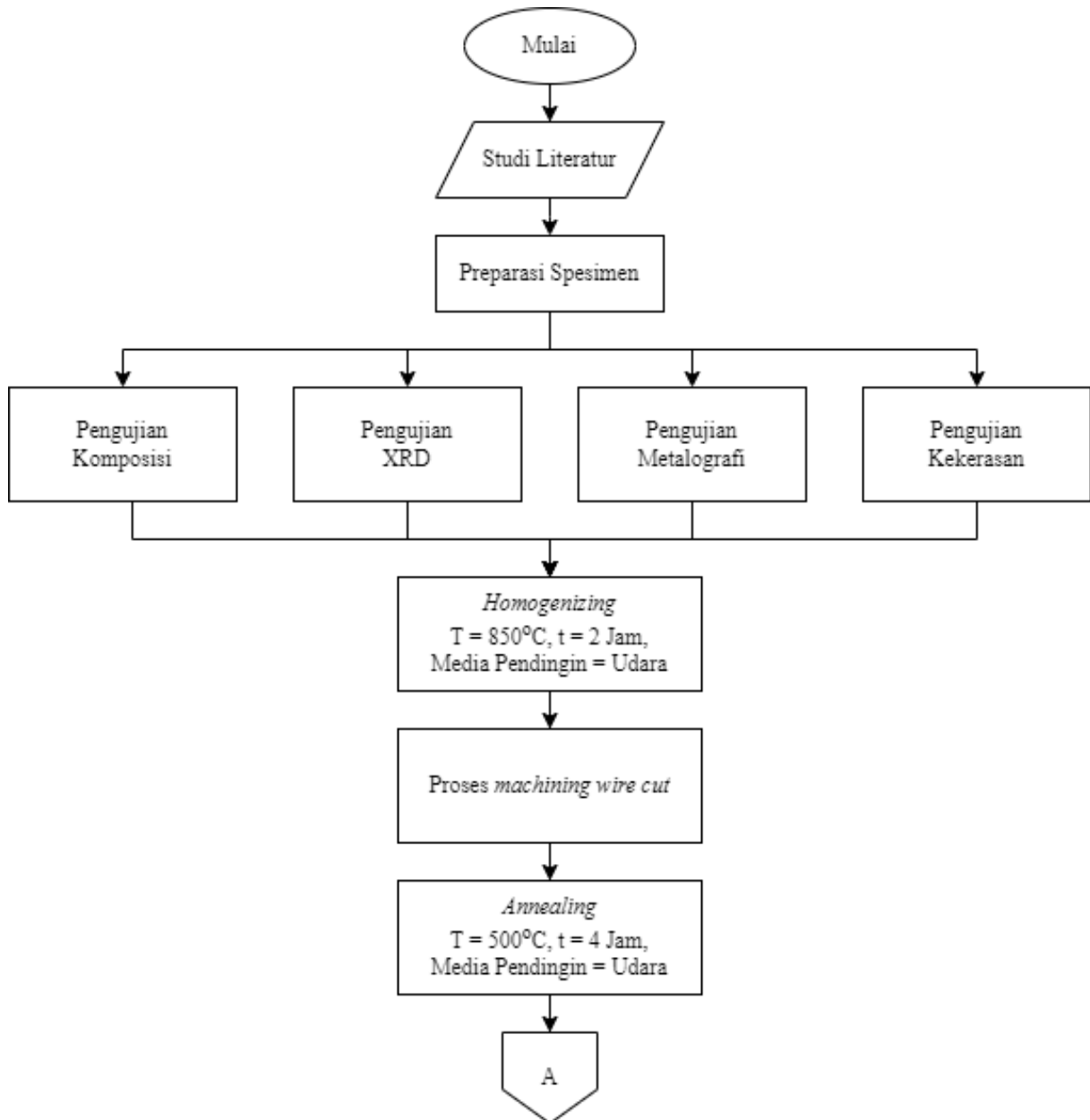
Gambar 2.24 Struktur mikro Cu-Zn-Al setelah mengalami *step-quench* dengan; a) *oilbath*; b) *waterboiling* (Sampath, 2007)

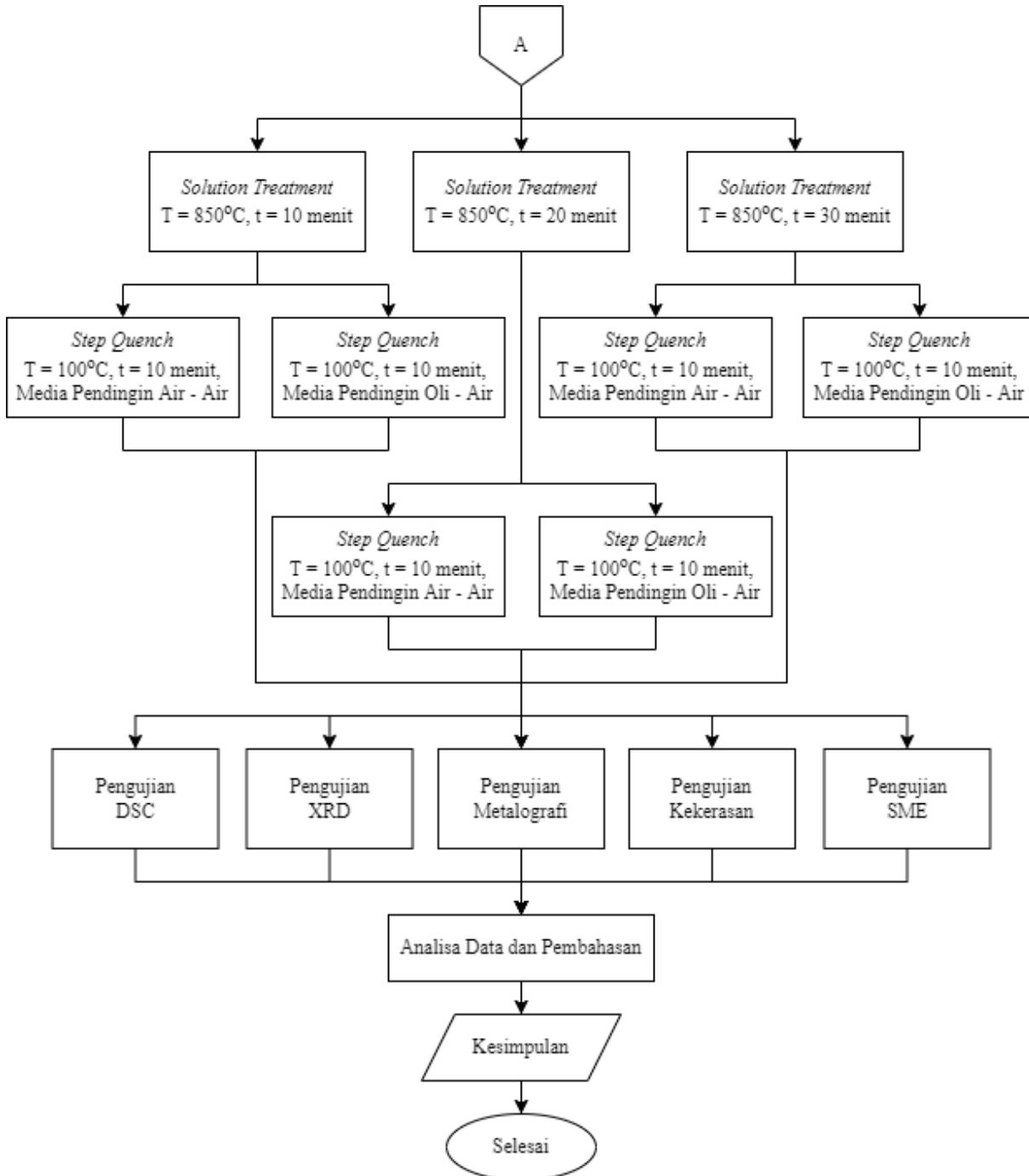
Pengujian kekerasan menyatakan bahwa nilai kekerasan dari spesimen *step quench* dengan menggunakan *oil bath* (152-159 VHN) lebih tinggi jika dibandingkan *step quench* menggunakan *water boiling* (157 VHN). Hal ini disebabkan karena spesimen *step quench* dengan menggunakan *oil bath* tidak memiliki fasa martensit yang bersifat lunak sedangkan pada spesimen spesimen *step quench* dengan menggunakan *water boiling* memiliki fasa martensit (Sampath, 2007).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir yang digunakan pada penelitian kali ini ditunjukkan oleh Gambar 3.1 sebagai berikut.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut.

1. Gelas Ukur

Kuantitas bahan larutan etsa yang digunakan diukur menggunakan gelas ukur yang merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi Manufaktur, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.

2. *Beaker Glass*
Bahan larutan etsa yang digunakan dicampur menggunakan *beaker glass* yang merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi Manufaktur, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.
3. Gerinda Tangan
Spesimen ingot logam yang digunakan dipotong menggunakan gerinda tangan.
4. Mesin *Grinding* dan *Polishing*
Proses *grinding* dan *polishing* pada spesimen untuk pengujian metalografi dilakukan menggunakan mesin *grinding* dan *polishing* yang merupakan inventaris dari Laboratorium Metalurgi Manufaktur, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.
5. Kertas Amplas
Permukaan spesimen untuk pengujian metalografi dihaluskan menggunakan kertas amplas.
6. Alat *Wire Cut*
Spesimen berbentuk kawat untuk pengujian *shape memory effect* dipotong menggunakan alat *wire cut*.
7. *High Temperature Furnace*



Gambar 3.2 *High temperature furnace* (Dokumentasi Pribadi, 2022)

Spesimen diberi perlakuan panas dengan dipanaskan hingga temperatur tertentu menggunakan *high temperature furnace* yang merupakan inventaris Laboratorium Metalurgi Manufaktur, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. *High temperature furnace* yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 3.2 di atas.

8. Alat *Optical Emission Spectroscopy* (OES)
Paduan Cu-Zn-Al dilakukan pengujian komposisi kimia menggunakan alat uji komposisi yang merupakan inventaris Laboratorium Uji Bahan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

9. Alat *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Paduan Cu-Zn-Al dilakukan pengujian temperatur transformasi menggunakan alat DSC Mettler Toledo yang merupakan inventaris Laboratorium CDEA, Universitas Surabaya.

10. Alat Uji Kekerasan



Gambar 3.3 *Universal Hardness Tester* HBRV (Dokumentasi Pribadi, 2022)

Paduan Cu-Zn-Al dilakukan pengujian kekerasan sebelum dan sesudah proses perlakuan panas menggunakan alat uji kekerasan *Universal Hardness Tester* HBRV yang merupakan inventaris Laboratorium Metalurgi Manufaktur, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Alat uji kekerasan yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 3.3 di atas.

11. Mikroskop Optik



Gambar 3.4 Mikroskop optik OLYMPUS BX51MRF (Dokumentasi Pribadi, 2022)

Struktur mikro dari spesimen paduan diobservasi menggunakan mikroskop optik OLYMPUS BX51MRF yang merupakan inventaris Laboratorium Metalurgi Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Mikroskop optik yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 3.4 di atas.

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

Fasa yang terbentuk pada material diidentifikasi menggunakan alat uji XRD PANanalytical yang merupakan inventaris Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.

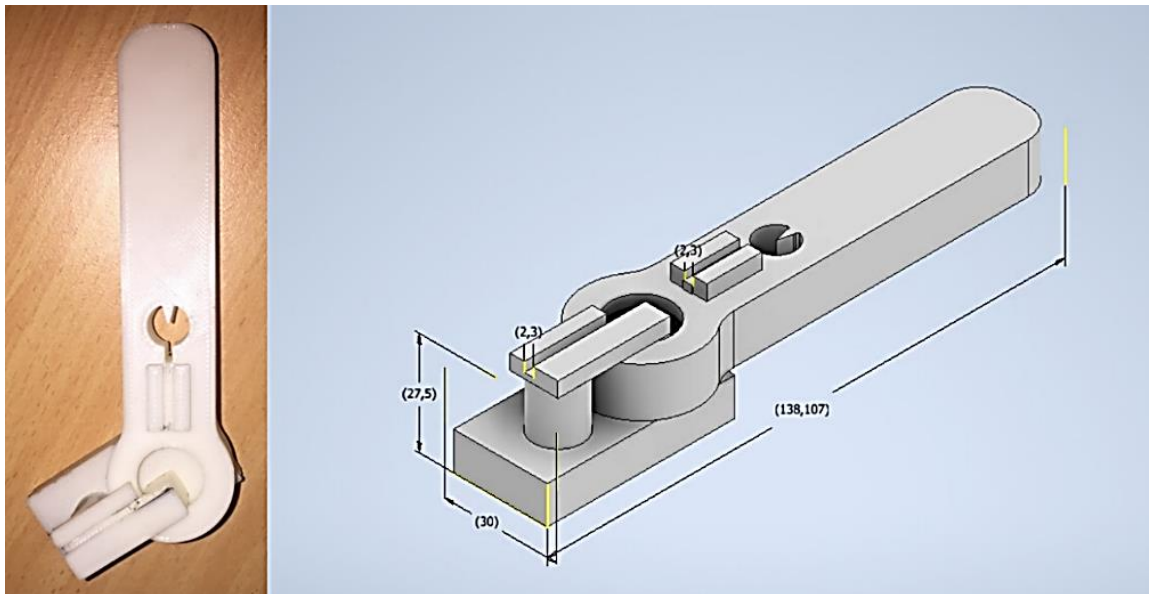
13. *Heater* dan *Thermostat*

Media pendingin air dan oli dipanaskan hingga mencapai temperatur 100°C menggunakan *heater* dan *thermostat* untuk perlakuan *step quenching*.

14. *Bath*

Spesimen direndam dalam *bath* berisi media pendingin oli dan air pada temperatur tertentu pada perlakuan *quenching*.

15. Alat Bantu *Bending*



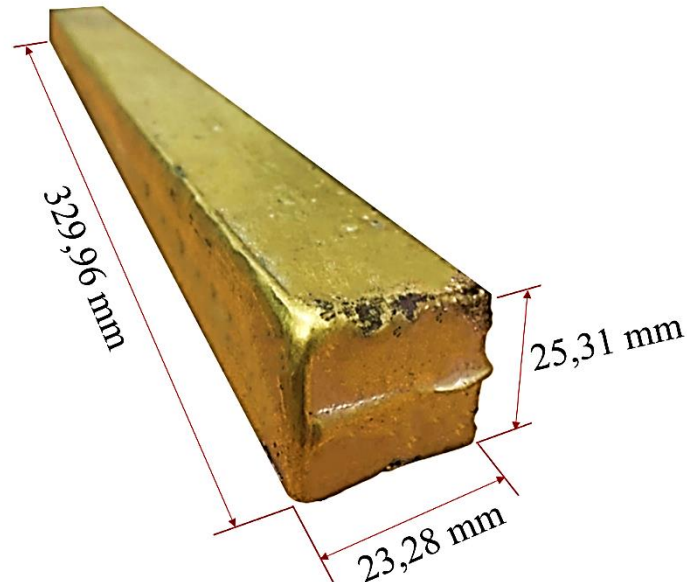
Gambar 3.5 Alat bantu *bending* dan dimensi (mm) (Dokumentasi Pribadi, 2022)

Spesimen *wire* yang telah dilakukan proses *solution treatment* ditekek sebesar derajat tertentu menggunakan alat bantu *bending*. Alat bantu *bending* yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 3.5 di atas.

3.3 Bahan Penelitian

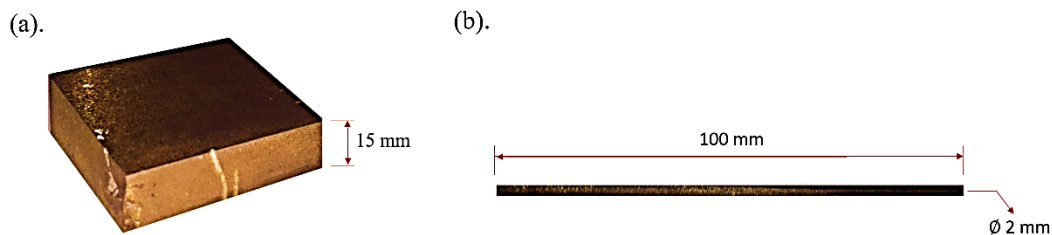
Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Paduan Cu-Zn-Al



Gambar 3.6 Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al hasil pengecoran berbentuk balok dengan dimensi $329,96 \times 23,28 \times 25,31$ (mm) (Dokumentasi Pribadi, 2022)

Paduan Cu-Zn-Al didapatkan melalui proses pengecoran dengan komposisi sesuai dengan *ASM Handbook Volume 2*. Paduan Cu-15,9Zn-6,89Al hasil pengecoran ditunjukkan oleh Gambar 3.6 di atas. Balok hasil pengecoran kemudian dilakukan proses *machining* untuk mendapatkan spesimen berbentuk *wire* dengan diameter 2 mm dan panjang 100 mm, serta *plat* tipis dengan tebal 15 mm. Adapun spesimen hasil *machining* ditunjukkan oleh Gambar 3.7 sebagai berikut.



