



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TL184834

**PENGARUH HOLDING TIME PROSES SOLUTION
TREATMENT DAN VARIASI MEDIA PENDINGIN PADA
Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOYS TERHADAP EFEK
SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO**

**LUCKYTA RIZKIVANY
NRP. 0251164000001**

**Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR – TL 184834

**PENGARUH HOLDING TIME PROSES SOLUTION
TREATMENT DAN VARIASI MEDIA PENDINGIN PADA
Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOYS TERHADAP EFEK
SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO**

LUCKYTA RIZKIVANY
NRP. 0251164000001

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

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 184834

**THE EFFECT OF HOLDING TIME SOLUTION
TREATMENT PROCESS AND QUENCHING MEDIA
VARIATION IN Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOYS ON
SHAPE MEMORY EFFECT AND MICROSTRUCTURE**

LUCKYTA RIZKIVANY
NRP. 0251164000001

Supervisors
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**PENGARUH HOLDING TIME PROSES SOLUTION
TREATMENT DAN VARIASI MEDIA PENDINGIN PADA
Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOYS TERHADAP EFEK
SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

LUCKYTA RIZKIVANY
NRP 0251164000001

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc (Pembimbing I)
2. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGARUH HOLDING TIME PROSES SOLUTION TREATMENT DAN VARIASI MEDIA PENDINGIN PADA Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOYS TERHADAP EFEK SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO

Nama : Luckyta Rizkivany
NRP : 0251164000001
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Pembimbing II : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstrak

Studi tentang smart materials cukup menyita perhatian dalam beberapa tahun terakhir, salah satunya yaitu tentang Shape Memory Alloys (SMA). Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mengembangkan SMA menggunakan paduan Ni-Ti, namun karena paduan tersebut memiliki beberapa kekurangan, maka muncullah untuk membuat alternatif paduan lain yaitu paduan Cu-Zn-Al. Untuk mendapatkan SMA dapat dilakukan dengan cara pengecoran. Pada penelitian ini paduan Cu-21Zn-5Al diberikan proses perlakuan panas homogenizing, annealing, dan solution treatment dengan holding time 10, 30, dan 60 menit dengan masing-masing holding time dilakukan quenching dengan media pendingin brine solution dan dry ice untuk mengetahui pengaruhnya terhadap efek shape memory dan struktur mikro. Selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan, XRD, metalografi, DSC, dan efek shape memory. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa efek shape memory dimiliki oleh semua spesimen, dimana recovery yang paling tinggi dimiliki oleh spesimen pada holding time 10 menit dengan media pendingin brine solution sebesar 36,67%. Selain itu pada semua spesimen terbentuk fasa α , β , γ , serta martensit akibat pendinginan cepat.

Kata Kunci: *Cu-Zn-Al, Efek Shape Memory, Perlakuan Panas, Shape memory alloys.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**THE EFFECT OF HOLDING TIME SOLUTION
TREATMENT PROCESS AND QUENCHING MEDIA
VARIATION IN Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOYS ON
SHAPE MEMORY EFFECT AND MICROSTRUCTURE**

Student Name : Luckyta Rizkivany
NRP : 0251164000001
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Co-Supervisor : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstract

The study of smart materials has received quite a bit of attention in recent years, one of them is about Shape Memory Alloys (SMA). Much research has been done to develop SMA using Ni-Ti alloys, but because these alloys have some drawbacks, it has emerged to make alternative alloys, namely Cu-Zn-Al alloys. To make SMA can be done by casting. In this study, Cu-21Zn-5Al alloys were given a several treatment such as homogenizing, annealing, and solution treatment process with holding time of 10, 30, and 60 minutes with each holding time were quenched with the cooling medium brine solution and dry ice to determine its effect on shape memory and micro structure effects. Then, several test is applied such as hardness test, XRD, metallography, DSC, and shape memory effect. From the results of tests that have been carried out, it is found that the shape memory effect is owned by all specimens with the highest recovery owned by the specimens at holding time of 10 minutes and cooling media brine solution with recovery 36.67%. In addition, α , β , γ phase appear in all spesimen and martensite are formed due to rapid cooling.

Keywords: *Cu-Zn-Al, Heat Treatment, Shape Memory Effect Shape Memory Alloys.*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul “**Pengaruh Holding Time Proses Solution Treatment dan Variasi Media Pendingin pada Cu-Zn-Al Shape memory alloys Terhadap Efek Shape Memory Dan Struktur Mikro**” untuk memenuhi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

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

1. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc, selaku dosen pembimbing pertama yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
2. 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.
3. Bapak Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T., selaku dosen yang senantiasa memberikan ilmu yang sangat berguna kepada penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir.
4. Bapak Ir. Moh. Farid, DEA, selaku dosen wali penulis.

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

Surabaya, 10 Januari 2020
Penulis

Luckyta Rizkivany

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Shape Memory Alloys</i>	5
2.1.1 Transformasi Fasa pada <i>Shape Memory Alloys</i>	5
2.1.2 <i>Shape Memory Effect</i>	9
2.2 Paduan Cu-Zn-Al.....	12
2.3 Diagram Fasa	15
2.3.1 Diagram Fasa Terner Cu-Zn-Al	16
2.4 Perlakuan Panas	19
2.4.1 <i>Homogenizing</i>	20
2.4.2 <i>Annealing</i>	20
2.4.3 <i>Solution Treatment</i>	21
2.5 Media Pendingin.....	22
2.5.1 <i>Brine Solution</i> (Larutan Garam).....	22
2.5.2 <i>Dry Ice</i>	22
2.6 Resilien	23
2.7 Struktur Mikro	24
2.8 Metode Pengujian	25
2.8.1 Pengujian Metelografi	25