Gambar 3.7 Spesimen berbentuk *wire* dengan diameter 2 mm dan panjang 100 mm (a.), serta *plat* tipis dengan tebal 15 mm (b). (Dokumentasi Pribadi, 2022)

2. Bahan Etsa

Bahan etsa yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan *ASM Handbook Volume 9*, yaitu:

- a. 5 gram FeCl_3
- b. 30 ml HCl
- c. 100 ml etanol

3. Aquades

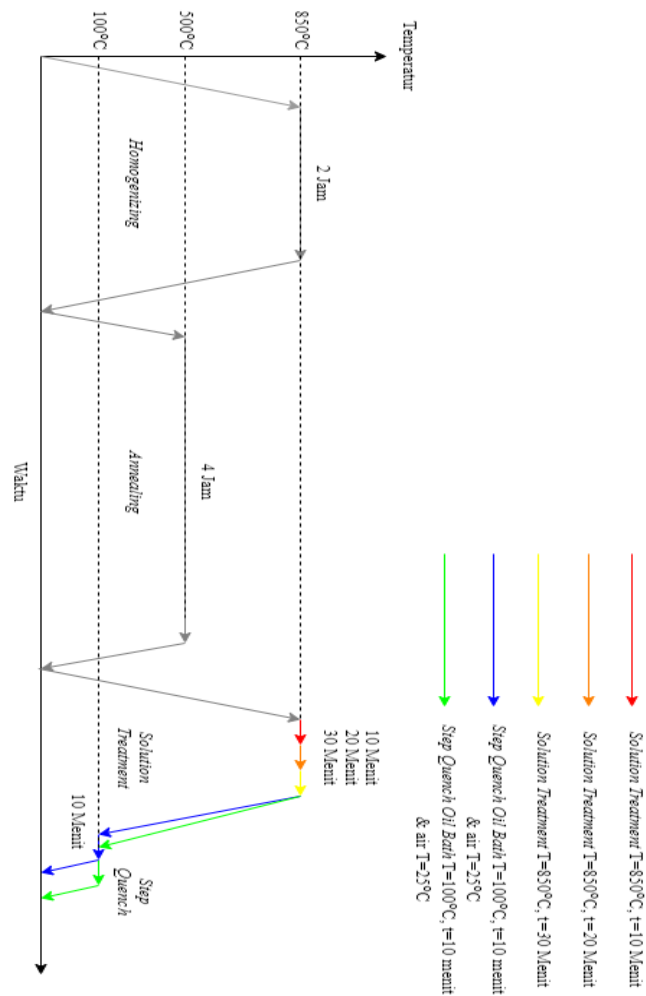
Aquades pada penelitian ini digunakan sebagai media pendingin pada perlakuan *step quenching*.

4. Oli

Oli pada penelitian ini digunakan sebagai media pendingin pada perlakuan *step quenching*. Oli yang digunakan adalah oli SAE 30.

3.4 Kurva Perlakuan Panas

Perlakuan panas yang digunakan pada penelitian ini adalah *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment* dengan variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah *holding time solution treatment* dan media pendingin *step quench*. Adapun kurva perlakuan panas dapat dilihat melalui Gambar 3.8 sebagai berikut.



Gambar 3.8 Kurva Perlakuan Panas

3.5 Prosedur Penelitian

Proses perlakuan panas pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan prosedur sebagai berikut.

3.5.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Homogenizing*

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

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

3.5.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Annealing*

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

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

3.5.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Solution Treatment*

Prosedur yang digunakan pada proses perlakuan panas *solution heat treatment* dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Spesimen disiapkan.
2. *Furnace* untuk perlakuan panas disiapkan.
3. Spesimen dimasukkan ke dalam *furnace*, kemudian spesimen dipanaskan hingga temperatur 850°C dan ditahan selama 10 menit.
4. Langkah 1-3 diulangi, namun dengan waktu tahan 20 menit dan 30 menit.
5. Spesimen dikeluarkan dari *furnace* kemudian dimasukkan ke dalam media pendingin air pada temperatur 100°C (*step quench water boiling*), lalu dimasukkan ke dalam media air pada temperatur kamar.
6. Langkah 1-5 diulangi, namun dengan media pendingin oli pada temperatur 100°C (*step quench oil bath*), lalu dimasukkan ke dalam media air pada temperatur kamar.

3.6 Proses Pengujian

Pengujian yang digunakan pada penelitian ini adalah pengujian komposisi kimia, pengujian XRD, pengujian metalografi, pengujian kekerasan, pengujian DSC, dan pengujian SME. Proses pengujiannya adalah sebagai berikut.

3.6.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pada penelitian ini, paduan Cu-Zn-Al berbentuk plat tipis dilakukan pengujian komposisi kimia menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES) di Laboratorium Uji Bahan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS).

3.6.2 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dilakukan untuk mengetahui temperatur transformasi pada paduan Cu-Zn-Al. Pengujian dilakukan menggunakan DSC

Metller Toledo di Laboratorium CDEA, Universitas Surabaya. Pengujian dilakukan pada material serbuk dengan rentang temperatur pemanasan 30-300°C dan kenaikan 10°C/menit.

3.6.3 Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi fasa dan struktur kristal yang terbentuk pada paduan Cu-Zn-Al yang digunakan pada penelitian ini. Pengujian ini dilakukan pada spesimen berbentuk plat tipis menggunakan PANalytical di Laboratorium Karakterisasi Material, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Selanjutnya hasil pengujian XRD dianalisis menggunakan *software* Highscore untuk dibandingkan dengan database standar dari International Centre for Diffraction Data (ICDD).

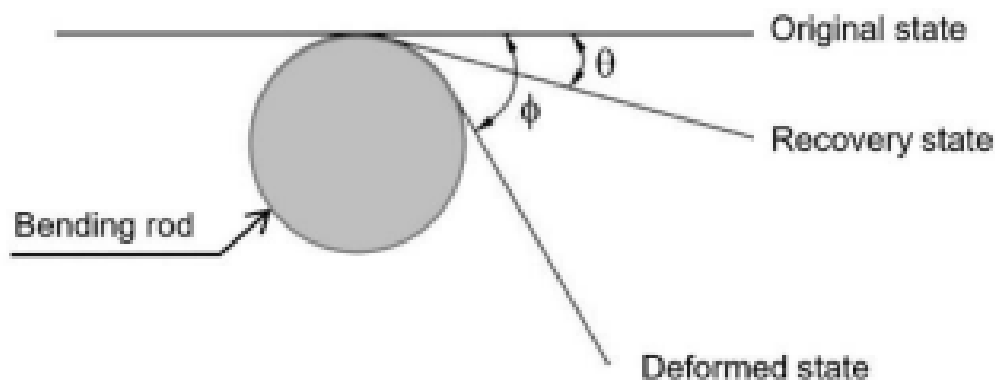
3.6.4 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk menganalisis struktur mikro pada paduan Cu-Zn-Al. Pengujian dilakukan pada plat tipis menggunakan mikroskop optik OLYMPUS B5X1M-RF di Laboratorium Metalurgi Manufaktur, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Larutan etsa yang digunakan adalah 5 gram FeCl₃, 100 gram ethanol, dan 30 ml HCl mengacu pada ASM Handbook Volume 9. Selain itu, dilakukan pengukuran area butir menggunakan *software* ImageJ.

3.6.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan pada paduan Cu-Zn-Al sebelum dan sesudah mengalami proses *solution treatment*. Pengujian dilakukan menggunakan metode Vickers sesuai dengan standar pada ASTM E92-17. Pengujian dilakukan pada plat tipis menggunakan *universal hardness tester* HBRV 187,5A di Laboratorium Metalurgi Manufaktur, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Indentor yang digunakan adalah piramida berlian dengan sudut 136° dan beban 30 kgf dengan waktu tahan selama 10 detik.

3.6.6 Pengujian Shape Memory Effect (SME)



Gambar 3.9 Skema pengujian *shape memory effect* (Chanmuang et al., 2018)

Pengujian SME pada penelitian ini digunakan untuk menganalisis persentase *recovery* dari material *shape memory alloy*. Standar ASTM F2082 digunakan untuk menentukan rentang diameter *wire*, yaitu 0,3 mm - 3 mm. Spesimen selanjutnya ditekuk hingga membentuk sudut tertentu dan dipanaskan hingga mencapai temperatur A_f . Pada penelitian ini, spesimen *wire* memiliki diameter 2 mm dan panjang 100 mm dengan sudut penekukan sebesar 5°. Skema pengujian SME ditunjukkan melalui Gambar 3.9 di atas.

3.7 Jadwal Penelitian

Jadwal yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan oleh Tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

Kegiatan	Bulan															
	Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi	[Red bar]															
Literatur	[Red bar]															
Bimbingan	[Red bar]															
Persiapan	[Yellow bar]															
Alat dan Bahan	[Yellow bar]															
Pengujian																
Komposisi					[Yellow bar]											
Perlakuan Panas					[Green bar]											
Pengujian XRD									[Green bar]							
Pengujian									[Blue bar]							
Metalografi									[Blue bar]							
Pengujian DSC													[Blue bar]			
Pengujian SME													[Dark Blue bar]			
Pengujian													[Purple bar]			
Kekerasan													[Purple bar]			
Penyusunan									[Magenta bar]							
Laporan Akhir									[Magenta bar]							

3.8 Rancangan Penelitian

Rancangan dari penelitian kali ini ditunjukkan oleh Tabel 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian

Nama Spesimen	Holding Time Solution Treatment	Media Pendingin Step Quench	Pengujian					
			OES	Metalografi	XRD	DSC	SME	Kekerasan
<i>As cast</i>	-	-	✓	✓	✓	-	-	✓
SQWB10	10 menit	Air – Air	-	✓	✓	-	-	✓
SQWB20	20 menit	Air – Air	-	✓	✓	-	-	✓
SQWB30	30 menit	Air – Air	-	✓	✓	✓	-	✓
SQOB10	10 menit	Oli – Air	-	✓	✓	-	-	✓
SQOB20	20 menit	Oli – Air	-	✓	✓	-	-	✓
SQOB30	30 menit	Oli – Air	-	✓	✓	✓	-	✓

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia

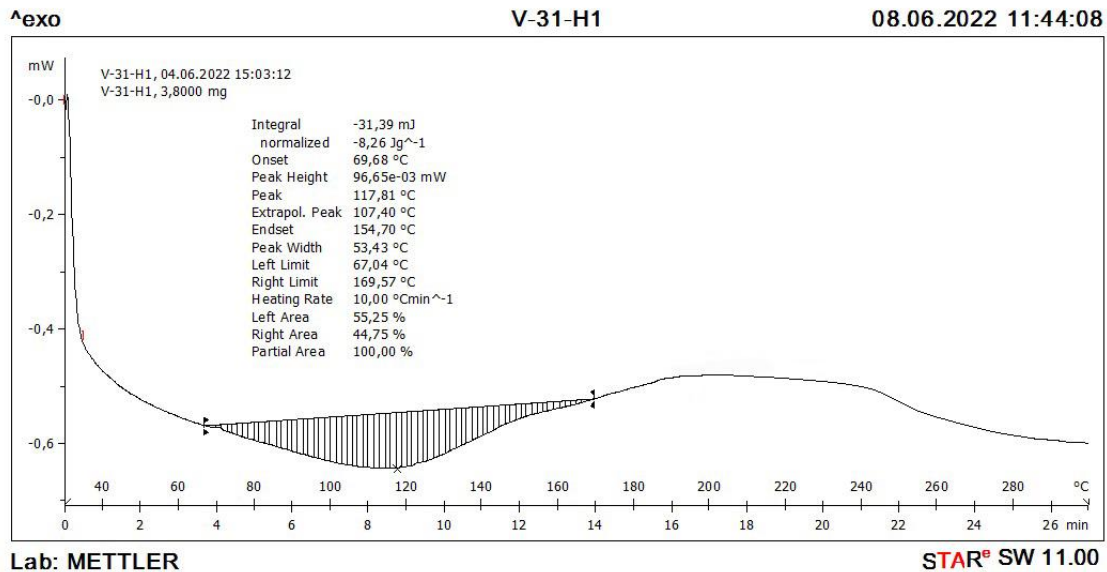
Telah dilakukan pengujian komposisi pada spesimen paduan Cu-Zn-Al *as cast* melalui pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Hasil pengujian komposisi ditunjukkan pada Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Cu-Zn-Al

Keterangan	Komposisi		
	Cu (%)	Zn (%)	Al (%)
<i>ASM Handbook Vol. 2</i>	65-80	10-30	5-10
Hasil Pengujian	<i>Balanced</i>	15,9	6,89

4.2 Hasil Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* Cu-15,9Zn-6,89Al

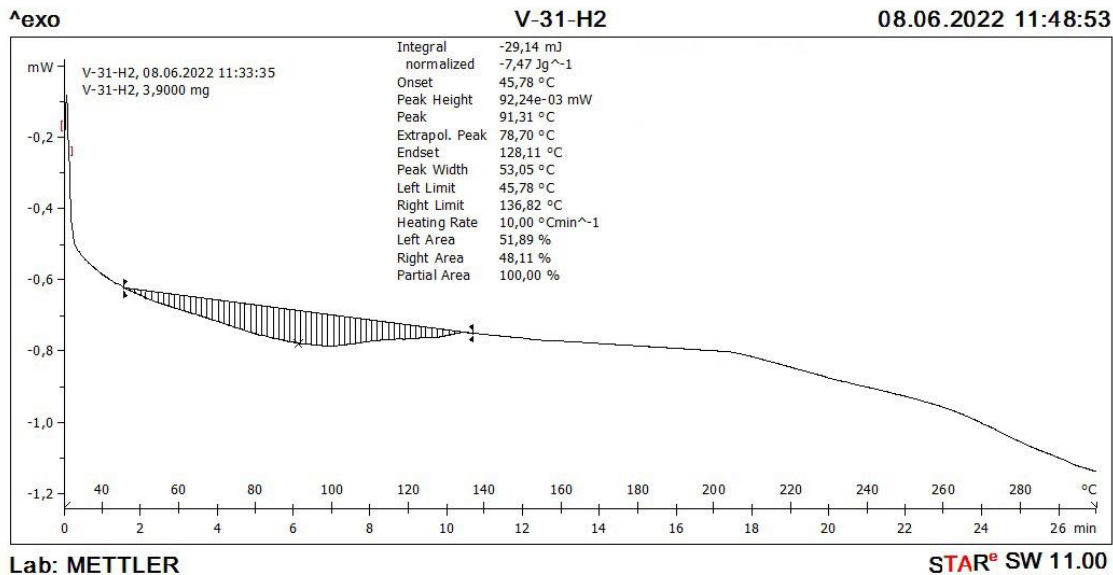
Telah dilakukan pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al. Selama pemanasan, temperatur *transformation start* ditandai dengan temperatur pada *peak onset* dan temperatur *transformation finish* ditandai dengan *peak endset* (Stošić et al., 2017). Gambar 4.1 merupakan grafik hasil pengujian DSC pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al yang diberi perlakuan *solution treatment* dengan *holding time* 30 menit dan *step quench* dengan media pendingin air (SQWB30).



Gambar 4.1 Grafik hasil pengujian DSC pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen SQWB30

Berdasarkan Gambar 4.1 di atas, terdapat puncak ke arah bawah yang mengindikasikan adanya reaksi endotermis akibat terjadinya transformasi austenit (Otsuka & Wayman, 1998). *Peak onset* yang mengindikasikan *austenite start* (A_s) berada pada temperatur 69,68°C dan *peak endset* yang mengindikasikan *austenite finish* (A_f) berada pada temperatur 154,70°C. Tidak terlihat adanya *peak* eksotermis yang mengindikasikan temperatur transformasi *martensite start* (M_s) dan *martensite finish* (M_f), sehingga dapat dikatakan bahwa transformasi tersebut terjadi di bawah temperatur 30°C.

Sementara itu, Gambar 4.2 merupakan grafik pengujian DSC pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al yang diberi perlakuan *solution treatment* dengan *holding time* 30 menit dan *step quench* dengan media pendingin oli (SQOB30).



Gambar 4.2 Grafik hasil pengujian DSC pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen SQOB30

Sama halnya dengan hasil pengujian DSC pada spesimen SQWB30, grafik hasil pengujian DSC pada spesimen SQOB30 yang ditunjukkan oleh Gambar 4.2 memiliki puncak ke arah bawah yang mengindikasikan adanya reaksi endotermis akibat terjadinya transformasi austenit (Otsuka & Wayman, 1998). *Peak onset* yang mengindikasikan *austenite start* (A_s) berada pada temperatur 45,78°C dan *peak endset* yang mengindikasikan *austenite finish* (A_f) berada pada temperatur 128,11°C. Tidak terlihat adanya *peak* eksotermis yang mengindikasikan temperatur transformasi *martensite start* (M_s) dan *martensite finish* (M_f), sehingga dapat dikatakan bahwa transformasi tersebut terjadi di bawah temperatur 30°C.

Grafik pengujian DSC pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 di atas menunjukkan bahwa spesimen SQWB memiliki temperatur transformasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur transformasi pada spesimen SQOB. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Asanovic pada tahun 2004, dimana paduan Cu-20,8Zn-5,8Al yang diberi perlakuan *step quench* dengan media pendingin air memiliki temperatur transformasi martensit dan austenit yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang diberi perlakuan *step quench* oli. Hasil tersebut menunjukkan bahwa temperatur transformasi sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan dan kondisi *solution treatment* (Asanovic et al., 2004). Akan tetapi berdasarkan hasil pengujian DSC yang telah dilakukan, paduan Cu-15,8Zn-6,89Al yang diberi perlakuan *step quench* air dan *step quench* oli tidak menunjukkan adanya *peak* eksotermis yang mengindikasikan temperatur transformasi martensit. Pada paduan Cu-Zn-Al, temperatur transformasi bervariasi dari -180°C sampai 200°C sebagai hasil dari perubahan sangat kecil pada komposisi (ASM International, 1990a). Sedikit perubahan komposisi, baik zinc atau aluminium (misal $\pm 0,5\%$), dapat menggeser temperatur transformasi sebesar $\pm 50^\circ\text{C}$ (Archekar, 2007). Perkiraan temperatur transformasi *martensite start* (M_s) dapat ditentukan melalui perhitungan dengan menggunakan Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2. Berdasarkan perhitungan melalui persamaan tersebut, secara teoritis temperatur *martensite start* (M_s) berada pada

temperatur $\sim(-81,972^{\circ}\text{C})$ (ASM International, 1990a), (Duerig & Melton, 1990). Hal ini sesuai dengan pernyataan Otsuka yang menyatakan bahwa temperatur transformasi *martensite start* (M_s) fasa β pada sistem biner Cu-Zn dengan kandungan Zn sekitar 40at.% berada jauh di bawah temperatur kamar, dimana Cu-15,9Zn-6,89Al memiliki ekivalensi Zn sebesar 41,88at.% (Otsuka & Wayman, 1998), (Archekar, 2007). Oleh karena itu, perlakuan *step quench* dengan media pendingin air dan oli belum cukup untuk menjangkau temperatur transformasi *martensite start* (M_s) sehingga tidak terbentuk struktur *twinned martensite* pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al.

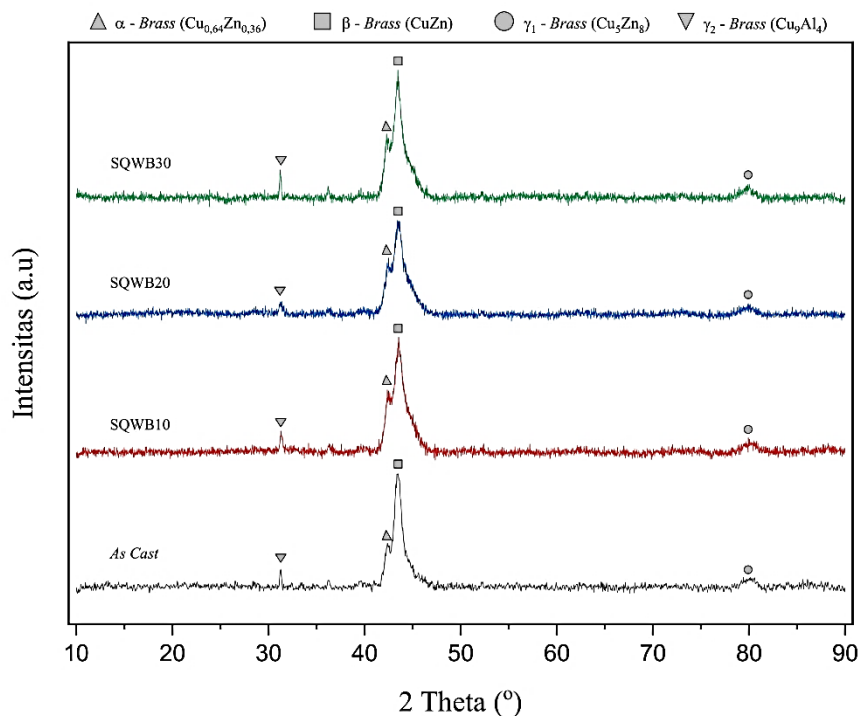
Temperatur transformasi pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al ditunjukkan oleh Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Temperatur transformasi pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen SQWB30 dan SQOB30

Spesimen	M_s ($^{\circ}\text{C}$)	A_s ($^{\circ}\text{C}$)	A_f ($^{\circ}\text{C}$)
SQWB30	$\sim(-81,97)$	69,68	154,70
SQOB30		45,78	128,11

4.3 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction Cu-15,9Zn-6,89Al

Telah dilakukan pengujian XRD pada spesimen *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* dengan media pendingin *step quench* air dan oli. Gambar 4.3 dan Tabel 4.3 di bawah merupakan hasil analisis XRD berupa grafik dan posisi *peak* dalam 2 theta ($^{\circ}$) yang teridentifikasi pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* air (SQWB10, SQWB20, dan SQWB30).



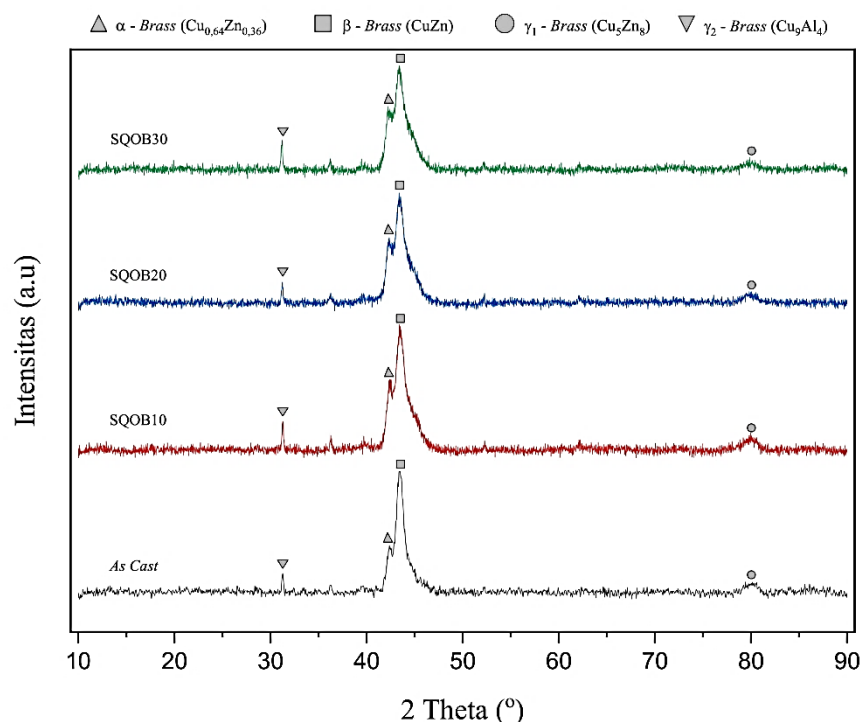
Gambar 4.3 Hasil pengujian XRD paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen *as cast*, SQWB10, SQWB20, dan SQWB30

Tabel 4.3 Posisi *peak* teridentifikasi dalam 2 theta (°) pada spesimen *as cast*, SQWB10, SQWB20, dan SQWB30

Perlakuan	α -Brass (Cu _{0,64} Zn _{0,36})	β -Brass (CuZn)	γ -Brass (Cu ₅ Zn ₈)	γ_2 -Brass (Cu ₉ Al ₄)
<i>As cast</i>	42,325	43,473	79,417	30,801
SQWB10	42,325	43,473	79,417	30,801
SQWB20	42,325	43,473	79,417	30,801
SQWB30	42,325	43,473	79,417	30,801

Dapat diketahui dari Gambar 4.3 dan Tabel 4.3 di atas bahwa spesimen *as cast*, SQWB10, SQWB20, dan SQWB30 memiliki *peak* yang menunjukkan fasa α -brass (Cu_{0,64}Zn_{0,36}) dengan struktur kristal kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333, fasa β -brass (CuZn) dengan struktur kristal kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231, fasa γ -brass (Cu₅Zn₈) dengan struktur kristal kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-025-1228, dan fasa γ_2 -brass (Cu₉Al₄) dengan struktur kristal kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-024-0003.

Adapun Gambar 4.4 dan Tabel 4.4 di bawah merupakan hasil analisis XRD berupa grafik dan posisi *peak* dalam 2 theta (°) yang teridentifikasi pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* oli (SQOB10, SQOB20, dan SQOB30).



Gambar 4.4 Hasil pengujian XRD paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen *as cast*, SQOB10, SQOB20, dan SQOB30

Tabel 4.4 Posisi *peak* teridentifikasi dalam 2 theta ($^{\circ}$) pada spesimen *as cast*, SQOB10, SQOB20, dan SQOB30

Perlakuan	α -Brass (Cu _{0,64} Zn _{0,36})	β -Brass (CuZn)	γ_2 -Brass (Cu ₅ Zn ₈)	γ_1 -Brass (Cu ₉ Al ₄)
<i>As cast</i>	42,325	43,473	79,417	30,801
SQOB10	42,325	43,473	79,417	30,801
SQOB20	42,325	43,473	79,417	30,801
SQOB30	42,325	43,473	79,417	30,801

Dapat diketahui dari Gambar 4.4 dan Tabel 4.4 di atas bahwa spesimen *as cast*, SQOB10, SQOB20, dan SQOB30 memiliki *peak* yang menunjukkan fasa α -brass (Cu_{0,64}Zn_{0,36}) dengan struktur kristal kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-050-1333, fasa β -brass (CuZn) dengan struktur kristal kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-002-1231, fasa γ -brass (Cu₅Zn₈) dengan struktur kristal kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-025-1228, dan fasa γ_2 -brass (Cu₉Al₄) dengan struktur kristal kubik yang sesuai dengan kode referensi ICDD 00-024-0003.

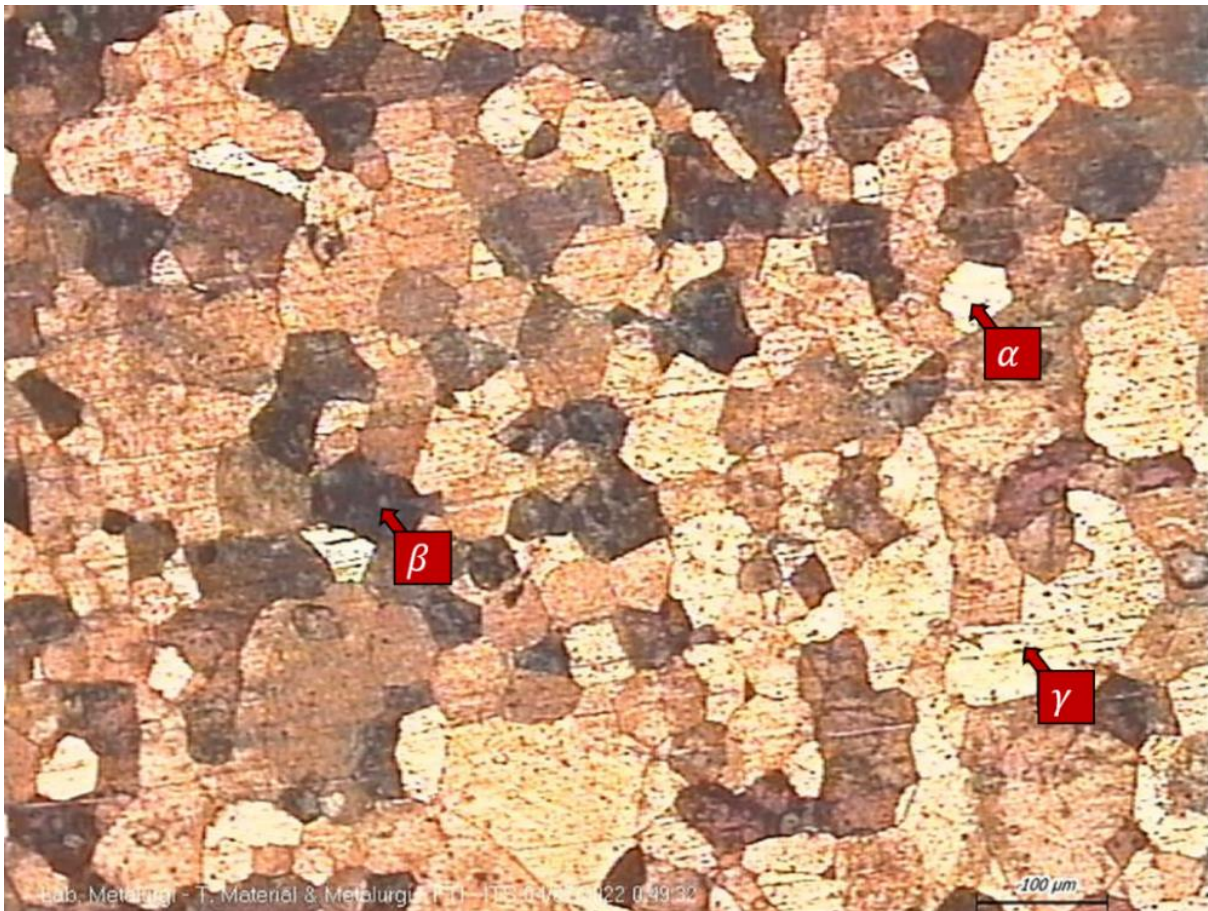
Pada sistem biner paduan Cu-Zn, fasa β pada paduan Cu-Zn-Al dengan komposisi Al lebih dari 6% akan terdekomposisi menjadi fasa α (larutan padat primer FCC dari Cu) dan γ (fasa kubik Cu₅Zn₈) pada temperatur 427 $^{\circ}$ C apabila dilakukan pendinginan secara sangat lambat. Sedangkan pada sistem biner paduan Cu-Al, fasa β akan mengalami dekomposisi menjadi α dan γ_2 (fasa kubik Cu₉Al₄) pada temperatur 565 $^{\circ}$ C apabila dilakukan pendinginan secara sangat lambat (Otsuka & Wayman, 1998). Akan tetapi apabila laju pendinginan yang dilakukan tidak cukup lambat, maka fasa β (CuZn) akan tetap ada hingga temperatur kamar (Higgins, 1973). Hal inilah yang menyebabkan spesimen *as cast* memiliki fasa α , β , γ dan γ_2 di temperatur kamar.

Paduan Cu-Zn-Al *shape memory alloy* memiliki fasa ekuilibrium α , β , dan γ . Fasa α dan γ secara umum dihindari karena tidak bertransformasi secara martensit, menghalangi transformasi martensit, dan masing-masing menjadi sangat lunak dan sangat keras. Fasa β adalah satu-satunya fasa yang berguna untuk perilaku *shape memory effect* dikarenakan dapat bertransformasi menjadi martensit (Bojoreanu, 2008). Proses *solution treatment* dilakukan untuk mendapatkan fasa tunggal β' (martensit) di temperatur kamar dengan cara memanaskan paduan hingga temperatur austenisasi dan dilakukan penahanan selama beberapa waktu untuk membiarkan pelarutan fasa α dan γ ke dalam fasa β (austenit), kemudian paduan tersebut didinginkan cepat ke temperatur ruang sehingga fasa α dan γ tidak sempat berdifusi dan didapatkan fasa tunggal β' (Adnyana, 1986). Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3 dan Gambar 4.4, paduan Cu-15,9Zn-6,89Al yang diberi perlakuan *solution treatment* dengan media pendingin *step quench* air dan oli memiliki *peak* fasa α dan γ dengan intensitas yang hampir mirip dengan spesimen *as cast*. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses dekomposisi β (austenit) menjadi α dan γ masih dapat terjadi meskipun telah dilakukan proses *step quench* ke temperatur kamar menggunakan media pendingin air dan oli. Hal ini dapat terjadi dikarenakan paduan Cu-15,9Zn-6,89Al yang digunakan pada penelitian ini memiliki temperatur transformasi *martensite start* (M_s) di bawah temperatur kamar, yaitu berdasarkan hasil pengujian DSC pada Tabel 4.2 adalah $\sim(-81,972^{\circ}\text{C})$. Oleh karena itu, media pendingin *step quench* yang digunakan belum cukup untuk menjangkau temperatur transformasi tersebut.

4.4 Hasil Pengujian Metalografi Cu-15,9Zn-6,89Al

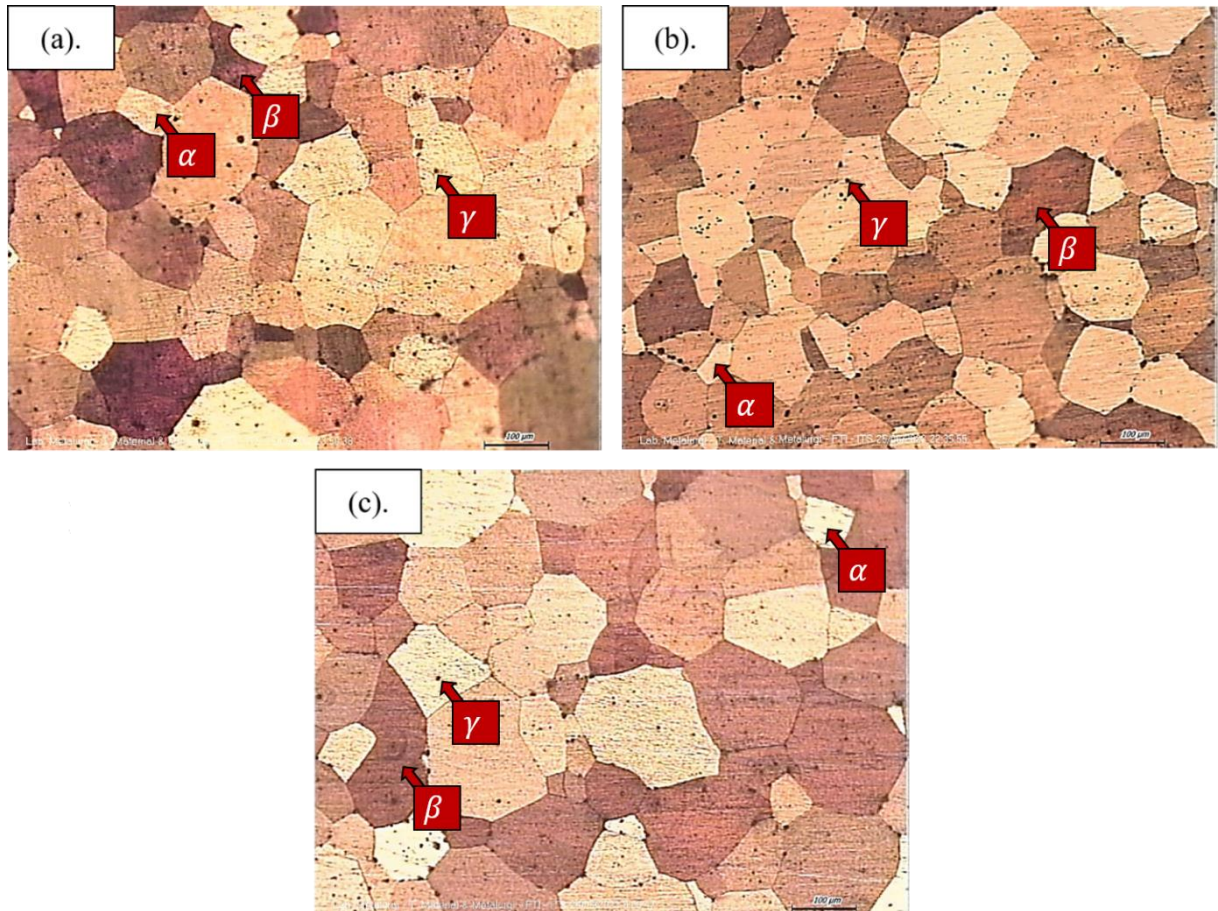
Telah dilakukan pengujian metalografi pada spesimen *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* dengan media pendingin *step quench* air dan oli. Gambar 4.5

di bawah merupakan hasil pengujian metalografi pada spesimen Cu-15,9Zn-6,89Al *as cast* dengan perbesaran 100 \times .