2.8.2	Pengujian Kekerasan	28
2.8.3	Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC)	31
2.8.4	Pengujian Efek <i>Shape Memory</i>	33
2.9	Penelitian Sebelumnya	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir	37
3.2	Bahan Penelitian	39
3.3	Alat Penelitian	40
3.4	Variabel Penelitian	45
3.5	Prosedur Penelitian	45
3.5.1	Prosedur Proses <i>Homogenizing</i>	45
3.5.2	Prosedur Proses <i>Annealing</i>	46
3.5.3	Prosedur Proses <i>Solution Treatment</i>	46
3.6	Proses Pengujian	46
3.6.1	Pengujian Metalografi	47
3.6.2	Pengujian Kekerasan Vickers	47
3.6.3	Pengujian <i>Differential Scanning Calorimeter</i> (DSC)	47
3.6.4	Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)	48
3.6.5	Pengujian Efek <i>Shape Memory</i>	48
3.7	Rancangan Penelitian	48
3.8	Jadwal Penelitian	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Hasil Pengecoran dan Proses <i>Machining Cu-21Zn-5Al Shape Memory Alloys</i>	51
4.2	Hasil Pengujian Kekerasan <i>Cu-21Zn-5Al Shape Memory Alloys</i>	52
4.3	Hasil Pengujian XRD <i>Cu-21Zn-5Al Shape Memory Alloys</i>	56
4.4	Hasil Pengujian Metalografi <i>Cu-21Zn-5Al Shape Memory Alloys</i>	59
4.5	Hasil Pengujian DSC <i>Cu-21Zn-5Al Shape Memory Alloys</i>	69

4.6 Hasil Pengujian Efek <i>Shape Memory</i> Cu-21Zn-5Al <i>Shape Memory Alloys</i>	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	81
UCAPAN TERIMA KASIH	95
BIODATA PENULIS	97

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema pengaruh temperatur terhadap perubahan fasa <i>shape memory alloys</i> tanpa pembebanan mekanik	7
Gambar 2.2	Skema <i>shape memory effect</i> dari SMA yang menunjukkan perubahan proses <i>detwinning</i> dengan adanya pembebanan	8
Gambar 2.3	Skema <i>shape memory effect</i> dari SMA menunjukkan pelepasan beban dan selanjutnya pemanasan kembali menjadi austenit di bawah kondisi tanpa beban	9
Gambar 2.4	Kurva tegangan-regangan-temperatur yang menunjukkan <i>shape memory effect</i> dari <i>shape memory alloys</i>	10
Gambar 2.5	Diagram fasa terner	16
Gambar 2.6	Diagram fasa terner Cu-Zn-Al.....	17
Gambar 2.7	Diagram fasa terner Cu-Zn-Al pada temperatur 550°C	18
Gambar 2.8	Diagram fasa terner Cu-Zn-Al pada temperatur 700°C	19
Gambar 2.9	Skema tegangan-regangan yang menunjukkan bagaimana modulus resilien ditentukan	23
Gambar 2.10	Struktur mikro Cu-26,04Zn%-4,01Al%	25
Gambar 2.11	Alur cahaya pada pengamatan mikroskopis	27
Gambar 2.12	Tipe-tipe lekukan piramid intan: (a) lekukan yang sempurna; (b) lekukan bantal jarum; (c) lekukan berbetuk tong	29
Gambar 2.13	Prinsip kerja XRD	30
Gambar 2.14	Skematik dari instrumen <i>power compensation</i> DSC	32
Gambar 2.15	Struktur mikro spesimen hasil <i>quench</i>	34

Gambar 2.16	Hasil uji DSC Cu-25%Zn-4%Al; (a) <i>heating run 1</i> ; (b) <i>heating run 2</i> ; (c) <i>heating run 3</i>	36
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	38
Gambar 3.2	Spesimen ingot Cu-21Zn-5Al	40
Gambar 3.3	<i>Electrical furnace</i>	41
Gambar 3.4	Mesin <i>grinding</i> dan <i>polishing</i>	42
Gambar 3.5	Mikroskop optik.....	43
Gambar 3.6	Alat uji kekerasan	43
Gambar 3.7	Alat uji XRD	44
Gambar 3.8	Diagram perlakuan panas.....	45
Gambar 4.1	Spesimen Cu-21Zn-5Al <i>Shape Memory Alloys</i> : (a) Hasil coran, (b) Hasil <i>machinin</i>	51
Gambar 4.2	Grafik nilai kekerasan Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i>	54
Gambar 4.3	Hasil pengujian XRD Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i> dengan media pendingin <i>brine</i>	57
Gambar 4.4	Hasil pengujian XRD Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i> dengan media pendingin <i>dry ice</i>	57
Gambar 4.5	Hasil pengujian metalografi spesimen <i>as cast</i> Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i> perbesaran 100x	60
Gambar 4.6	Hasil pengujian metalografi spesimen <i>homogenizing</i> Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i> perbesaran 100x.....	61
Gambar 4.7	Hasil pengujian metalografi spesimen <i>machining</i> Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i> perbesaran 100x.....	62
Gambar 4.8	Hasil pengujian metalografi spesimen <i>annealing</i> Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i> perbesaran 100x.....	63
Gambar 4.9	Hasil pengujian metalografi spesimen <i>brine</i> Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i> dengan	

	<i>holding time</i> (a) 10 menit (b) 30 menit, dan (c) 60 menit.....	67
Gambar 4.10	Hasil pengujian metalografi spesimen <i>brine</i> Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i> dengan <i>holding time</i> (a) 10 menit (b) 30 menit, dan (c) 60 menit.....	68
Gambar 4.11	Grafik Hasil Pengujian DSC Cu-21Zn-5Al <i>Shape Memory Alloys</i>	70
Gambar 4.12	Spesimen uji efek <i>shape memory</i> berbagai variabel (a) Sebelum diuji (b) Setelah diuji	72
Gambar 4.13	Spesimen B10 (a) Sebelum diuji (b) Setelah diuji.....	73

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Data masing-masing unsur paduan.....	13
Tabel 2.2	Sifat Cu-Zn-Al <i>shape memory alloys</i>	15
Tabel 2.3	Modulus resilien berbagai material	24
Tabel 2.4	Komposisi paduan dalam % massa	34
Tabel 2.5	Temperatur austenit <i>start</i> dan <i>finish</i> hasil uji DSC	35
Tabel 3.1	Rancangan penelitian.....	48
Tabel 3.2	Jadwal penelitian	50
Tabel 4.1	Komposisi standar dan hasil uji komposisi spesimen Cu-Zn-Al <i>shape memory alloys</i>	52
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Kekerasan Cu-21Zn-5Al <i>Shape memory alloys</i>	53
Tabel 4.3	Hasil analisis perbandingan jumlah fasa Cu- 21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i> menggunakan aplikasi fiji.....	59
Tabel 4.4	Temperatur transformasi Cu-21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i>	71
Tabel 4.5	Hasil pengujian efek <i>shape memory</i> pada Cu- 21Zn-5Al <i>shape memory alloys</i>	73