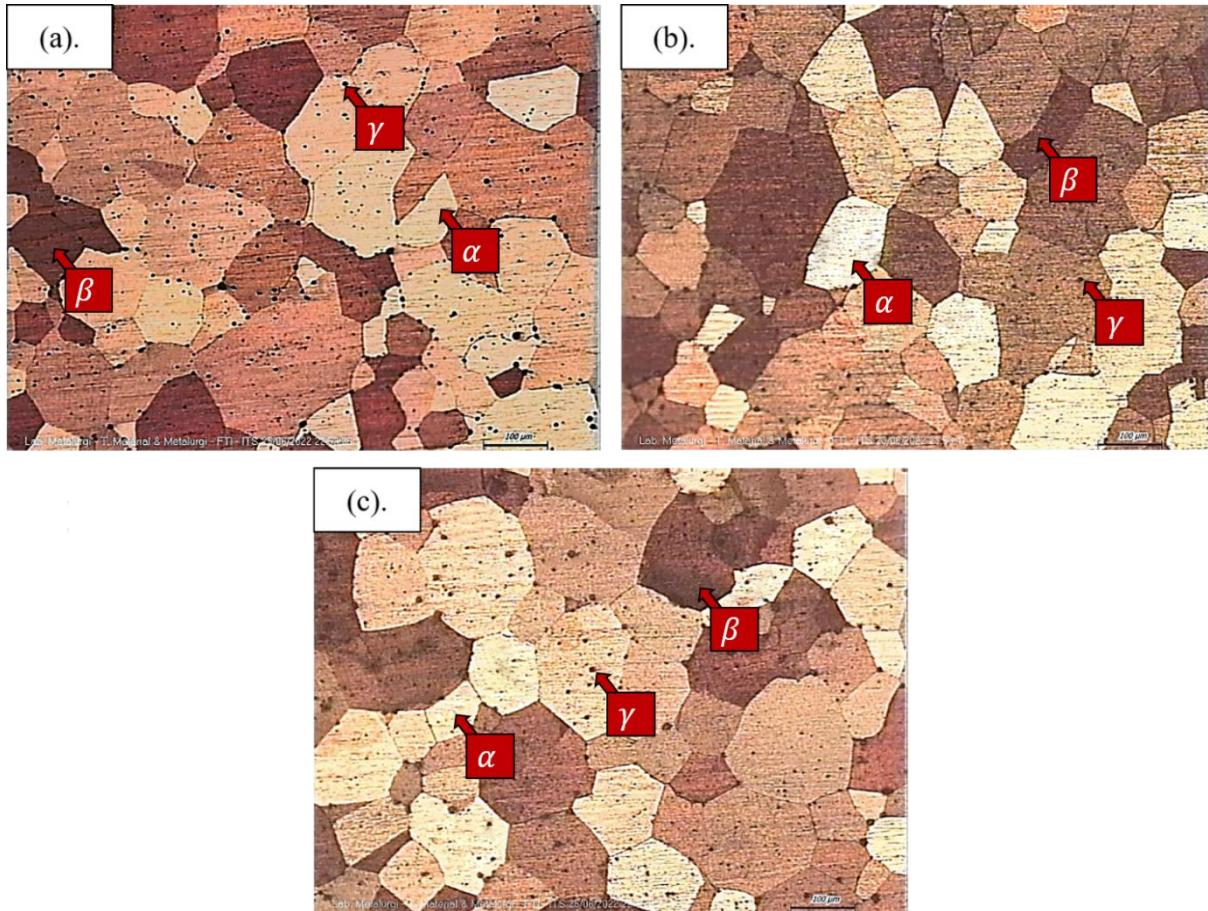
Gambar 4.5 Struktur mikro paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen *as cast* dengan perbesaran 100 \times

Berdasarkan hasil pengujian metalografi yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5 di atas, teridentifikasi adanya fasa α , β , dan γ . Setiap fasa pada struktur mikro memiliki karakteristik yang berbeda, dimana fasa α memiliki karakteristik berwarna terang dan fasa β berwarna gelap. Adapun fasa γ memiliki karakteristik berbentuk presipitat berwarna gelap (Voort, 2004). Selain itu, dapat diamati pada struktur mikro bahwa spesimen *as cast* didominasi oleh fasa β dengan fasa α yang lebih sedikit, dan sebagian kecil fasa γ . Hal ini sesuai dengan hasil pengujian XRD yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3, dimana terbentuk fasa α , β , dan γ dengan intensitas tertinggi berupa *peak* β yang paling tinggi dan diikuti oleh intensitas *peak* α dan γ yang lebih rendah.



Gambar 4.6 Struktur mikro paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen *as quench*: (a). SQWB10, (b). SQWB20, dan (c). SQWB30 dengan perbesaran 100 \times

Gambar 4.6 di atas merupakan hasil pengujian metalografi pada spesimen Cu-15,9Zn-6,89Al *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* air (SQWB10, SQWB20, dan SQWB30) pada perbesaran 100 \times . Sama halnya dengan spesimen *as cast*, hasil pengujian metalografi di atas menunjukkan adanya fasa α , β , dan γ dengan didominasi oleh fasa β dengan fasa α yang lebih sedikit, dan sebagian kecil fasa γ . Hal ini sesuai dengan hasil pengujian XRD yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3, dimana terbentuk fasa α , β , dan γ dengan intensitas *peak* β yang paling tinggi dan diikuti oleh intensitas *peak* α dan γ yang lebih rendah.



Gambar 4.7 Struktur mikro paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen *as quench* SQOB10, SQOB20, dan SQOB30 dengan perbesaran 100 \times

Gambar 4.7 di atas merupakan hasil pengujian metalografi pada spesimen Cu-15,9Zn-6,89Al *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* oli (SQOB10, SQOB20, dan SQOB30) pada perbesaran 100 \times . Berdasarkan hasil pengujian metalografi di atas, teridentifikasi adanya fasa α , β , dan γ dengan fasa didominasi oleh fasa β dengan fasa α yang lebih sedikit, dan sebagian kecil fasa γ . Hal ini sesuai dengan hasil pengujian XRD yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4, dimana terbentuk fasa α , β , dan γ dengan intensitas *peak* β yang paling tinggi dan diikuti oleh intensitas *peak* α dan γ yang lebih rendah.

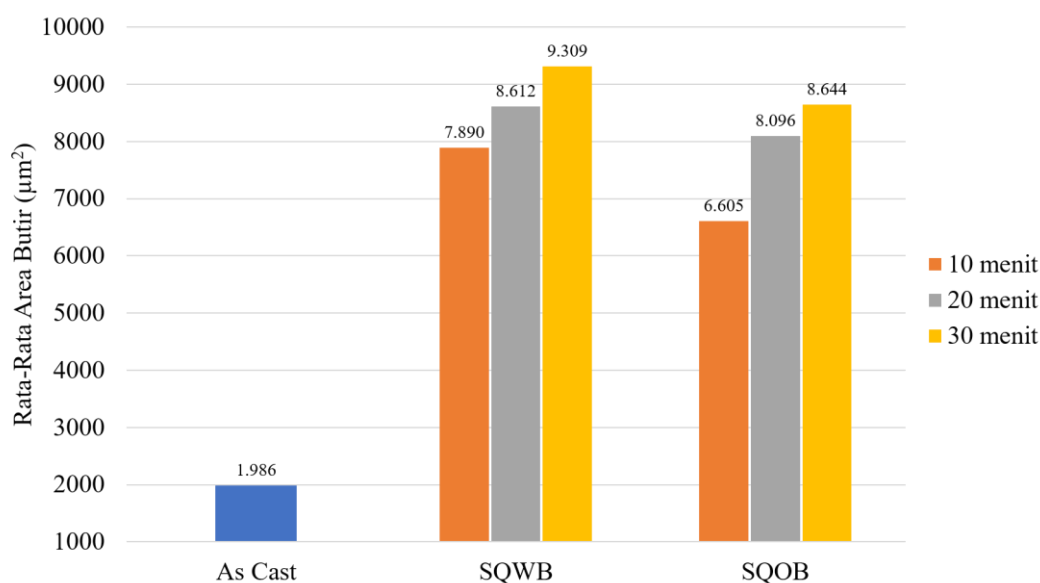
Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6 dan Gambar 4.7, paduan Cu-15,9Zn-6,89Al yang diberi perlakuan *solution treatment* selama 10, 20, dan 30 menit, serta dilakukan pendinginan cepat dengan media pendingin *step quench* air dan oli tidak menunjukkan adanya fasa martensit. Hal tersebut ditunjukkan juga oleh grafik hasil pengujian XRD pada Gambar 4.3 dan 4.4, dimana tidak terlihat adanya penurunan intensitas *peak* fasa α dan γ setelah dilakukannya proses *solution treatment* yang menandakan pelarutan fasa tersebut ke dalam β dan menjadi fasa tunggal β' setelah dilakukannya pendinginan cepat ke temperatur kamar. Penelitian ini memiliki hasil yang berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Yusuf pada tahun 2020 tentang pengaruh variasi *holding time solution treatment* pada paduan Cu-11,9Zn-6,72Al dengan proses *solution treatment* selama 10, 20, dan 30 menit pada temperatur 850 $^{\circ}$ C dan didinginkan cepat menggunakan media pendingin berupa *brine* ke temperatur kamar, dimana dihasilkan fasa α , β , γ , dan β' (martensit) pada ketiga spesimen (Yusuf et al., 2021). Selain itu, penelitian ini juga memiliki hasil yang berbeda dengan penelitian yang dilakukan

oleh Asanovic pada tahun 2004 tentang pengaruh variasi metode *quenching* menggunakan metode *step quench* dengan variasi media air mendidih (SQWB) dan oli (SQOB) pada temperatur 100°C selama 10 menit pada spesimen Cu-20,8Zn-5,8Al, dimana dihasilkan fasa β dan β' (martensit) pada seluruh spesimen dan presipitat fasa α pada spesimen SQWB (Asanovic et al., 2004). Tidak terbentuknya fasa martensit pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al dan adanya perbedaan dengan hasil penelitian sebelumnya yang memiliki perlakuan panas dengan parameter yang sama dikarenakan adanya perbedaan pada komposisi yang digunakan, dimana paduan Cu-15,9Zn-6,89Al memiliki temperatur *martensite start* (M_s) di bawah temperatur kamar (Leu & Hu, 1991), (Stošić et al., 2017), (Sampath, 2007). Hal ini selaras dengan hasil pengujian DSC pada Tabel 4.2, dimana paduan Cu-15,9Zn-6,89Al yang digunakan pada penelitian ini memiliki temperatur transformasi *martensite start* (M_s) sebesar $\sim(-81,972^\circ\text{C})$.

Telah dilakukan pengukuran area butir pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* air dan oli. Pengukuran dilakukan dengan cara mengolah gambar hasil metalografi pada perbesaran 100 \times menggunakan *software* ImageJ. Hasil pengukuran area butir ditunjukkan pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.8 sebagai berikut.

Tabel 4.5 Hasil pengukuran area butir (μm^2) paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* air dan oli

Spesimen	Rata-Rata Area Butir (μm^2)
<i>As cast</i>	1.986
SQWB10	7.890
SQWB20	8.612
SQWB30	9.309
SQOB10	6.605
SQOB20	8.096
SQOB30	8.644



Gambar 4.8 Grafik ukuran area butir (μm^2) paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* air dan oli

Adanya penambahan *holding time* pada proses *solution treatment* dapat meningkatkan ukuran butir (Adnyana, 1986). Hal ini sesuai dengan hasil pengukuran area butir yang ditunjukkan oleh Tabel 4.5 dan Gambar 4.8, dimana spesimen *step quench* air memiliki area butir $7.890 \mu\text{m}^2$, $8.612 \mu\text{m}^2$, dan $9.309 \mu\text{m}^2$, serta spesimen *step quench* oli memiliki area butir $6.605 \mu\text{m}^2$, $8.096 \mu\text{m}^2$, dan $8.644 \mu\text{m}^2$ berturut-turut pada *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit. Ukuran butir ditentukan oleh laju pengintian dan pertumbuhan. Apabila laju pengintian rendah dan laju pertumbuhan tinggi, maka akan dihasilkan butir yang kasar. Sementara itu, butir halus dihasilkan dari laju pengintian yang tinggi dan laju pertumbuhan yang rendah. Pada pemanasan, menambah *holding time* pada temperatur di atas temperatur rekristalisasi akan mendukung pertumbuhan butir sehingga akan menaikkan ukuran butir (Thelning, 1984), (Avner, 1982). Penelitian ini memiliki hasil yang sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Yusuf pada tahun 2020, dimana paduan Cu-11,9Zn-6,72Al memiliki diameter butir yang semakin besar seiring penambahan *holding time* pada proses *solution treatment* (Yusuf et al., 2021).

Selain itu, dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.8 bahwa spesimen yang dilakukan *step quench* dengan media pendingin air memiliki rata-rata area butir yang lebih besar dibandingkan dengan spesimen yang dilakukan *step quench* dengan media pendingin oli. Pada pendinginan, laju pendinginan merupakan faktor yang penting dalam menentukan ukuran butir. Proses pendinginan yang cepat akan menghasilkan inti dalam jumlah besar dan tidak memberi butir kesempatan untuk tumbuh, sehingga dihasilkan ukuran butir yang halus. Sementara itu, proses pendinginan yang lambat akan menghasilkan inti dalam jumlah sedikit dan memberi butir kesempatan untuk tumbuh menghasilkan ukuran butir yang kasar (Avner, 1982). Media pendingin air pada temperatur 100°C memiliki laju pendinginan yang rendah (Asanovic et al., 2004), (Leu & Hu, 1991). Hal ini dikarenakan temperatur awal pada media pendingin sudah tinggi yang mana dapat memperkecil energi yang dibutuhkan untuk sampai ke tahap *vapour blanket stage*, sehingga durasi *vapour blanket stage* yang mengisolasi panas akan semakin lama (Bates et al., 1993). Di sisi lain, media pendingin oli pada temperatur 100°C memiliki laju pendinginan yang lebih tinggi (Asanovic et al., 2004), (Leu & Hu, 1991). Hal ini dikarenakan pada temperatur ini oli memiliki fluiditas yang tinggi, sehingga kapasitas pendinginannya akan semakin besar (Thelning, 1984).

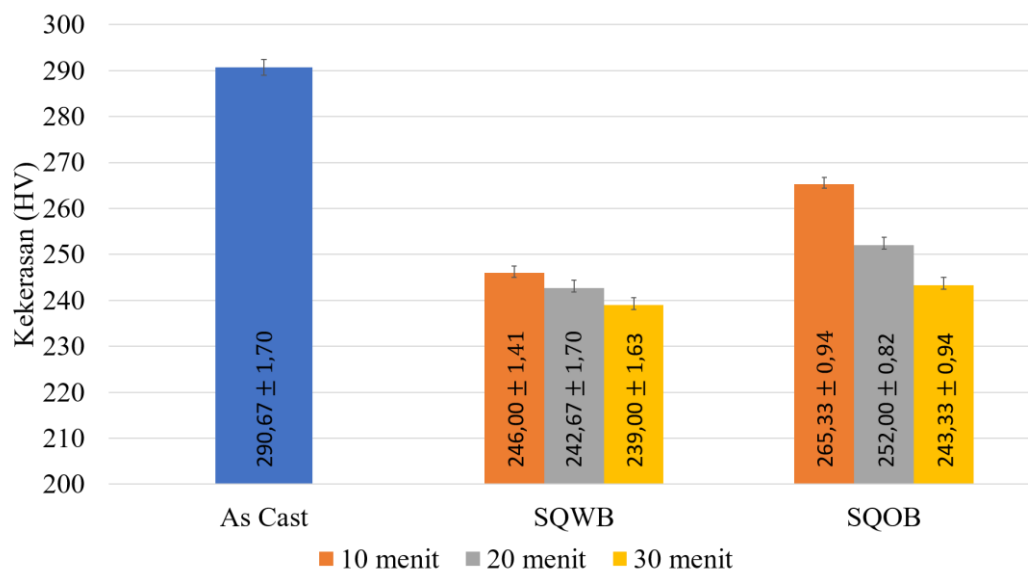
Dapat dilihat pula pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.8 bahwa spesimen *as cast* memiliki area butir yang lebih kecil dibandingkan dengan spesimen *as quench*. Terlihat bahwa spesimen *as cast* memiliki rata-rata area butir sebesar $1.986 \mu\text{m}^2$, sedangkan area butir terkecil pada spesimen *as quench* terdapat pada spesimen SQOB10 sebesar $6.605 \mu\text{m}^2$. Hal ini dikarenakan spesimen *as quench* mengalami pertumbuhan butir akibat proses *annealing*. Semakin tinggi temperatur dan semakin lama *holding time* pada proses *annealing* menyebabkan ukuran butir semakin besar. Hal tersebut terjadi dikarenakan kerapatan *lattice* yang semakin berkurang seiring kenaikan temperatur sehingga laju pertumbuhannya menjadi cepat dan terdapat cukup waktu untuk pertumbuhan butir (Avner, 1982).

4.5 Hasil Pengujian Kekerasan Cu-15,9Zn-6,89Al

Telah dilakukan pengujian kekerasan pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* air dan oli. Hasil pengujian kekerasan ditunjukkan oleh Tabel 4.6 dan Gambar 4.9 sebagai berikut.