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Studi tentang *smart materials* ini cukup menyita perhatian dalam beberapa tahun terakhir. Penerapan *smart materials* dapat dilihat seperti salah satu contohnya, yaitu sensor dan aktuator. Salah satu contoh material yang memiliki kemampuan untuk digunakan sebagai sensor atau aktuator bahkan keduanya adalah *Shape memory alloys*. *Shape memory alloys* atau yang biasa disingkat dengan (SMA's) memiliki sifat yang unik dan menarik perhatian yaitu *Shape Memory Effect* dan *superelasticity*. Saat ini penelitian sudah banyak dilakukan untuk mengembangkan *shape memory alloys*. Salah satu material paduan yang banyak digunakan secara komersial yaitu paduan Ni-Ti. Paduan Ni-Ti adalah paduan yang memiliki kombinasi sifat material terbaik dalam pengaplikasiannya. Namun memiliki beberapa kekurangan seperti temperatur transformasinya yang kecil, pemrosesan yang sulit dan juga harganya yang sangat mahal seratus kali lipat dibandingkan dengan *Shape memory alloys Cu-based*. (Bagherpour, 2017). Oleh karena itu muncul untuk membuat alternatif lain seperti paduan Cu-Zn-Al yang memiliki beberapa sifat seperti ulet, dapat di *cold-working*, dan jarak transformasi temperaturnya lebih tinggi dibandingkan dengan Ni-Ti. Paduan Cu-Zn-Al memiliki *shape memory effect* pada komposisi tertentu yaitu 60%-80% Cu ; 15%-30% Zn ; dan 3%-10% Al dalam berbagai perbandingan.

Menurut ASM International, 1990. *Shape Memory Alloys* (SMA) adalah material yang memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk dan ukuran semula setelah dideformasi dan diberikan perlakuan temperatur tertentu. Aplikasi dari *Shape memory alloys* sendiri cukup beragam dalam berbagai bidang industri, misalnya saja seperti aeronautika, automotif, biomedik maupun sistem mekanik. Proses pembuatan *shape memory alloys* dapat dilakukan melalui dua cara yaitu proses pembentukan dan proses pelatihan. *Shape memory alloys* memiliki struktur kristal austenit dan

martensit. Proses pembebanan dilakukan pada saat fasanya *twinned* martensit, kemudian karena adanya pembebanan maka akan terjadi perubahan dimensi tetapi fasanya masih martensit yaitu *detwinned* martensit. Ketika pembebanan dilepaskan, fasanya masih tetap *detwinned* martensit. Proses *Shape Memory Effect* terjadi ketika *detwinned* martensit dipanaskan hingga temperatur austenit, maka fasanya akan berubah ke bentuk semula (Kumar, 2008).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Lai (1996), perlakuan panas dapat mempengaruhi sifat dari *shape memory alloys Cu-based*. Dimana spesimen dengan komposisi Cu-17.5at%Zn5at%Al yang digunakan diberikan empat perlakuan panas berbeda dengan dilakukan *step-quenching*, *ice-water quenching*, *water quenching*, dan *glycol quenching* pada tiga temperatur berbeda yaitu 800, 850, dan 900°C. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan bahwa *shape memory effect* dipengaruhi oleh beberapa parameter perlakuan panas seperti temperatur *betatizing*, durasi *betatizing*, dan kecepatan pendinginan.

Karena minimnya penelitian yang meneliti terkait Cu-Zn-Al *shape memory alloys* dan masih banyaknya peluang untuk mengembangkan penelitian dibidang terkait sehingga mendapatkan sifat material Cu-Zn-Al *shape memory alloys* yang optimal, maka dari itu penelitian ini akan membahas tentang pengaruh *holding time* proses *solution treatment* dan media pendingin pada Cu-Zn-Al *shape memory alloys* terhadap efek *shape memory* dan struktur mikro.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *holding time* proses *solution treatment* dan variasi media pendingin terhadap efek *shape memory* pada paduan Cu-Zn-Al?

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

1.3 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesimen bahan yang digunakan dianggap homogen dan bebas cacat.
2. Waktu pengeluaran spesimen dari *furnace* saat perlakuan panas dianggap sama.
3. Pengaruh lingkungan saat perlakuan panas diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh *holding time* proses *solution treatment* dan variasi media pendingin terhadap efek *shape memory* pada paduan Cu-Zn-Al.
2. Menganalisis pengaruh *holding time* proses *solution treatment* dan variasi media pendingin terhadap struktur mikro pada paduan Cu-Zn-Al.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh *holding time* proses *solution treatment* dan variasi media pendingin terhadap efek *shape memory* dan struktur mikro pada Cu-Zn-Al *Shape memory alloys*. Serta dengan adanya penelitian ini diharapkan menambah *database* terkait perlakuan panas pada paduan Cu-Zn-Al *shape memory* terhadap sifat material dan struktur mikronya. Selanjutnya juga dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu teknologi khususnya di bidang Teknik Material dan Metalurgi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Shape Memory Alloys*

Shape memory alloys atau yang biasa disingkat sebagai SMA adalah merupakan kelompok material logam yang memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk dan ukuran sebelumnya setelah diberikan prosedur termal. Umumnya, material ini dapat dideformasi plastis pada beberapa temperatur yang relatif rendah dan apabila paparan temperatur yang lebih tinggi diberikan secara terus-menerus maka material ini akan kembali ke bentuk semula sebelum dideformasi. Material yang menunjukkan *shape memory* hanya pada saat pemanasan disebut *one-way shape memory*. Sedangkan material yang dapat menunjukkan *shape memory* pada saat pemanasan maupun pendinginan maka disebut *two-way shape memory* (ASM International, 1990).

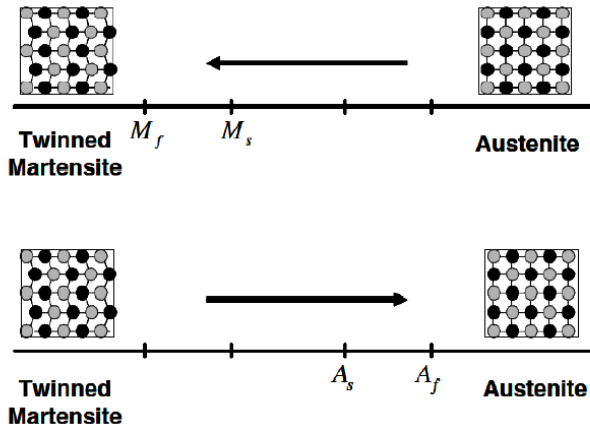
Beberapa paduan yang termasuk dalam *Shape memory alloys* diantaranya adalah nickel-titanium (NiTi), Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, dan lain-lain. Paduan yang paling umum dalam sifatnya yang memiliki *shape memory effect* adalah paduan nickel-titanium (NiTi) dan paduan berbasis tembaga atau *Cu-based*. Sifat kedua paduan ini sungguhlah berbeda. Pada paduan NiTi memiliki *shape memory strain* yang lebih besar hingga mencapai 8% dibandingkan dengan paduan berbasis tembaga yang hanya 4-5%, lebih stabil secara termal, memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, dan keuletan yang baik. Di sisi lain, paduan berbasis tembaga jauh lebih murah dan memiliki temperatur aktuasi yang lebih tinggi daripada NiTi berkisar antara -200°C hingga +200°C. Paduan berbasis tembaga juga memiliki keunggulan karena terbuat dari bahan yang relatif murah (Aghinotri, 2016).

2.1.1 Transformasi Fasa pada *Shape Memory Alloys*

Berdasarkan jarak temperatur operasi, *Shape memory alloys* memiliki dua fasa yang setiap fasanya memiliki struktur kristal dan sifat yang berbeda. Pertama adalah fasa austenit yang terbentuk pada temperatur yang tinggi, dan yang kedua adalah fasa martensit

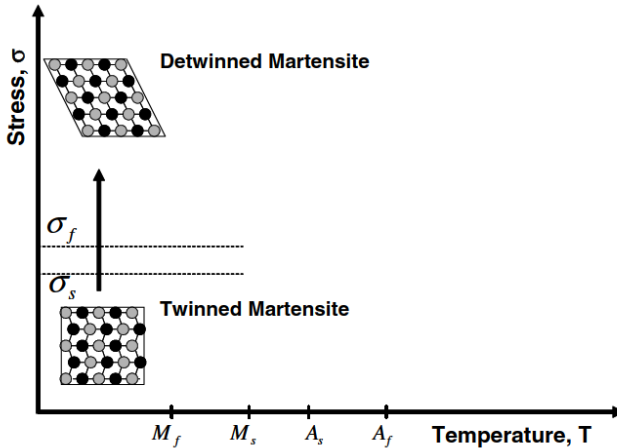
yang terbentuk pada temperatur yang rendah. Fasa austenit (umumnya kubik) memiliki struktur kristal yang berbeda dengan fasa martensit yang umumnya tetragonal, orthorhombic, atau monoklinik. Transformasi dari satu struktur menjadi struktur yang lain tidak terjadi secara difusi atom, melainkan terjadi oleh distorsi pergeseran kisi. Transformasi ini dikenal dengan sebutan transformasi martensit. Setiap kristal martensitik memiliki arah orientasi yang berbeda yang biasa disebut dengan *variant*. *Variant* martensitik ini terdiri dari dua: *twinned* martensit (M^t), yang terbentuk oleh kombinasi dari “*self-accommodate*” *variant* martensitik, dan *detwinned* atau *reoriented* martensit yang merupakan *variant* martensit yang dominan (M^d). Kembalinya transformasi fasa dari austenit (induk fasa) ke martensit (produk fasa) dan sebaliknya, adalah hal yang paling dasar dan sifat unik dari *shape memory alloys*.

Dengan pendinginan tanpa diberikan pembebanan, struktur kristal akan berubah dari austenit menjadi martensit. Perubahan fasa dari austenit menjadi martensit dimengerti sebagai *forward transformation*. Ketika material dipanaskan dari fasa martensitik, struktur kristalnya akan kembali menjadi austenit dan perubahan ini disebut dengan *reverse transformation*, dalam hal ini tidak ada perubahan bentuk yang terjadi. Skema perubahan struktur kristal dari *twinned* martensit dan austenit *shape memory alloys* dapat dilihat berdasarkan Gambar 2.1.



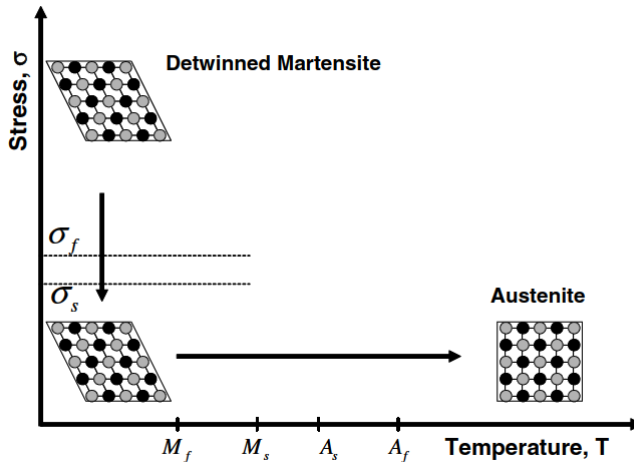
Gambar 2.1 Skema pengaruh temperatur terhadap perubahan fasa *shape memory alloys* tanpa pembebanan mekanik (Kumar, 2008)

Terdapat empat karakteristik temperatur yang berhubungan dengan perubahan fasa *shape memory alloys*. Pada saat *forward transformation*, austenit, dibawah pembebanan nol, dimulai perubahan menjadi *twinned* martensit pada temperatur awal martensit atau martensit *start* (M_s) dan perubahan selesai ketika fasa berubah menjadi martensit pada temperatur akhir martensit atau martensit *finish* (M_f). Pada keadaan ini, transformasi selesai dan fasa material telah berubah sepenuhnya menjadi fasa *twinned* martensit. Hal yang sama, ketika pemanasan, *reverse transformation* dimulai pada saat temperatur awal austenit atau *austenitic start temperature* (A_s) dan perubahan selesai pada saat temperatur akhir austenit atau *austenitic finish temperature* (A_f).



Gambar 2.2 Skema *shape memory effect* dari SMA yang menunjukkan perubahan proses *detwinning* dengan adanya pembebanan (Kumar, 2008)

Ketika pembebanan mekanik diberikan pada material pada saat fasanya *twinned* martensit (temperatur rendah), hal ini mungkin akan berubah menjadi *detwinned* martensit dengan adanya beberapa varian yang terorientasi seperti pada Gambar 2.2. Proses perubahan menjadi *detwinned* martensit menghasilkan perubahan bentuk secara makroskopis, dimana bentuknya akan dipertahankan walaupun pembebanan dilepaskan. Selanjutnya pemanasan dari SMA di atas temperatur A_f akan menghasilkan transformasi fasa kembali dari *detwinned* martensit menjadi austenit dan akan kembali ke bentuk sesungguhnya.