Tabel 4.6 Hasil pengujian kekerasan (HV) paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* air dan oli

Spesimen	Rata-Rata Kekerasan (HV)	Standar Deviasi (HV)
<i>As cast</i>	290,67	1,70
SQWB10	246,00	1,41
SQWB20	242,67	1,70
SQWB30	239,00	1,63
SQOB10	265,33	0,94
SQOB20	252,00	0,82
SQOB30	243,33	0,94



Gambar 4.9 Grafik nilai rata-rata kekerasan (HV) paduan Cu-15,9Zn-6,89Al pada spesimen *as cast* dan *as quench* variasi *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit dengan media pendingin *step quench* air dan oli

Seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.6 dan Gambar 4.9, nilai rata-rata kekerasan pada paduan Cu-15,9Zn-5,89Al spesimen *as cast* lebih tinggi dibandingkan dengan nilai rata-rata kekerasan pada spesimen *as quench*. Terlihat bahwa spesimen *as cast* memiliki nilai rata-rata kekerasan sebesar $290,67 \pm 1,70$ HV, sedangkan nilai rata-rata kekerasan tertinggi pada spesimen *as quench* terdapat pada spesimen SQOB10 sebesar $265,33 \pm 0,94$ HV. Hasil penelitian ini berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Rizkivany pada tahun 2020, dimana paduan Cu-21Zn-5Al spesimen *as cast* memiliki nilai rata-rata kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai rata-rata kekerasan pada spesimen *as quench*. Dimana pada paduan tersebut, spesimen *as cast* didominasi oleh fasa α (Rizkivany et al., 2020). Sementara itu berdasarkan pengujian XRD dan metalografi yang telah dilakukan, spesimen *as cast* pada paduan Cu-15,9Zn-5,89Al memiliki fasa β yang lebih banyak dibandingkan dengan fasa α . Fasa α memiliki sifat yang lunak, sedangkan fasa β pada temperatur kamar bersifat keras (Higgins, 1973). Selain itu, paduan Cu-15,9Zn-5,89Al pada spesimen *as cast* memiliki nilai rata-rata kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan spesimen *as quench* disebabkan oleh ukuran butir pada spesimen tersebut lebih kecil dibandingkan dengan ukuran butir pada spesimen *as quench*. Semakin kecil ukuran butir, maka kekerasan akan semakin meningkat. Hal ini terjadi dikarenakan jumlah batas butir yang dapat mencegah gerakan dislokasi akan semakin

meningkat. Butir yang berbeda memiliki orientasi yang berbeda. Dislokasi yang melewati butir berbeda harus merubah arahnya, sehingga menjadi lebih sulit ketika misorientasi pada kristalografi meningkat. Selain itu, *atomic disorder* pada daerah batas butir akan menyebabkan bidang *slip* menjadi tidak kontinyu (Callister & Rethwisch, 2014).

Selain itu, hasil pengujian kekerasan pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.9 juga menunjukkan bahwa nilai rata-rata kekerasan pada paduan Cu-15,9Zn-5,89Al spesimen *as quench* mengalami penurunan seiring adanya penambahan waktu *holding time*. Nilai rata-rata kekerasan pada spesimen *step quench* air adalah $246,00 \pm 1,41$ HV, $242,67 \pm 1,70$ HV, dan $239,00 \pm 1,63$ HV, serta nilai rata-rata kekerasan pada spesimen *step quench* oli adalah $265,33 \pm 0,94$ HV, $252,00 \pm 0,82$ HV, dan $243,33 \pm 0,94$ HV berturut-turut pada *holding time solution treatment* 10, 20, dan 30 menit. Hal tersebut dikarenakan adanya penambahan *holding time* pada proses *solution treatment* dapat meningkatkan ukuran butir, dimana semakin kecil ukuran butir maka kekerasan akan meningkat (Adnyana, 1986), (Callister & Rethwisch, 2014). Penelitian ini memiliki hasil yang sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Yusuf pada tahun 2020, dimana paduan Cu-11,9Zn-6,72Al memiliki nilai rata-rata kekerasan yang menurun seiring penambahan *holding time* pada proses *solution treatment* (Yusuf et al., 2021).

Dapat dilihat pula pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.9 bahwa nilai rata-rata kekerasan pada paduan Cu-15,9Zn-5,89Al spesimen *step quench* oli lebih tinggi dibandingkan dengan nilai rata-rata kekerasan pada spesimen *step quench* air. Hal ini disebabkan karena ukuran butir pada spesimen *step quench* oli lebih kecil dibandingkan dengan ukuran butir pada spesimen *step quench* air akibat laju pendinginan pada spesimen *step quench* oli yang lebih tinggi dibandingkan dengan *step quench* air (Leu & Hu, 1991). Semakin kecil ukuran butir maka kekerasan akan meningkat dikarenakan jumlah batas butir akan semakin banyak (Adnyana, 1986), (Callister & Rethwisch, 2014).

4.6 Hasil Pengujian *Shape Memory Effect* Cu-15,9Zn-6,89Al

Pengujian *shape memory effect* digunakan untuk menganalisis persentase *shape recovery* dari paduan *shape memory alloy* setelah dilakukan deformasi. *Shape memory effect* dianalisis dengan menekuk sampel hingga derajat tertentu (θ_0) dan dipanaskan hingga temperatur transformasi austenit untuk memulihkan bentuknya. Selanjutnya, sudut akhir diukur (θ_1) dan persentase *shape memory effect* dihitung menggunakan Persamaan 2.3 (Chanmuang et al., 2018). Spesimen yang digunakan pada pengujian ini berbentuk *wire* dengan ketebalan 2 mm dan panjang 100 mm sesuai dengan standar ASTM F2082. Spesimen *wire* kemudian ditekuk dengan sudut penekukan sebesar 5° . Hal ini dilakukan untuk menghindari spesimen patah akibat getas apabila dilakukan penekukan dengan sudut di atas 5° . Proses penekukan pada pengujian *shape memory effect* melibatkan deformasi plastis. Deformasi plastis berhubungan dengan adanya gerakan dislokasi sebagai respon dari tegangan geser yang diberikan (Callister & Rethwisch, 2014). Semakin kecil ukuran butir, maka jumlah batas butir yang dapat mencegah gerakan dislokasi semakin meningkat. Oleh karena itu, proses penekukan semakin sulit dilakukan apabila ukuran butir semakin halus. Selain itu, kekerasan yang tinggi juga dapat menurunkan keuletan (Callister & Rethwisch, 2014). Sedangkan, spesimen Cu-Zn-Al yang digunakan pada penelitian ini memiliki nilai rata-rata kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian Rizkivany (2020), Yusuf (2021), Masrul (2021), dan Martin (2022) (Rizkivany et al., 2020), (Yusuf et al., 2021), (Masrul et al., 2021), (Martin et al., 2022). Setelah mengalami proses deformasi akibat penekukan, spesimen kemudian dipanaskan hingga mencapai temperatur *austenite finish* (A_f) yang didapat melalui pengujian DSC pada Tabel 4.2. Adapun hasil pengujian *shape memory effect* pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen *as quench* ditunjukkan oleh Tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4.7 Hasil pengujian *shape memory effect* pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al spesimen *as quench*

Spesimen	Recovery (%)
SQWB10	0
SQWB20	0
SQWB30	0
SQOB10	0
SQOB20	0
SQOB30	0

Berdasarkan Tabel 4.7 di atas, seluruh spesimen tidak menunjukkan adanya *recovery* setelah dipanaskan hingga temperatur transformasi *austenite finish* (A_f) yang menandakan *shape memory effect* tidak terjadi. Hal ini terjadi dikarenakan paduan Cu-15,9Zn-6,89Al yang dilakukan *solution treatment* pada temperatur 850°C dengan variasi *holding time* 10, 20, dan 30 menit, serta dilakukan pendinginan cepat ke temperatur kamar menggunakan media pendingin *step quench* air dan oli tidak memiliki fasa *twinned martensite*. Transformasi SME satu arah melibatkan fasa *twinned martensite*, dimana terjadi reorientasi dari *twinned martensite* ke *detwinned martensite* apabila sampel yang berada pada temperatur di bawah temperatur *martensite finish* (M_f) diberikan pembebanan tertentu sehingga terdeformasi plastis. Deformasi plastis tersebut dapat dipulihkan dengan pemanasan yang menyebabkan transformasi fasa berbalik dari *detwinned martensite* ke austenit (Savi et al., 2016).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Perlakuan *solution treatment* dengan variasi *holding time* 10, 20, dan 30 menit, serta variasi media pendingin *step quench* berupa air dan oli pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al menghasilkan struktur mikro berupa fasa α , β , dan γ tanpa adanya fasa β' (martensit). Hal tersebut diakibatkan karena temperatur *martensite start* (M_s) pada paduan Cu-15,9Zn-6,89Al berada di bawah temperatur kamar, yaitu $\sim(-81,972^\circ\text{C})$. Ukuran butir terbesar pada spesimen *solution treatment* adalah $9.309 \mu\text{m}^2$ yang terdapat pada spesimen SQWB30 dan terkecil adalah $6.605 \mu\text{m}^2$ yang terdapat pada spesimen SQOB10. Sementara itu, spesimen *as quench* memiliki ukuran butir yang lebih besar dibandingkan dengan spesimen *as cast*. Spesimen *as cast* memiliki rata-rata area butir sebesar $1.986 \mu\text{m}^2$, sedangkan area butir terkecil pada spesimen *as quench* terdapat pada spesimen SQOB10 sebesar $6.605 \mu\text{m}^2$.
2. Nilai kekerasan terendah pada spesimen *as quench* adalah $239,00 \pm 1,63$ HVN yang terdapat pada spesimen SQWB30 dan nilai kekerasan tertinggi adalah $265,33 \pm 0,94$ HVN yang terdapat pada spesimen SQOB10.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menentukan komposisi paduan dengan mempertimbangkan temperatur transformasi yang dihasilkan melalui perhitungan perkiraan temperatur transformasi sebelum dilakukan proses pengecoran.
2. Melakukan pengecoran menggunakan vakum *furnace* dengan pengukur suhu untuk menghindari *molten metal* bereaksi dengan udara dan menghindari adanya *material loss*.
3. Melakukan penelitian tentang pengaruh variasi *bath temperature* media pendingin *step quench* pada proses *solution treatment*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Adnyana, D. N. (1986). Effect of Grain Size on Transformation Temperatures in A Grain-Refined Copper Based Shape Memory Alloy. *Metallography*, 19, 187–196.
- Archekar. (2007). *US Patent: Cu–Zn–Al(6%)*. *Shape Memory Alloy With Low Martensitic Temperature and A Process For Its Manufacture* (Patent No. US 7,195,681 B2).
- Asanovic, V. D., Delijic, K. H., Leka, Z. B., & Bosnjak, B. T. (2004). The Effect of Heat Treatment on the Martensitic Transformation and Properties of Cu-Zn-Al Alloy. *Journal of The Mechanical Behaviour of Materials*, 15, 219–238.
- ASM International. (1988). *ASM Handbook Volume 15 : Casting*. American Society for Metals (ASM).
- ASM International. (1990a). *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. American Society for Metals (ASM).
- ASM International. (1990b). *ASM Handbook Volume 4 : Heat Treating*. ASM International.
- ASM International. (1992). *ASM Handbook Volume 3 : Alloy Phase Diagrams*. American Society for Metals (ASM).
- Avner, S. H. (1982). *Introduction to Physical Metallurgy* (2nd ed.). Mc Graw Hill.
- Bates, C. E., Landig, T., & Seitanikis, G. (1985). Quench Factor Analysis: A powerful Tool Comes of Age. *Heat Treating*, 13–17.
- Bates, C. E., Totten, G. E., & Clinton, N. A. (1993). *Handbook of Quenchants and Quenching Technology*. American Society for Metals (ASM).
- Bojoreanu, L. G. (2008). The Influence of Austenitization on The Morphology of α -Phase in Tempered Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys. *Materials Science Engineering*, 481–482, 395–403.
- Brown, J. (1999). *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*. Elsevier Science.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering : An Introduction*. John Wiley & Sons, Inc.
- Chandrasekaran, M., Cesari, E., Wolska, J., Hurtado, I., Stalmans, R., & Dutkiewicz, J. (1995). Stabilisation of Martensite in Copper Based Shape Memory Alloys. *Journal de Physique IV*, 5(C2), 143–151. <https://doi.org/10.1051/jp4:1995222i>
- Chanmuang, C., Niyomsoan, S., & Chomsaeng, N. (2018). Effect of Indium in Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 1082(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1082/1/012060>
- Duerig, T. W., & Melton, K. N. (1990). Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. In *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-04566-5>
- Greaves, R. H., & Wrington, H. (1971). *Practical Microscopical Metallography*. Chapman & Hall.
- Higgins, R. A. (1973). *Engineering Metallurgy Part I : Applied Physical Metallurgy* (6th ed.). English Universities Press.
- Jiang, X., Wang, Y., Pan, F., Jing, Z., Huang, J., & Li, B. (2018). Numerical Investigation of Preload Process of Bolted Joint with Superelastic Shape Memory Alloy. *Metals*, 8(9), 1–24. <https://doi.org/10.3390/met8090730>
- Johnson, A. D., Martynov, V., & Gilbertson, R. G. (2014). *Frangible Shape Memory Alloy Fire Sprinkler Valve Actuator*.
- Kaufmann, E. N. (2003). *Characterization Of Materials: Volumes 1 and 2*. John Wiley & Sons.
- Leu, S. S., & Hu, C. T. (1991). The Aging Effect on Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys with Low Contents of Aluminum. *Metallurgical Transactions A*.
- Lexcellent, C. (2013). *Shape Memory Alloys Handbook*. Wiley.
- Lopez-Ferreño, I., Brezczewski, T., Ruiz-Larrea, I., & Lopez-Echarri, A. (2013). Thermal

- Treatments and Transformation Behavior of Cu-Al-Be Shape Memory Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 577, 463–467.
- Martin, S., Rochiem, R., & Ramadhani, M. (2022). Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Metode Quenching pada Solution Treatment terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Shape Memory Effect pada Paduan Cu-14,6Zn-7,41Al Shape Memory Alloy. *Jurnal Teknik ITS*, 1–8.
- Masrul, R. I., Ramadhani, M., & Rochiem, R. (2021). Analisis Pengaruh Variasi Quenching Solution Treatment dan Proses Artificial Aging terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Cu-Zn-Al Shape Memory Alloy. *Jurnal Teknik ITS*, 6–11.
- Mohd. Jani, J., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A Review of Shape Memory Alloy : Research, Applications, and Opportunities. *Materials and Design*, 56, 1078–1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>
- Nikula, R. (2002). Introduction to Differential Scanning Calorimetry. In *Analysis*. Physics Departement.
- Otsuka, K., & Wayman, C. M. (1998). *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press.
- Qixuan, J. B., & Hsu, T. Y. (1987). The Aging Effect on Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys with Low Contents of Aluminum. *Material Science Engineering*, 93, 11–205.
- Ramadhani, M., Rochiem, R., & Rizkivany, L. (2020). Pengaruh Holding Time Proses Solution Treatment dan Variasi Media Pendingin pada Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys terhadap Efek Shape Memory dan Struktur Mikro. *Teknik ITS*, 9(1), F91–F96.
- Sampath, V. (2007). Effect of Thermal Processing on Microstructure and Shape-Memory Characteristics of A Copper-Zinc-Aluminum Shape-Memory Alloy. *Material Manufacture Process*, 22, 9–14.
- Savi, M. A., Paiva, A., de Araujo, C. J., & de Paula, A. S. (2016). Shape Memory Alloys. In *Dynamics of Smart Systems and Structures: Concepts and Applications* (pp. 155–188). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29982-2_8
- Scott, D., & Schwab, R. (2019). *Metallography in Archaeology and Art*. Springer International Publishing.
- Setiabudi, A. R. H. A. M. (2012). Karakterisasi Material: Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia. *UPI Press*, 1.
- Sharma, A. K., Rajan, T. V., & Sharma, C. P. (2011). *Heat Treatment: Principles and Techniques*. PHI Learning.
- 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>
- Thelning, K.-E. (1984). *Steel and Its Heat Treatment* (2nd ed.). Butterworths.
- Voort, G. F. V. (2004). *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*. American Society for Metals (ASM).
- West, E. G. (1982). *Copper and Its Alloys*. E. Horwood.
- Widyastuti, Ardhyanta, H., Purwaningsih, H., & Quluq, R. M. (2019). *Karakterisasi Material Bagian 1: Komposisi, Topografi, dan Sifat Mekanik*. (ITS Press, 2019). ITS.
- Yusuf, M. F., Ramadhani, M., & Rochiem, R. (2021). Analisis Pengaruh Holding Time Proses Solution Treatment dan Artificial Aging terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Cu-Zn-Al Shape Memory Alloy. *Jurnal Teknik ITS*, 10.
- Zipperian, D. C. (2011). *Metallographic Handbook*. PACE Technologies.
-

LAMPIRAN

1. Perhitungan Kebutuhan Massa Bahan

- Komposisi Bahan

Bahan	Komposisi	
<i>Pure Cu</i>	1	Cu
<i>Brass</i>	0,59	Cu
	0,3775	Zn
<i>Pure Al</i>	1	Al

- Target Komposisi Bahan

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

- Densitas Bahan

Densitas Material (g/cm ³)	
Cu	8,96
Zn	7,14
Al	2,7

- Dimensi Cetakan

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

- Total Densitas

$$\text{Total Densitas} = \text{Densitas Cu} \times \% \text{Cu} + \text{Densitas Zn} \times \% \text{Zn} + \text{Densitas Al} \times \% \text{Al}$$

$$\text{Total Densitas} = 6,918 + 1,136 + 0,186 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\text{Total Densitas} = 8,239306 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

- Massa Total Target

$$\text{Massa Total Target} = \text{Total Densitas (g/cm}^3\text{)} \times \text{Volume (cm}^3\text{)}$$

$$\text{Massa Total Target} = 8,239 \text{ (g/cm}^3\text{)} \times 194,410 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\text{Massa Total Target} = 1601,800 \text{ (g)}$$

- Massa Target
 $\text{Massa Cu} = \% \text{ Cu} \times \text{Massa Total Target}$
 $\text{Massa Zn} = \% \text{ Zn} \times \text{Massa Total Target}$
 $\text{Massa Cu} = \% \text{ Zn} \times \text{Massa Total Target}$

Sehingga:

Unsur	Massa Target (g)
Cu	1236,750
Zn	254,687
Al	110,364

- Massa Bahan
 $\text{Cu Balance} : \text{Pure Cu} + 0,59 \times \text{Brass} = 136,750 \text{ (g)}$
 $\text{Zn Balance} : 0,3775 \times \text{Brass} = 254,686 \text{ (g)}$
 $\text{Al Balance} : \text{Pure Al} = 110,364 \text{ (g)}$

Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Pure Cu} &= 838,70 \text{ (g)} \\ \text{Brass} &= 674,66 \text{ (g)} \\ \text{Pure Al} &= 110,364 \text{ (g)} \end{aligned}$$

- Massa Total Bahan
 $\text{Massa Total Bahan} = \text{Massa Pure Cu} + \text{Massa Brass} + \text{Massa Pure Al (g)}$
 $\text{Massa Total Bahan} = 1623,73 \text{ (g)}$
- Massa Pengotor
 $\text{Massa Pengotor} = \text{Massa Total Bahan} - \text{Massa Total Target (g)}$
 $\text{Massa Pengotor} = 21,927 \text{ (g)}$

LAPORAN AKHIR
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

2. Hasil Pengujian *Optical Emission Spectroscopy*




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

LAPORAN HASIL PENGUJIAN
REPORT ON THE TEST RESULT

Nomor : 0441 /PL19/BJP/2022
Number

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

Kalab. Uji Bahan
Head of DT & MT Laboratory

Hendri Budi Kurniyanto, SSI, ST
NIP. 199003072019031010

Keterangan / Notes:

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

Halaman
1 dari 2



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

LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN
ATTACHMENT OF THE TEST RESULT

Nomor Number	: 0441 /PL19/BJP/2022
-----------------	-----------------------

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

F.08-LUB-PPNS

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

Surabaya, April 12, 2022,

Examined by,	Verified by,
	
MUHARROR	Hendri/Budi.K.

UNIT LAYANAN BISNIS DAN JASA PRODUKSI

Keterangan / Notes :

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

Halaman
2 dari 2



**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY RESULT

No. SPK : 14-IV/PL19/BJP/2022 Penandaan : -
Pelanggan : Sdr. Ferdy - T. Material ITS Material : CuZnAl alloy
Proyek : - Dimensi : 20x25x33mm
Kepala Lab. : Hendri Budi K., S.ST., M.T. Heat No. : -
Program : CU_000 Keterangan : -

	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni
1	74.2	15.9	1.95	0.375	0.0051	< 0.0002	0.222	0.134
2	74.1	16.0	2.03	0.283	0.0049	< 0.0002	0.231	0.127
3	74.2	15.8	2.08	0.296	0.0022	< 0.0002	0.218	0.129
Ave	74.2	15.9	2.02	0.318	0.0041	< 0.0002	0.224	0.130

	Si	Mg	Cr	Al	S	As	Be	Ag
1	0.0025	< 0.0005	0.0013	6.88	0.0011	0.0135	0.0003	0.0102
2	0.0062	< 0.0005	0.0017	6.88	0.0009	0.0122	0.0006	0.0104
3	0.0069	< 0.0005	0.0022	6.92	0.0013	0.0082	0.0004	0.0104
Ave	0.0052	< 0.0005	0.0017	6.89	0.0011	0.0113	0.0004	0.0103

	Co	Bi	Cd	Sb	Zr	B	Se	Te
1	0.0085	0.0206	0.0042	0.0543	0.0012	< 0.0001	< 0.0001	0.121
2	0.0069	0.0180	0.0050	0.0687	0.0012	< 0.0001	< 0.0001	0.125
3	0.0074	0.0168	0.0042	0.0550	0.0010	< 0.0001	< 0.0001	0.0776
Ave	0.0076	0.0185	0.0045	0.0593	0.0011	< 0.0001	< 0.0001	0.108

	Ti	C	Nb
1	< 0.0001	< 0.0001	0.0035
2	< 0.0001	< 0.0001	0.0136
3	< 0.0001	< 0.0001	0.0038
Ave	< 0.0001	< 0.0001	0.0070

Surabaya, 4/12/2022



Diuji oleh: Muharror

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

3. Pattern List Spesimen As Cast

Accepted Ref. Pattern: 00-002-1231										
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]	Display Color	Database ID	Subfiles	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	41	-	Blue	C:\Users\F...	Alloy, ...	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	32	-	Lime	C:\Users\F...	Alloy, ...	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	33	-	Gray	C:\Users\F...	Alloy, ...	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	14	-	Mar...	C:\Users\F...	Alloy, ...	

Selected Candidate: 00-019-0010											
No.	Ref. Code	Score	Compound Name	Chemical Formula	Scale Factor	Displacement [°2Th.]	ML	NML	TL	Database ID	Subfiles
1	00-039-0400	4	Copper Zinc	Cu Zn ₂	0,252	0,000	2	1	14	C:\Users\F...	Alloy, ...
2	01-085-1327	1	Aluminum	Al	0,275	0,000	1	1	5	C:\Users\F...	Alloy, ...
3	00-004-0787	1	Aluminum	Al	0,266	0,000	1	1	5	C:\Users\F...	Alloy, ...
4	00-047-1393	0	Aluminum Copp...	Al _{4.2} Cu _{3.2} Zn...	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
5	01-087-0713	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
6	00-019-0010	0	Aluminum Copper	Al _{3.892} Cu _{6.10...}	1,000	0,000	4	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
7	00-002-1309	0	Aluminum Copper	Al ₂ Cu	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Inorga...
8	00-004-0831	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
9	00-041-1435	0	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
10	01-085-1326	0	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...
11	01-071-0397	0	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	1	0	31	C:\Users\F...	Alloy, ...
12	00-001-1238	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	7	C:\Users\F...	Inorga...
13	00-035-1152	0	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	8	C:\Users\F...	Alloy, ...

4. Pattern List Spesimen SQWB10

Accepted Ref. Pattern: 00-002-1231										
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]	Display Color	Database ID	Subfiles	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	38	-	Blue	C:\Users\F...	Alloy, ...	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	32	-	Lime	C:\Users\F...	Alloy, ...	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	28	-	Gray	C:\Users\F...	Alloy, ...	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	14	-	Mar...	C:\Users\F...	Alloy, ...	

Selected Candidate: 00-028-0006											
No.	Ref. Code	Score	Compound Name	Chemical Formula	Scale Factor	Displacement [°2Th.]	ML	NML	TL	Database ID	Subfiles
6	00-001-1238	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	7	C:\Users\F...	Inorga...
7	00-002-1309	0	Aluminum Copper	Al ₂ Cu	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Inorga...
8	01-087-0713	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
9	00-041-1435	0	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
10	00-039-0400	0	Copper Zinc	Cu Zn ₂	1,000	0,000	1	0	14	C:\Users\F...	Alloy, ...
11	01-071-0397	0	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	1	0	31	C:\Users\F...	Alloy, ...
12	00-047-1393	0	Aluminum Copp...	Al _{4.2} Cu _{3.2} Zn...	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
13	00-035-1152	0	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	8	C:\Users\F...	Alloy, ...
14	01-085-1326	0	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...
15	00-025-0322	0	Copper Zinc	(Cu , Zn)	1,000	0,000	2	0	6	C:\Users\F...	Alloy, ...
16	00-035-1151	0	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	1	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
17	00-028-0006	0	Aluminum Copper	Al Cu ₄	1,000	0,000	1	0	17	C:\Users\F...	Alloy, ...

5. *Pattern List* Spesimen SQWB20

Accepted Ref. Pattern: 00-002-1231										
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]	Display Color	Database ID	Subfiles	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	37	-	Blue	C:\Users\F...	Alloy, ...	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	29	-	Lime	C:\Users\F...	Alloy, ...	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	38	-	Gray	C:\Users\F...	Alloy, ...	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	15	-	Mar...	C:\Users\F...	Alloy, ...	

Selected Candidate: 00-041-1435											
No.	Ref. Code	Score	Compound Name	Chemical Formula	Scale Factor	Displacement [°2Th.]	ML	NML	TL	Database ID	Subfiles
1	00-047-1393	0	Aluminum Copp...	Al _{4.2} Cu _{3.2} Zn...	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
2	00-028-0006	0	Aluminum Copper	Al Cu ₄	1,000	0,000	1	0	17	C:\Users\F...	Alloy, ...
3	01-087-0713	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
4	00-019-0010	0	Aluminum Copper	Al _{3.892} Cu _{6.10} ...	1,000	0,000	4	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
5	00-039-0400	0	Copper Zinc	Cu Zn ₂	1,000	0,000	1	0	14	C:\Users\F...	Alloy, ...
6	00-002-1309	0	Aluminum Copper	Al ₂ Cu	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Inorga...
7	00-041-1435	0	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
8	00-004-0831	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
9	01-085-1326	0	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...
10	01-071-0397	0	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	1	0	31	C:\Users\F...	Alloy, ...
11	00-035-1152	0	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	8	C:\Users\F...	Alloy, ...
12	00-025-0322	0	Copper Zinc	(Cu , Zn)	1,000	0,000	2	0	6	C:\Users\F...	Alloy, ...
13	00-004-0836	0	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...

6. *Pattern List* Spesimen SQWB30

Accepted Ref. Pattern: 00-002-1231										
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]	Display Color	Database ID	Subfiles	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	37	-	Blue	C:\Users\F...	Alloy, ...	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	28	-	Lime	C:\Users\F...	Alloy, ...	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	29	-	Gray	C:\Users\F...	Alloy, ...	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	12	-	Mar...	C:\Users\F...	Alloy, ...	

Selected Candidate: 00-041-1435											
No.	Ref. Code	Score	Compound Name	Chemical Formula	Scale Factor	Displacement [°2Th.]	ML	NML	TL	Database ID	Subfiles
1	00-...	15	Copper Zinc	Cu Zn ₅	0,265	0,000	2	1	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
2	00-...	3	Aluminum Copper	Al _{3.892} Cu _{6.10} ...	4,549	0,000	4	1	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
3	00-...	0	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
4	01-...	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
5	00-...	0	Aluminum Copp...	Al _{4.2} Cu _{3.2} Zn...	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
6	00-...	0	Aluminum Copper	Al ₂ Cu	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Inorga...
7	00-...	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
8	00-...	0	Copper Zinc	Cu Zn ₂	1,000	0,000	1	0	14	C:\Users\F...	Alloy, ...
9	00-...	0	Aluminum Copper	Al Cu ₄	1,000	0,000	1	0	17	C:\Users\F...	Alloy, ...
10	01-...	0	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...
11	00-...	0	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Inorga...
12	00-...	0	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	8	C:\Users\F...	Alloy, ...
13	00-...	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	7	C:\Users\F...	Inorga...

7. Pattern List Spesimen SQOB10

Accepted Ref. Pattern: 00-002-1231									
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]	Display Color	Database ID	Subfiles
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	40	-	Blue	C:\Users\F...	Alloy, ...
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	31	-	Lime	C:\Users\F...	Alloy, ...
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	34	-	Gray	C:\Users\F...	Alloy, ...
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	14	-	Mar...	C:\Users\F...	Alloy, ...

Selected Candidate: 00-039-0400											
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Scale Factor	Displacement [°2Th.]	ML	NML	TL	Database ID	Subfiles
1	<input checked="" type="checkbox"/>	01-087-0713	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
2	<input checked="" type="checkbox"/>	01-085-1326	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...
3	<input checked="" type="checkbox"/>	01-071-0397	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	1	0	31	C:\Users\F...	Alloy, ...
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-047-1393	Aluminum Copp...	Al _{4.2} Cu _{3.2} Zn...	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
5	<input checked="" type="checkbox"/>	00-041-1435	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
6	<input checked="" type="checkbox"/>	00-039-0400	Copper Zinc	Cu Zn ₂	1,000	0,000	1	0	14	C:\Users\F...	Alloy, ...
7	<input checked="" type="checkbox"/>	00-035-1152	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	8	C:\Users\F...	Alloy, ...
8	<input checked="" type="checkbox"/>	00-035-1151	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
9	<input checked="" type="checkbox"/>	00-028-0006	Aluminum Copper	Al Cu ₄	1,000	0,000	1	0	17	C:\Users\F...	Alloy, ...
10	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-0322	Copper Zinc	(Cu , Zn)	1,000	0,000	2	0	6	C:\Users\F...	Alloy, ...
11	<input checked="" type="checkbox"/>	00-019-0010	Aluminum Copper	Al _{3.892} Cu _{6.10} ...	1,000	0,000	4	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
12	<input checked="" type="checkbox"/>	00-004-0836	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...
13	<input checked="" type="checkbox"/>	00-004-0831	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...

8. Pattern List Spesimen SQOB20

Accepted Ref. Pattern: 00-002-1231									
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]	Display Color	Database ID	Subfiles
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	51	-	Blue	C:\Users\F...	Alloy, ...
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	32	-	Lime	C:\Users\F...	Alloy, ...
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	33	-	Gray	C:\Users\F...	Alloy, ...
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	14	-	Mar...	C:\Users\F...	Alloy, ...

Selected Candidate: 00-039-0400											
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Scale Factor	Displacement [°2Th.]	ML	NML	TL	Database ID	Subfiles
1	<input checked="" type="checkbox"/>	01-087-0713	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
2	<input checked="" type="checkbox"/>	01-085-1326	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...
3	<input checked="" type="checkbox"/>	01-071-0397	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	1	0	31	C:\Users\F...	Alloy, ...
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-047-1393	Aluminum Copp...	Al _{4.2} Cu _{3.2} Zn...	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
5	<input checked="" type="checkbox"/>	00-041-1435	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
6	<input checked="" type="checkbox"/>	00-039-0400	Copper Zinc	Cu Zn ₂	1,000	0,000	1	0	14	C:\Users\F...	Alloy, ...
7	<input checked="" type="checkbox"/>	00-035-1152	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	8	C:\Users\F...	Alloy, ...
8	<input checked="" type="checkbox"/>	00-035-1151	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
9	<input checked="" type="checkbox"/>	00-028-0006	Aluminum Copper	Al Cu ₄	1,000	0,000	1	0	17	C:\Users\F...	Alloy, ...
10	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-0322	Copper Zinc	(Cu , Zn)	1,000	0,000	2	0	6	C:\Users\F...	Alloy, ...
11	<input checked="" type="checkbox"/>	00-019-0010	Aluminum Copper	Al _{3.892} Cu _{6.10} ...	1,000	0,000	4	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
12	<input checked="" type="checkbox"/>	00-004-0836	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...
13	<input checked="" type="checkbox"/>	00-004-0831	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...

9. *Pattern List* Spesimen SQOB30

Pattern List										
Accepted Ref. Pattern: 00-002-1231										
No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]	Display Color	Database ID	Subfiles	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	00-002-1231	Copper Zinc	Cu Zn	39	-	Blue	C:\Users\F...	Alloy, ...	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	00-050-1333	Copper Zinc	Cu _{0.64} Zn _{0.36}	32	-	Lime	C:\Users\F...	Alloy, ...	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	00-025-1228	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	35	-	Gray	C:\Users\F...	Alloy, ...	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	00-024-0003	Aluminum Copper	Cu ₉ Al ₄	15	-	Mar...	C:\Users\F...	Alloy, ...	

Selected Candidate: 00-039-0400											
No.	Ref. Code	Score	Compound Name	Chemical Formula	Scale Factor	Displacement [² Th.]	ML	NML	TL	Database ID	Subfiles
2	00-001-1241	0	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Inorga...
3	00-002-1309	0	Aluminum Copper	Al ₂ Cu	1,000	0,000	1	0	18	C:\Users\F...	Inorga...
4	00-003-1015	0	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Inorga...
5	00-004-0831	0	Zinc	Zn	1,000	0,000	1	0	11	C:\Users\F...	Alloy, ...
6	00-004-0836	0	Copper	Cu	1,000	0,000	1	0	4	C:\Users\F...	Alloy, ...
7	00-019-0010	0	Aluminum Copper	Al _{3.892} Cu _{6.10...}	1,000	0,000	4	0	18	C:\Users\F...	Alloy, ...
8	00-025-0322	0	Copper Zinc	(Cu , Zn)	1,000	0,000	2	0	6	C:\Users\F...	Alloy, ...
9	00-026-0571	0	Copper Zinc	Cu Zn	1,000	0,000	2	0	12	C:\Users\F...	Alloy, ...
10	00-028-0006	0	Aluminum Copper	Al Cu ₄	1,000	0,000	1	0	17	C:\Users\F...	Alloy, ...
11	00-035-1151	0	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...
12	00-035-1152	0	Copper Zinc	Cu Zn ₅	1,000	0,000	2	0	8	C:\Users\F...	Alloy, ...
13	00-039-0400	0	Copper Zinc	Cu Zn ₂	1,000	0,000	2	0	14	C:\Users\F...	Alloy, ...
14	00-041-1435	0	Copper Zinc	Cu ₅ Zn ₈	1,000	0,000	2	0	9	C:\Users\F...	Alloy, ...

10. *PDF Card* α

Name and formula

Reference code: 00-050-1333
Compound name: Copper Zinc
Common name: a-brass
PDF index name: Copper Zinc
Empirical formula: $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$
Chemical formula: $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Fm-3m
Space group number: 225
a (Å): 3,6961
b (Å): 3,6961
c (Å): 3,6961
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000
Calculated density (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: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
Sample Preparation: Commercially available $\text{Cu}_{64}\text{-Zn}_{36}$ 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.