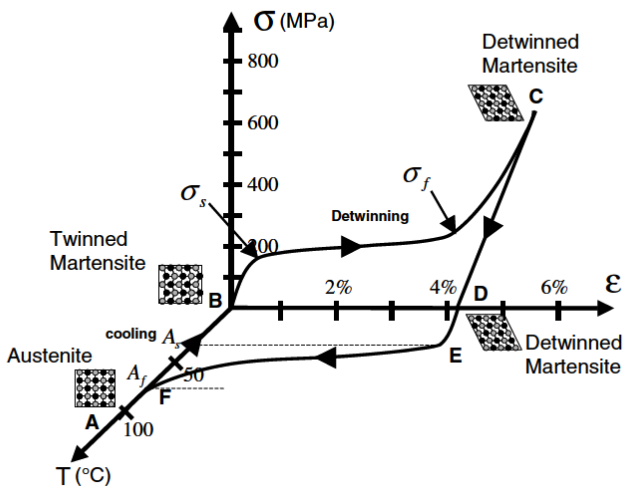
Gambar 2.3 Skema *shape memory effect* dari SMA menunjukkan pelepasan beban dan selanjutnya pemanasan kembali menjadi austenit di bawah kondisi tanpa beban (Kumar, 2008)

Pendinginan kembali ke temperatur di bawah M_f (*forward transformation*) akan menghasilkan *twinned* martensit lagi tanpa adanya perubahan bentuk. Proses yang dijelaskan di atas dikenal sebagai *Shape Memory Effect* (SME). Beban yang diberikan haruslah cukup besar untuk memulai proses *detwinning*. Tegangan minimal yang dibutuhkan untuk menginisiasi proses *detwinning* adalah tegangan awal *detwinning* atau *detwinning start stress* (σ_s). Kemudian tingkat pembebanan yang besar akan mengakibatkan *detwinning* dari martensit berhasil dimana tingkat tegangan yang sesuai disebut dengan *detwinning finishing stress* (σ_f) (Kumar, 2008).

2.1.2 Shape Memory Effect

Suatu *Shape Memory Alloy* memiliki *Shape Memory Effect* (SME) ketika dideformasi dalam fasa *twinned* martensit dan ketika beban dilepaskan pada saat temperatur di bawah A_s . Selanjutnya

ketika dipanaskan di atas A_f , *shape memory alloy* akan kembali ke bentuk aslinya dengan berubah menjadi fasa induknya yaitu fasa austenitik. Secara alamiah *Shape Memory Effect* dapat lebih mudah dipahami dengan pembebanan termomekanikal yang dikombinasi dengan tegangan-regangan-temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Gambar 2.4, menunjukkan data eksperimen dari spesimen NiTi yang diuji di bawah pembebanan uniaksial. Tegangan σ merupakan tegangan uniaksial pada spesimen akibat beban yang diterapkan. Sedangkan, regangan ϵ adalah perubahan panjang dari spesimen sepanjang arah dari beban yang diterapkan sesuai panjang aslinya.



Gambar 2.4 Kurva tegangan-regangan-temperatur yang menunjukkan *shape memory effect* dari *shape memory alloys* (Kumar, 2008)

Dimulai dari fasa induk (poin A pada Gambar 2.4) pendinginan austenit tanpa tegangan di bawah temperatur transformasi (M_s dan M_f) menghasilkan pembentukan *twinned*

martensit (poin B). Ketika *twinned* martensit diberikan tegangan yang melebihi tegangan awal σ_s , proses reorientasi dimulai, dan menghasilkan pertumbuhan dari varian martensit yang searah. Derajat tegangan untuk reorientasi varian jauh lebih rendah dibandingkan dengan tegangan luluh plastis dari martensit. Proses detwinning dikatakan berhasil pada tingkat tegangan σ_f yang dicirikan dengan adanya *plateau* σ - ε diagram yang terdapat pada Gambar 2.4. Kemudian material tersebut bebannya dilepaskan secara elastis dari poin C ke poin D dan tetap dalam keadaan *detwinned* martensit. Saat pemanasan tanpa adanya tegangan, *reverse transformation* mulai ketika temperatur mencapai A_s , pada poin E dan selesai pada temperatur A_f (poin F), dimana hanya terdapat fasa induk austenitik. Tidak adanya regangan plastis permanen pada saat *detwinning*, bentuk asli dari *Shape memory alloys* akan kembali ke bentuk asli (diindikasikan poin A).

Regangan yang kembali akibat transformasi fasa dari *detwinned* martensit menjadi austenit dinamakan regangan transformasi (ε^t). Selanjutnya pendinginan menuju fasa martensit akan menyebabkan pembentukan kembali fasa *twinned* martensit, sehingga seluruh siklus dari *Shape Memory Effect* bisa terus berulang. Penjelasan fenomenan diatas dapat disebut dengan *one-way shape memory effect*, karena kembalinya bentuk awal akan terjadi hanya ketika pemanasan setelah material menjadi fasa *detwinned* dengan diberikan pembebanan mekanik. (Kumar, 2008) *One-way shape memory effect* terjadi ketika *Shape memory alloys* berada dalam kondisi dingin (di bawah A_s), logam dapat ditekuk atau diregangkan (diberikan deformasi) dan akan tetap menahan bentuk tersebut hingga pemanasan di atas temperatur transformasi. Ketika dipanaskan, bentuknya akan berubah kembali ke bentuk aslinya. Namun, ketika logam didinginkan kembali, bentuknya akan tetap pada bentuk ketika dipanaskan sampai logam dideformasi kembali (Gouda, 2014).

2.2 Paduan Cu-Zn-Al

Paduan Cu-Zn-Al adalah paduan yang terdiri dari unsur tembaga (Cu), seng (Zn) dan aluminium (Al) dimana tembaga (Cu) adalah salah satu logam pertama yang digunakan oleh manusia dan tembaga tersedia di alam sebagai unsur bebas. Tembaga murni memiliki warna kemerah-merahan muda yang khas, tetapi sifat yang paling menonjol adalah resistivitas listriknya yang rendah, salah satu yang terendah dari semua elemen. Karena sifat ini dan jumlahnya yang relatif melimpah di alam, tembaga murni komersial banyak digunakan sebagai konduktor listrik, namun harus diperhatikan bahwa konduktivitas tembaga akan berkurang secara signifikan apabila terdapat unsur paduan yang ditambahkan. (Groover, 2010).

Selanjutnya, seng (Zn) merupakan logam kedua setelah tembaga (Cu) yang diproduksi secara besar sebagai logam *non-ferrous*, dan biasanya digunakan sebagai elemen paduan dan pelapis. Memiliki tegangan *yield* yang rendah dengan nilai sekitar 20 MPa dan keuletan sekitar 12%, mengakibatkan seng murni hanya digunakan dalam aplikasi spesifik karena keterbatasan kekuatan pengangkutannya yang rendah. (Bednarczyk, 2018). Ciri khas dari seng adalah memiliki warna putih kebiruan, berkilau, dan bersifat diamagnetic (Lehto, 1968).

Aluminium (Al) merupakan logam ringan yang memiliki ketahanan korosi yang serta hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Dengan adanya unsur tambahan sebagai pepadunya seperti tembaga (Cu), magnesium (Mg), silikon (Si), mangan (Mn), seng (Zn), nikel (Ni), dan lain-lain secara satu persatu atau bersama-sama akan dapat meningkatkan kekuatan mekaniknya dan juga dapat memberikan sifat-sifat baik lainnya seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian yang rendah dan sebagainya. Karena memiliki sifat-sifat yang handal maka aluminium banyak dipergunakan dalam berbagai bidang. (Surdia, 1999). Untuk mengetahui sifat dari setiap unsur paduan dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Data masing-masing unsur paduan (Groover,2010)

Unsur	Tembaga	Seng	Aluminium
Simbol	Cu	Zn	Al
Nomor Atom	29	30	13
Spesifik Gravitasi	8.96	7.13	2.7
Struktur Kristal	FCC	HCP	FCC
Temperatur Leleh (°C)	1083	419	660
Modulus Elastisitas (Mpa)	110,000	90,000	69,000
Ekstraksi Bijih	Kalkopirit (CuFeS ₂)	Sphalerite (ZnS)	Bauksit
Elemen Paduan	Tembaga, seng, aluminium, silicon, nikel, beryllium	Aluminium, magnesium, tembaga	Tembaga, magnesium, mangan, silicon, seng
Aplikasi	Konduktor listrik dan komponen, pipa ledeng, aplikasi komponen laut, <i>heat exchanger</i>	Besi dan baja galvanis, <i>die casting</i> , elemen paduan pada kuningan	Kontainer, konduktor elektrik, bagian konstruksi, otomotif, dan aplikasi yang lain yang membutuhkan sifat yang ringan

Cu-Zn-Al *shape memory alloys* mengandung 15-30% seng dan 3-7% aluminium dan sisanya adalah tembaga. Penambahan unsur lain seperti boron, cerium, cobalt, iron, titanium, vanadium, dan zirconium dalam jumlah yang relatif kecil (biasanya kurang dari 1%) ditujukan untuk untuk mengontrol ukuran butir. Penambahan unsur ini juga diperuntukkan untuk mengontrol pertumbuhan ukuran butir supaya tidak terlalu besar yang dimana jika ukuran butir terlalu besar maka akan menyebabkan kegetasan pada material. Namun, penambahan unsur lain tersebut haruslah dengan sangat hati-hati dikarenakan dapat mempengaruhi stabilitas struktur dan karakteristik *shape memory* tersebut (Aghinotri, 2016).

Peleburan *shape memory alloys* dengan basis tembaga (Cu) hampir mirip dengan perunggu aluminium. Kebanyakan paduan komersial dilelehkan dengan cara induksi. Pada proses pelelehan, penggunaan fluks atau gas inert selama penuangan sangatlah diperlukan untuk mencegah terjadinya penguapan seng (Zn) dan oksidasi aluminium (Al). Paduan dengan basis tembaga (Cu) dapat dengan mudah di *hot worked* di udara. Dengan komposisi aluminium yang rendah (<6wt%), paduan Cu-Zn-Al dapat di *cold worked* dengan *annealing*. Karena *Shape memory alloys* dengan basis tembaga bersifat metastabil di alam, maka perlakuan panas di daerah fasa- β induk dan pendinginan terkontrol sangatlah diperlukan untuk mempertahankan fasa- β supaya memiliki *Shape Memory Effect*. Namun perlakuan panas yang berkepanjangan menyebabkan penguapan seng dan pertumbuhan butir sehingga harus dihindari. Paduan Cu-Zn-Al, ketika di-*quench* dengan cepat akan langsung menjadi fasa martensit, sehingga rentan terhadap efek stabilisasi martensit. Efek ini menyebabkan transformasi terbalik bergeser ke temperatur yang lebih tinggi sehingga menyebabkan terhambatnya pemulihan bentuk. Beberapa sifat dari *shape memory alloys* dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Sifat Cu-Zn-Al *shape memory alloys* (ASM Metal Handbook Vol. 2, 1992)

Sifat	Nilai Sifat
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 ($\text{J}/\text{kg}.\text{^{\circ}\text{C}}$)	400
<i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa)	600
Temperatur Transformasi ($^{\circ}\text{C}$)	<120
<i>Recoverable Strain</i> (%)	4
Hysteresis ($\Delta^{\circ}\text{C}$)	15 - 25