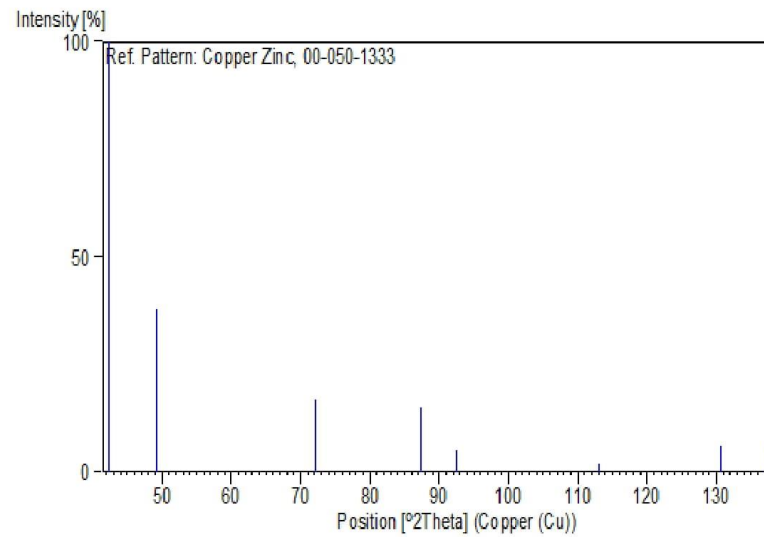
References

Primary reference: Voncken, J., Verkoost, 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 β

Name and formula

Reference code: 00-002-1231
Mineral name: Zhanghengite, syn
Compound name: Copper Zinc
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: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
D-values corrected for absorption. \$GB' phase, ordered (PI). Additional Patterns: See also 8-349
Color: Yellow
Analysis: Analysis (wt.%): Cu 51.0, Zn 49.0.

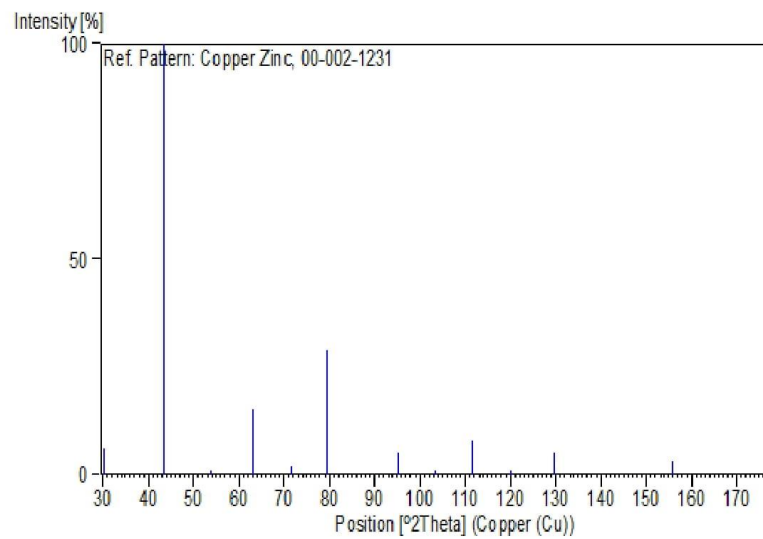
References

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

Peak list

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

Stick Pattern



12. PDF Card γ

Name and formula

Reference code: 00-025-1228
Compound name: Copper Zinc
PDF index name: Copper Zinc
Empirical formula: Cu_5Zn_8
Chemical formula: Cu_5Zn_8

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: I-43m
Space group number: 217
a (Å): 8,8600
b (Å): 8,8600
c (Å): 8,8600
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000
Calculated density (g/cm³): 8,03
Volume of cell (10⁶ pm³): 695,51
Z: 4,00

RIR: -

Subfiles and Quality

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

Comments

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

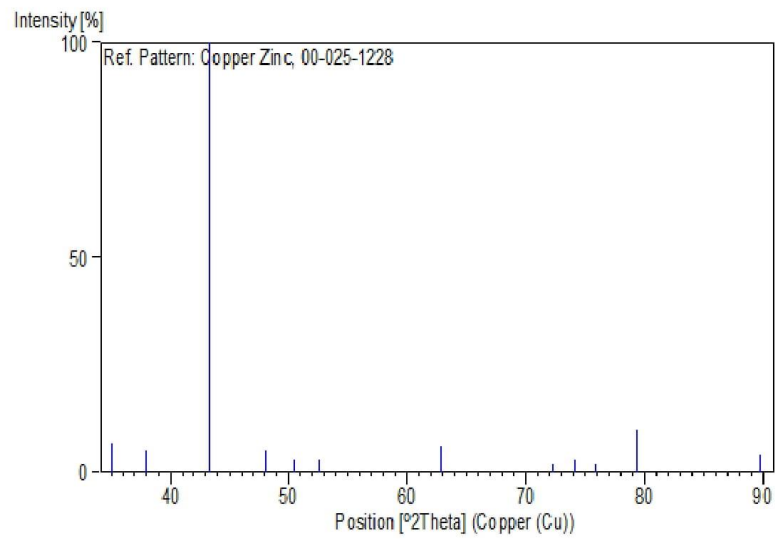
References

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

Peak list

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

Stick Pattern



13. PDF Card γ_2

Name and formula

Reference code: 00-024-0003
Compound name: Aluminum Copper
PDF index name: Aluminum Copper
Empirical formula: Al_4Cu_9
Chemical formula: Cu_9Al_4

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: P-43m
Space group number: 215
a (Å): 8,7027
b (Å): 8,7027
c (Å): 8,7027
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000
Calculated density (g/cm³): 6,85
Volume of cell (10⁶ pm³): 659,12
Z: 4,00

RIR: -

Subfiles and Quality

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

Comments

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

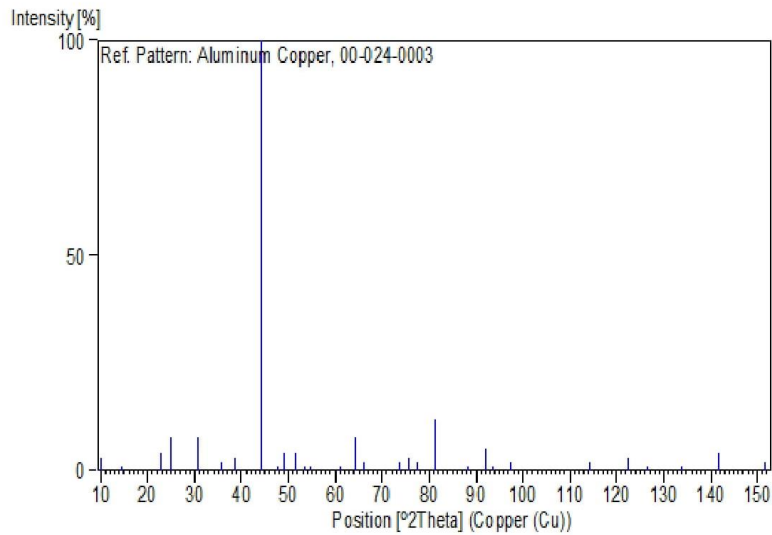
References

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

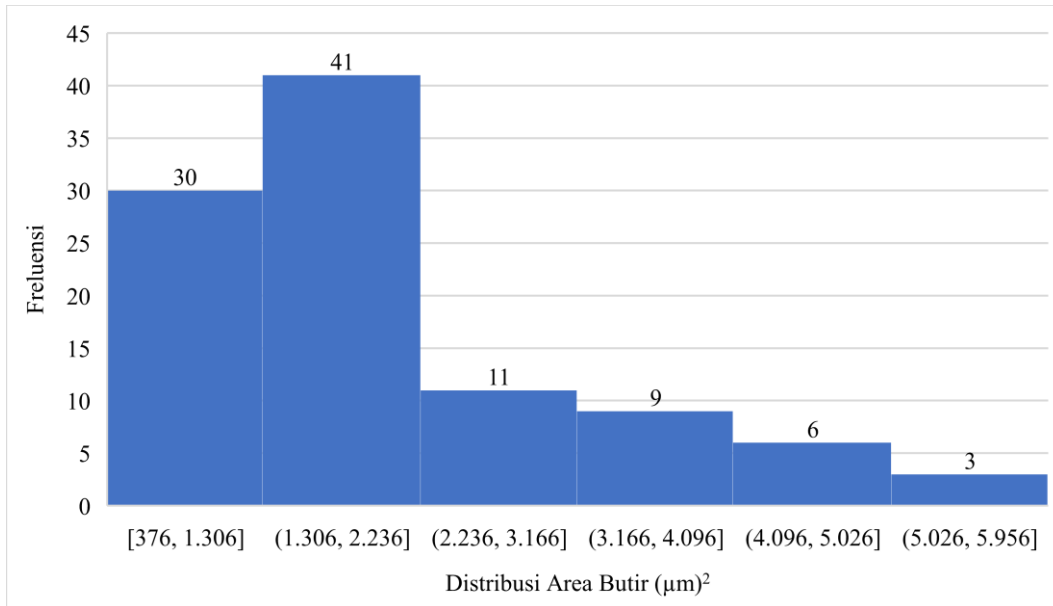
Peak list

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

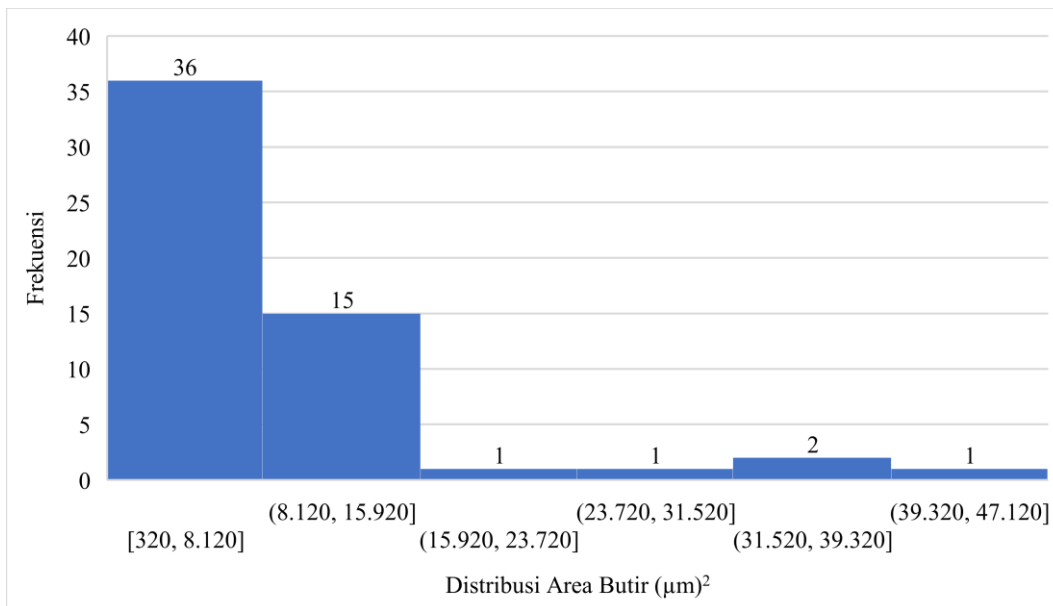
Stick Pattern



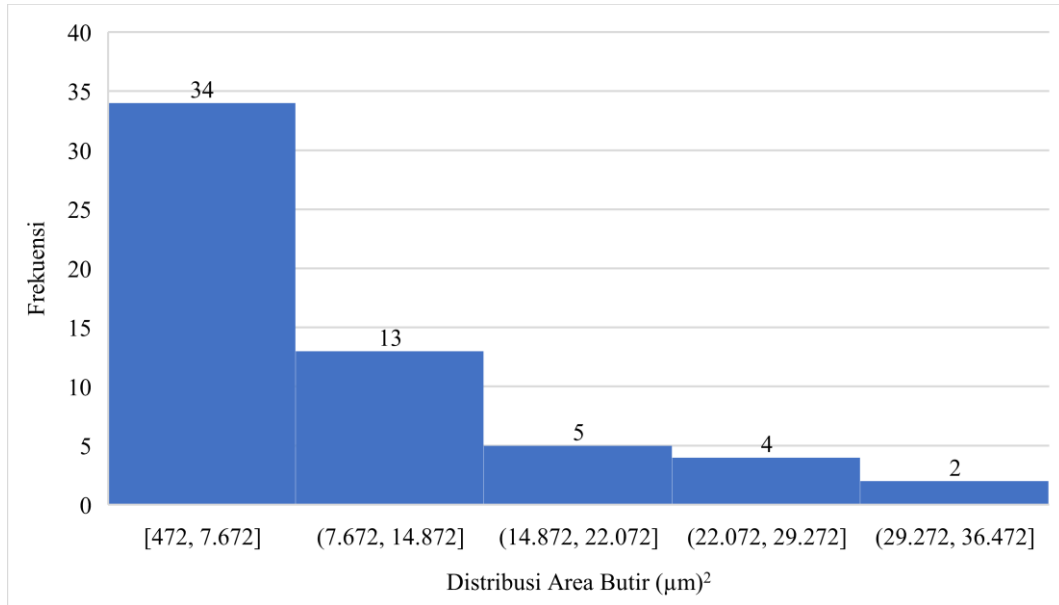
14. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen *As Cast*



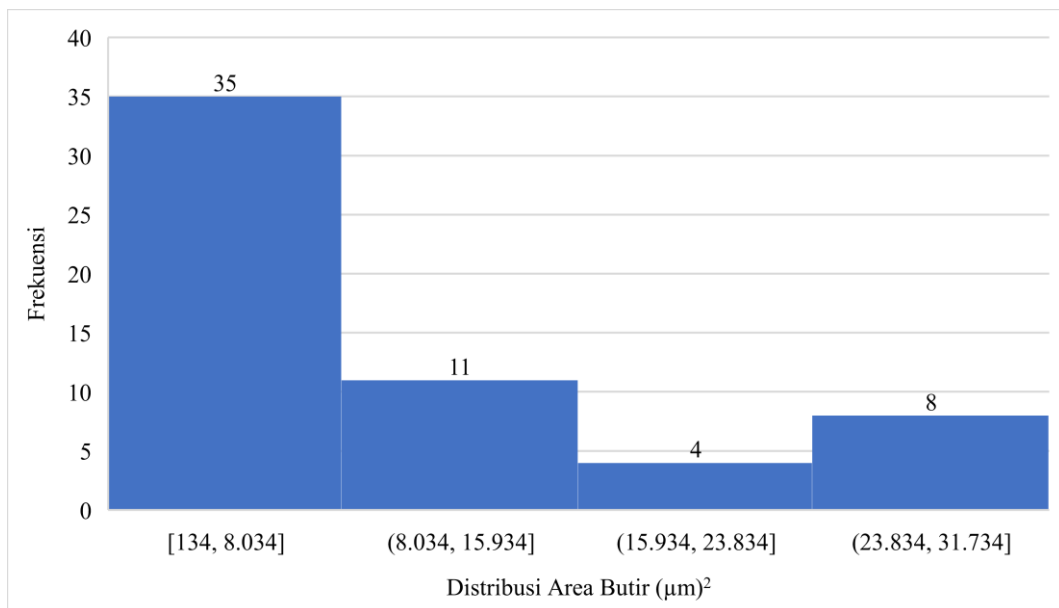
15. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen SQWB10



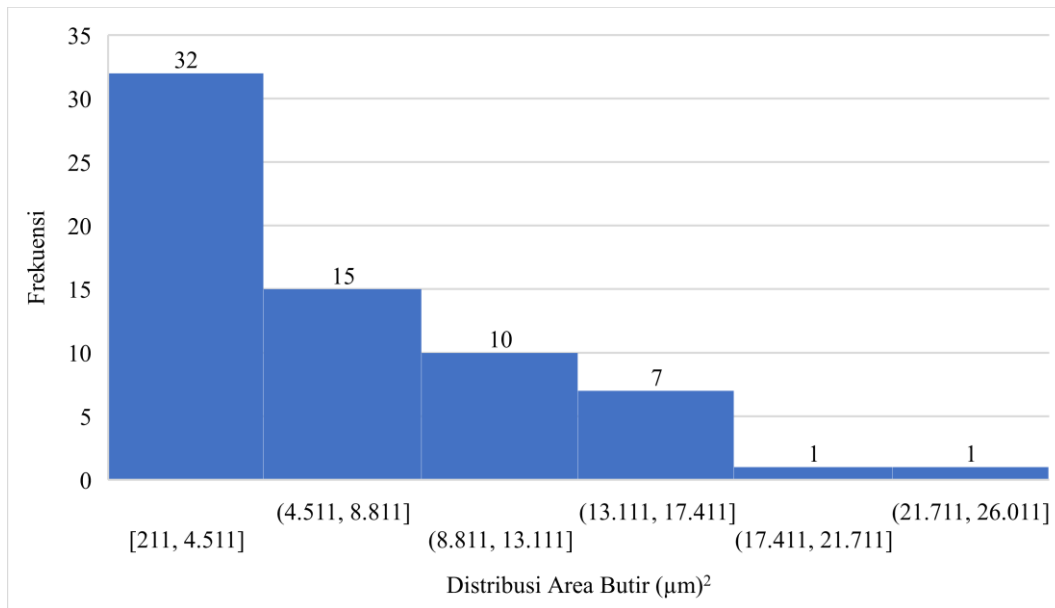
16. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen SQWB20