2.3 Diagram Fasa

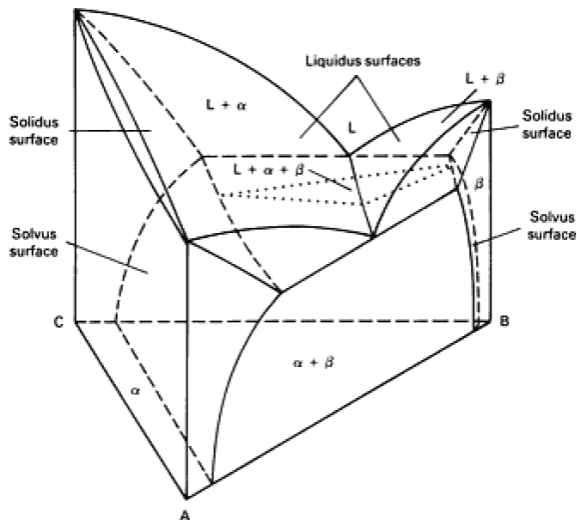
Beberapa logam memang lebih penting ketika berupa sebagai elemen murni misalnya seperti emas, perak, tembaga. Namun sebagian besar aplikasi teknik memerlukan sifat yang lebih baik yang dapat diperoleh dengan paduan. Melalui paduan, dimungkinkan untuk dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, dan sifat-sifat lainnya dibandingkan dengan logam murni. Sifat-sifat dan karakteristik tersebut sangatlah berkaitan erat dengan fasa dan struktur mikro, karena dengan adanya perubahan fasa dan struktur mikro maka akan berubah pula sifat-sifat mekaniknya. Untuk itu diperlukanlah sebuah pemahaman terhadap fenomena yang terjadi tersebut sehingga dapat mengetahui gambaran tentang hubungan antara fasa, struktur mikro, komposisi, serta temperature pada kondisi ekuilibrium. Hal tersebut merupakan hal-hal yang telah ada dalam suatu diagram fasa.

Diagram fasa merupakan sarana grafis yang sering digunakan untuk mewakili sistem paduan yang di dalamnya terdapat informasi berupa fasa sistem paduan pada fungsi komposisi dan temperatur dalam keadaan ekuilibrium. (Groover, 2010). Penggunaan diagram fasa dalam sistem paduan sangatlah penting, dikarenakan terdapat korelasi yang kuat antara struktur mikro, sifat mekanik, serta pengembangan struktur mikro paduan

yang terkait dengan karakteristik dari diagram fasanya. Serta diagram fasa juga memberikan informasi penting seperti titik lebur, pengecoran, kristalisasi, dan fenome lainnya (Callister, 2013).

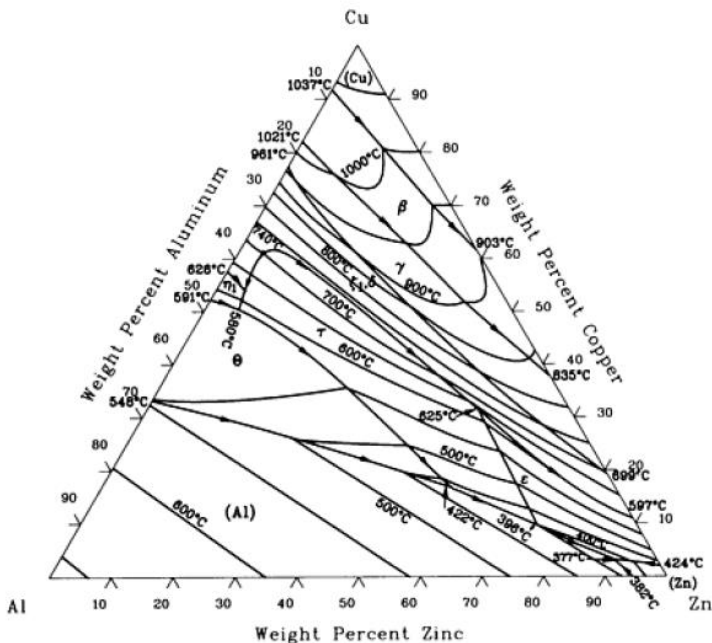
2.3.1 Diagram Fasa Terner Cu-Zn-Al

Selain diagram fasa *unary* dan *binary* terdapat juga diagram fasa terner. Proses pembacaan digram fasa terner juga lebih sulit. Ketika komponen ketiga ditambahkan ke dalam sistem biner, penggambaran kondisi kesetimbangan dalam dua dimensi menjadi lebih rumit. Berdasarkan gambar yang tertera batas bidang fasa tunggal (liquidus, solidus, dan garis solvus dalam diagram biner) menjadi permukaan. Area satu dan dua fasa menjadi volume, komposisi cairan eutektik biner yang merupakan titik dalam diagram biner menjadi garis dalam diagram terner.



Gambar 2.5 Diagram fasa terner (ASM *Metal Handbook* Vol. 3, 1992)

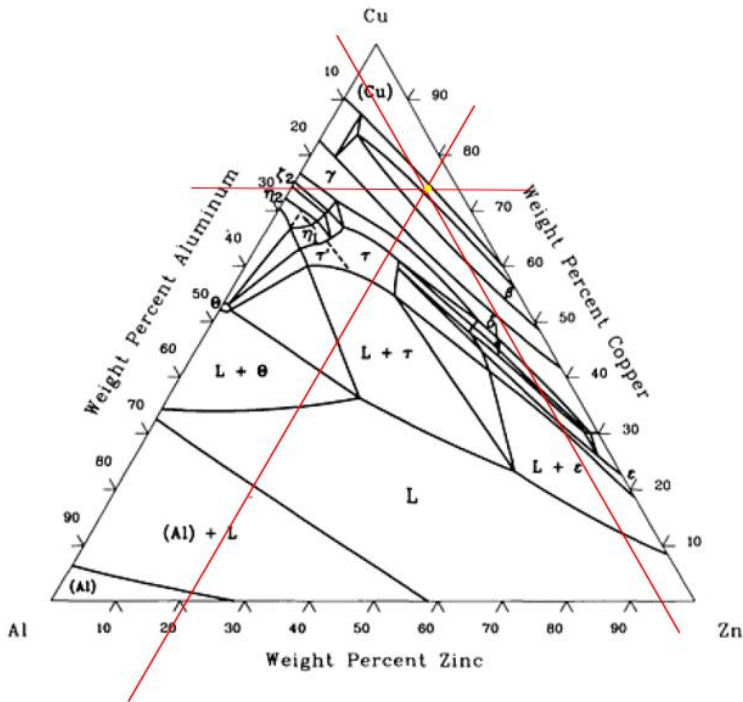
Meskipun proyeksi tiga dimensi dapat membantu dalam memahami hubungan dalam diagram, membaca nilai-nilai tersebut masih terasa sulit. Oleh karena itu, sistem ternary sering diwakili oleh pandangan dari diagram biner yang terdiri dari wajah dan proyeksi dua dimensi dari permukaan liquidus dan solidus, bersama dengan serangkaian dua dimensi bagian horisontal (isoterm) dan bagian vertikal (isopleth) melalui diagram padat (ASM *Metal Handbook* Vol. 3, 1992).