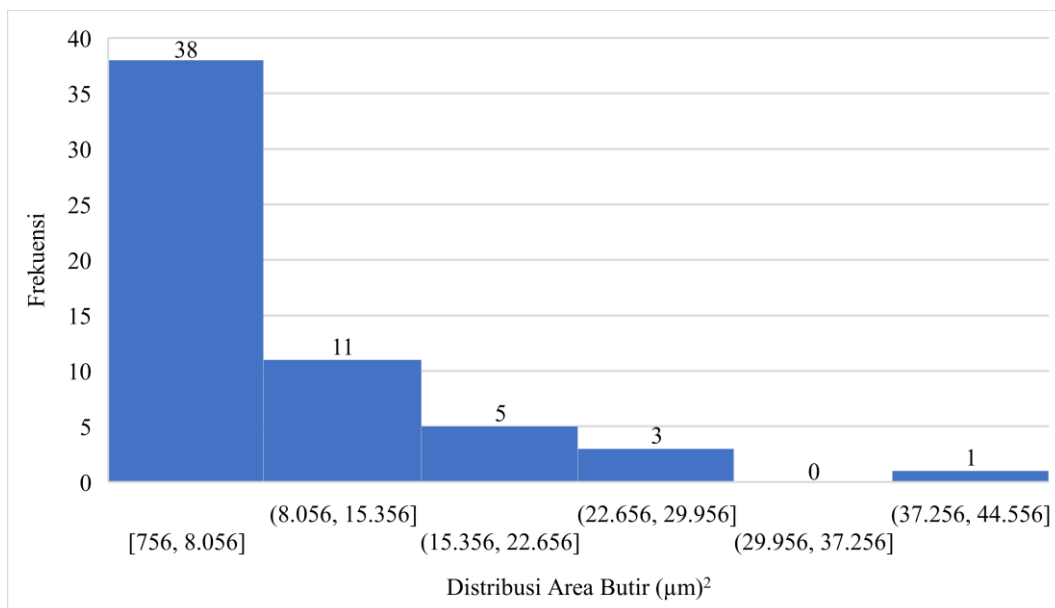
17. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen SQWB30



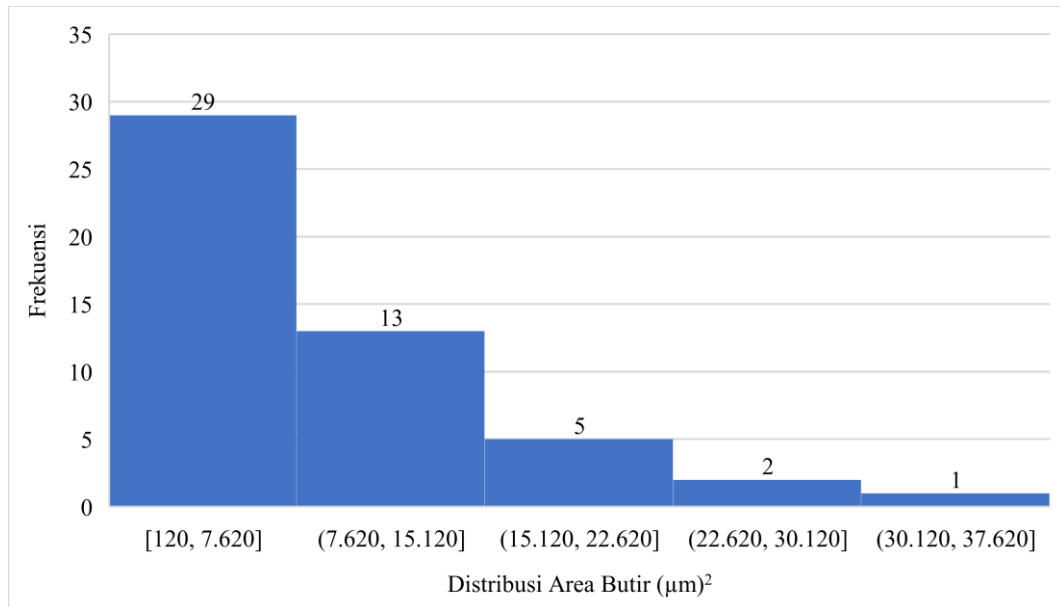
18. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen SQOB10



19. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen SQOB20



20. Hasil Perhitungan *Grain Size* Spesimen SQOB30



21. Hasil Pengujian Kekerasan

Nama Spesimen	Nilai Kekerasan (HV)			Rata-Rata	Standar Deviasi
	Indentasi 1	Indentasi 2	Indentasi 3		
<i>As cast</i>	293	290	289	290,67	1,70
SQWB10	248	245	245	246,00	1,41
SQWB20	241	242	245	242,67	1,70
SQWB30	241	239	237	239,00	1,63
SQOB10	266	266	264	265,33	0,94
SQOB20	253	251	252	252,00	0,82
SQOB30	242	244	244	243,33	0,94

22. Perhitungan *Martensite Start* (M_s)

- Perhitungan konversi wt.% ke at.% paduan Cu-15,9Zn-6,89Al

$$\text{Berat atom Cu} = 63,546$$

$$\text{Berat atom Zn} = 65,38$$

$$\text{Berat atom Al} = 26,981$$

$$\text{wt.\% Cu} = 77,31$$

$$\text{wt.\% Zn} = 15,8$$

$$\text{wt.\% Al} = 6,89$$

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

$$\text{at.\% Zn} = \frac{(15,8/65,38)}{(77,31/63,546) + (15,8/65,38) + (6,89/26,981)} \times 100$$

$$\text{at.\% Zn} = 14,10$$

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

$$\text{at.\% Al} = \frac{(6,89/26,981)}{(77,31/63,546) + (15,8/65,38) + (6,89/26,981)} \times 100$$

$$\text{at.\% Al} = 14,90$$

- Perhitungan Persamaan 4.1

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66.9(\text{at.\% Zn}) - 90.65(\text{at.\% Al})$$

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66.9(14,10) - 90.65(14,90)$$

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

- Perhitungan persamaan 4.2

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66.9[1.355(\text{at.\% Al}) + 1(\text{at.\% Zn})]$$

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66.9[1.355(14,90) + 1(14,10)]$$

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

23. Perhitungan Komposisi (wt.%) untuk Mendapatkan Temperatur *Martensite Start* (M_s) = 30°C

- Persamaan komposisi Zn (at.%) untuk mendapatkan temperatur transformasi $M_s = 30^\circ\text{C}$

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66.9(\text{at.}\% \text{ Zn}) - 90.65(\text{at.}\% \text{ Al})$$

$$30 = 2212 - 66.9(\text{at.}\% \text{ Zn}) - 90.65(\text{at.}\% \text{ Al})$$

$$-2182 = -66.9(\text{at.}\% \text{ Zn}) - 90.65(\text{at.}\% \text{ Al})$$

$$32,62 = (\text{at.}\% \text{ Zn}) + 1,36(\text{at.}\% \text{ Al})$$

$$\text{at.}\% \text{ Zn} = 32,62 - 1,36(\text{at.}\% \text{ Al})$$

- Perhitungan komposisi Zn (at.%) untuk mendapatkan temperatur transformasi $M_s = 30^\circ\text{C}$ apabila diasumsikan $\text{at.}\% \text{ Al} = \{x | x \in P, x \leq 100\}$

Cu (at.%)	Zn (at.%)	Al (at.%)
67,380	32,620	0,000
67,740	31,260	1,000
68,100	29,900	2,000
68,460	28,540	3,000
68,820	27,180	4,000
69,180	25,820	5,000
69,540	24,460	6,000
69,900	23,100	7,000
70,260	21,740	8,000
70,620	20,380	9,000
70,980	19,020	10,000
71,340	17,660	11,000
71,700	16,300	12,000
72,060	14,940	13,000
72,420	13,580	14,000
72,780	12,220	15,000
73,140	10,860	16,000
73,500	9,500	17,000
73,860	8,140	18,000
74,220	6,780	19,000
74,580	5,420	20,000
74,940	4,060	21,000
75,300	2,700	22,000
75,660	1,340	23,000

- Persamaan konversi at.% Zn ke wt.% Zn

Berat atom Cu = 63,546

Berat atom Zn = 65,38

Berat atom Al = 26,981

$$\text{wt. \% Zn} = \frac{(\text{at. \% Zn} \times \text{Berat atom Zn})}{(\text{at. \% Cu} \times \text{Berat atom Cu}) + (\text{at. \% Zn} \times \text{Berat atom Zn}) + (\text{at. \% Al} \times \text{Berat atom Al})} \times 100$$

$$\text{wt. \% Zn} = \frac{(\text{at}\% \text{ Zn} \times 65,38)}{(\text{at}\% \text{ Cu} \times 63,546) + (\text{at}\% \text{ Zn} \times 65,38) + (\text{at}\% \text{ Al} \times 26,981)} \times 100$$

- Persamaan konversi at.% Al ke wt.% Al

Berat atom Cu = 63,546

Berat atom Zn = 65,38

Berat atom Al = 26,981

$$\text{at. \% Al} = \frac{(\text{wt. \% Al} \times \text{Berat atom Al})}{(\text{wt. \% Cu} \times \text{Berat atom Cu}) + (\text{wt. \% Zn} \times \text{Berat atom Zn}) + (\text{wt. \% Al} \times \text{Berat atom Al})} \times 100$$

$$\text{at. \% Al} = \frac{(\text{wt}\% \text{ Al} \times 26,981)}{(\text{wt}\% \text{ Cu} \times 63,546) + (\text{wt}\% \text{ Zn} \times 65,38) + (\text{wt}\% \text{ Al} \times 26,981)} \times 100$$





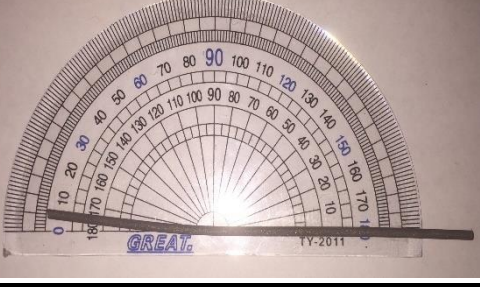
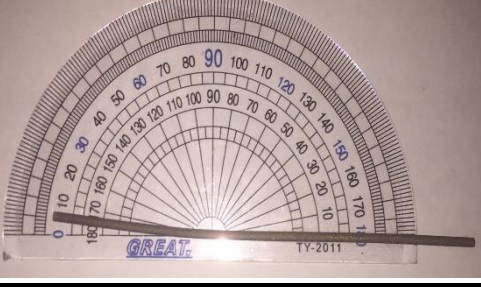
- Perhitungan konversi at.% ke wt.%

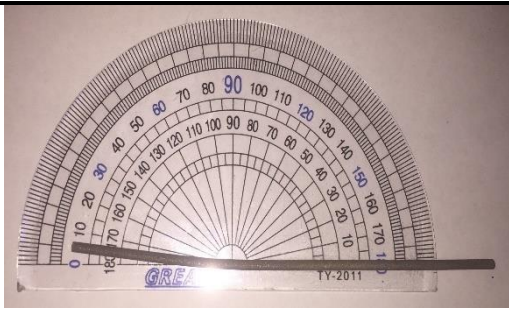
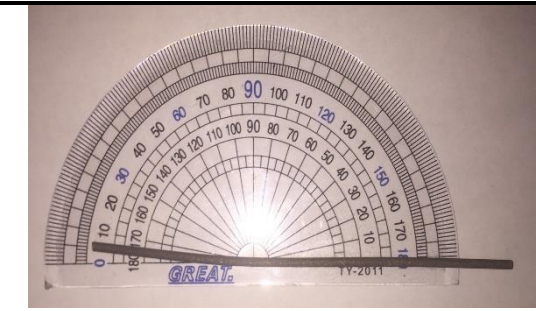
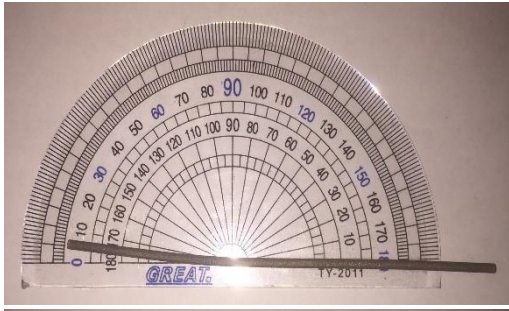
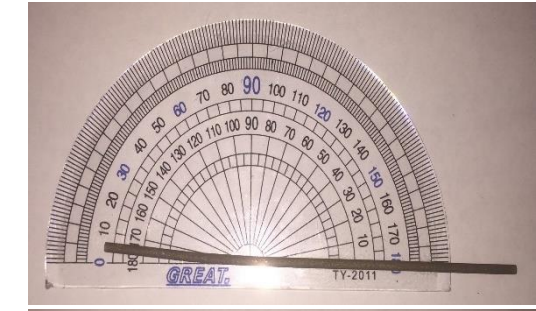
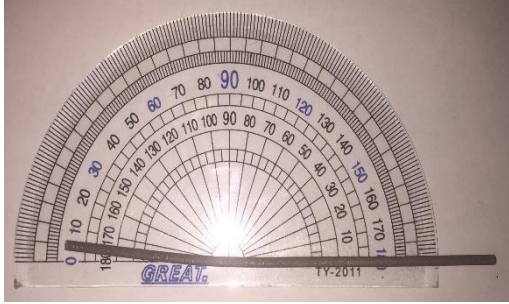

Cu (wt.%)	Zn (wt.%)	Al (wt.%)
66,752	33,248	0,000
67,519	32,057	0,423
68,297	30,852	0,852
69,084	29,631	1,285
69,880	28,395	1,725
70,687	27,144	2,169
71,504	25,877	2,619
72,331	24,593	3,076
73,169	23,294	3,537
74,018	21,977	4,005
74,877	20,643	4,479
75,748	19,292	4,959
76,631	17,924	5,445
77,525	16,537	5,938
78,431	15,132	6,438
79,349	13,707	6,944
80,279	12,264	7,457
81,222	10,801	7,976
82,178	9,318	8,503
83,148	7,815	9,038
84,130	6,291	9,579
85,127	4,745	10,128
86,137	3,178	10,685
87,162	1,588	11,250

- *Range* komposisi sesuai *ASM Handbook Volume 2* untuk mendapatkan *shape memory alloy* dengan temperatur transformasi $M_s = 30^\circ\text{C}$

Cu (wt.%)	Zn (wt.%)	Al (wt.%)
76,631	17,924	5,445
77,525	16,537	5,938
78,431	15,132	6,438
79,349	13,707	6,944

24. Hasil Pengujian *Shape Memory Effect* (SME)

Nama Spesimen	Gambar Sebelum Pengujian	Gambar Sesudah Pengujian
W1		
W2		
W3		

Nama Spesimen	Gambar Sebelum Pengujian	Gambar Sesudah Pengujian
O1		
O2		
O3		

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

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

1. Allah SWT. yang telah memberikan berkah, rahmat, dan pertolongan kepada penulis sehingga laporan penelitian Tugas Akhir ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya.
2. Papa, Mama, Teteh, dan Ale yang tidak pernah berhenti untuk mendoakan, mendukung, membantu, serta memberikan segala yang terbaik dalam kehidupan penulis.
3. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. selaku dosen pembimbing pertama atas kesabaran dan ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
4. Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua atas kesabaran dan ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
5. Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. selaku dosen wali atas bimbingan selama masa perkuliahan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS.
6. Seluruh dosen Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis sebagai bekal masa depan penulis.
7. Pak Asman, Pak Anto, Pak Chanan, dan seluruh Dosen Karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS yang telah membantu pengerjaan secara teknis dan non-teknis dalam proses penelitian.
8. Marzuki Akbar selaku *partner* Tugas Akhir yang telah memberikan *support* dan tempat bertukar pikiran selama pengerjaan Tugas Akhir.
9. Pasukan Fundichinco (Marzuki, Nafis, Rama, Denby, Ferdy, Ezra, dan Riza) yang telah berjuang bersama penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
10. Pasukan Konkor (Fernanda, Sabam, Farhan, Didik, dan Gading) yang telah menurunkan ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir.
11. Fantastic Four (Marzuki, Nafis, dan Gilang) yang telah menemani dan memberikan *support* kepada penulis dalam kehidupan perantauan.
12. Pink Dragon (Gilang, Nafis, Zuki, Salam, Byan, Azhim, Ara, Arjun, Adel, Bagus, Farid, Madan, Riza, dan Rama) sebagai teman bercerita dalam kehidupan perkuliahan penulis.
13. Balqis Nurlaili Ramadhanti sebagai teman berbagi cerita, pemberi semangat dan dukungan.
14. Anggota HMMT FTIRS – ITS yang telah memberikan pengalaman dan kenangan, terkhusus angkatan MT20 yang telah menjadi keluarga dari awal masa perkuliahan penulis hingga saat ini.
15. HMMT FTIRS – ITS 19/20 yang telah menjadi tempat berkembang dan mengabdikan bagi penulis selama masa perkuliahan, khususnya Departemen Sosial dan Masyarakat HMMT FTIRS – ITS.
16. LKKI Ashabul Kahfi 19/20 yang telah menjadi tempat berkembang dan berdakwah bagi penulis selama masa perkuliahan, khususnya Departemen Keilmuan.
17. 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 diberi keberkahan tidak henti-hentinya dari Allah SWT. Penulis berharap penelitian ini bermanfaat bagi pembaca dan semua pihak yang membutuhkan.

Surabaya 30 Juni 2022

Penulis

M. Farhan Ryamizard Z.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Muhammad Farhan Ryamizard Zain lahir di Bogor, 16 Januari 2000. Penulis merupakan anak kedua dari orang tua bernama Jaenuri dan Dedeh Sumiati. Penulis menempuh pendidikan pertama di SD Negeri Pengadilan 2 Kota Bogor. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 5 Kota Bogor, dan selanjutnya menempuh pendidikan di SMA Negeri 1 Kota Bogor. Penulis menempuh pendidikan sarjana di Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Penulis aktif dalam kegiatan organisasi kampus, yaitu sebagai Kepala Biro Pengabdian Masyarakat Departemen Sosial dan Masyarakat HMMT FTIRS – ITS pada tahun 2021. Penulis juga aktif dalam organisasi dakwah jurusan, yaitu sebagai Wakil Kepala Departemen Keilmuan LKKI Ashabul

Kahfi 2021. Selama masa kuliah, penulis aktif dalam kegiatan yang berhubungan dengan ilmu material dan metalurgi dengan menjadi Grader Perlakuan Panas Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS pada tahun 2021/2022. Penulis memiliki pengalaman profesional keprofesian melalui kegiatan Kerja Praktik di PT. Barata Indonesia (Persero) Divisi Sumber Daya Air pada Januari – Maret tahun 2021. Penulis dapat dihubungi melalui alamat *e-mail*: ryamizard.zain@gmail.com.