Gambar 2.6 Diagram fasa terner Cu-Zn-Al (ASM *Metal Handbook* Vol. 3, 1992)

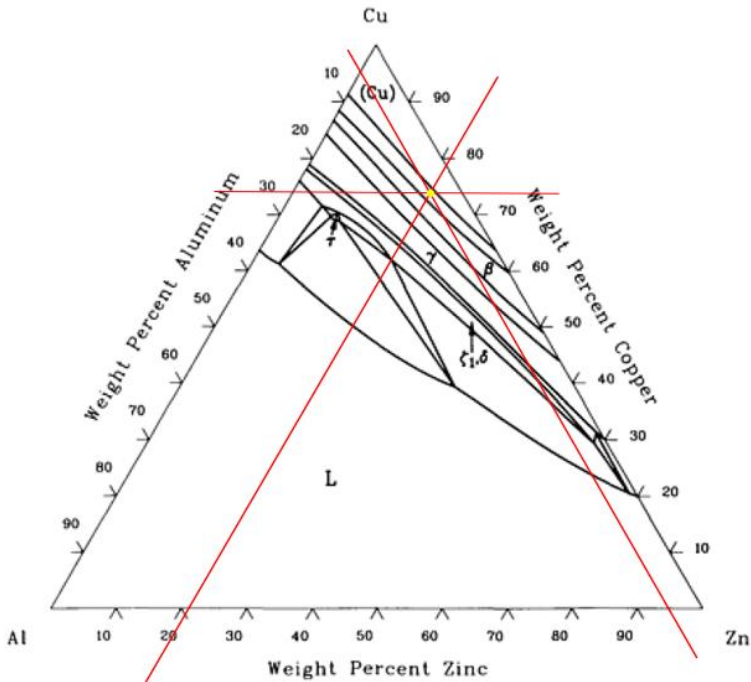
Gambar 2.6 menunjukkan proyeksi diagram fasa terner Cu-Zn-Al. Sisi kanan segitiga merupakan persentase berat tembaga (Cu), kemudian sisi kiri segitiga merupakan persentase berat aluminium (Al), dan sisi bawah segitiga merupakan persentase

berat seng (Zn). Untuk menentukan sebuah fasa paduan, maka dapat dilakukan *plotting* komposisi pada tiap-tiap unsur paduan. Plotting dilakukan dengan membuat garis sejajar dengan persentase komposisi ketiga unsur, kemudia akan dihasilkan perpotongan dari ketiga garis tersebut. Di titik itulah yang menunjukkan fasa dari paduan tersebut.



Gambar 2.7 Diagram fasa terner Cu-Zn-Al pada temperatur 550°C (ASM *Metal Handbook* Vol. 3, 1992)

Pada Gambar 2.7 di atas merupakan diagram fasa terner Cu-Zn-Al pada temperatur 550°C, dimana pada komposisi sekitar 74% Cu, 21%Zn dan 5%Al berdasarkan garis merah yang berpotongan dapat diketahui bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa α dan β .



Gambar 2.8 Diagram fasa terner Cu-Zn-Al pada temperatur 700°C (ASM *Metal Handbook* Vol. 3, 1992)

Pada Gambar 2.8 di atas merupakan diagram fasa terner Cu-Zn-Al pada temperatur 550°C, dimana pada komposisi sekitar 74% Cu, 21% Zn dan 5% Al berdasarkan garis merah yang berpotongan dapat diketahui bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa α dan β .

2.4 Perlakuan Panas

Perlakuan panas adalah proses pemanasan dan pendinginan logam atau paduan dalam keadaan padat dengan tujuan mengubah sifat logam tersebut. Perlakuan panas dapat juga dikatakan sebagai proses pemanasan dan pendinginan logam besi terutama berbagai jenis baja di mana beberapa sifat khusus seperti keuletan,

kekerasan, kekuatan tarik, ketangguhan dan lain-lain, diinduksi dalam logam ini untuk mencapai tujuan dan fungsi khusus. Perlakuan panas terdiri dari tiga fase utama yaitu: (i) Pemanasan logam; (ii) perendaman logam; dan (iii) pendinginan logam. Teori perlakuan panas didasarkan pada fakta bahwa perubahan terjadi pada struktur internal logam dengan pemanasan dan pendinginan yang menginduksi sifat yang diinginkan di dalamnya. Dalam proses perlakuan panas, tingkat pendinginan adalah faktor pengendali utama. Mendinginkan logam dengan cepat dari atas kisaran kritis, menghasilkan struktur yang keras. Sedangkan pendinginan yang sangat lambat menghasilkan dampak sebaliknya, yaitu struktur yang lunak (Singh, 2006).

2.4.1 Homogenizing

Homogenizing merupakan suatu proses pemanasan pada temperatur tinggi yang bertujuan untuk menghilangkan efek segregasi kimia dan memperbaiki sifat mampu pengerjaan panas yang umum dilakukan pada ingot hasil pengecoran. (Mukti, 2018). *Homogenizing* biasanya banyak dilakukan pada paduan yang memiliki rentang titik beku yang luas, contohnya seperti tembaga, nikel, perunggu serta pada paduan yang mengalami pendinginan yang tidak ekuilibrium, seperti pada kuningan. Waktu dan temperatur *homogenizing* tiap paduan bervariasi. Struktur mikro yang dihasilkan dari proses *homogenizing* bersifat kasar, maka dari itu untuk memperhalus struktur mikronya, perlu dilakukan proses *annealing*. Temperatur yang digunakan untuk *homogenizing* pada umumnya berkisar antara 700°C-1000°C. Temperatur homogenisasi biasanya sekitar 50°C di atas garis solvus (ASM *Metals Handbook* Vol. 4, 1992).

2.4.2 Annealing

Menurut Singh (2006), *annealing* adalah istilah yang umum digunakan untuk pelunakan logam. *Annealing* biasanya dilakukan dengan memanaskan benda kerja ke temperatur tertentu yang sesuai, lalu menahannya pada temperatur tersebut untuk waktu

yang ditentukan dan kemudian mendinginkannya pada kecepatan tertentu. Temperatur spesifik, waktu penahanan, laju pendinginan, dan detail proses lainnya tergantung pada logam yang digunakan dan tujuan operasi anil. *Annealing* berfungsi untuk mengurangi kekuatan luluh dan kekerasan bahan benda kerja, menghilangkan atau mengurangi tekanan internal, mengurangi segregasi, mengembalikan keuletan, memperbaiki ukuran butir dan memodifikasi sifat listrik dan magnetik. Operasi pembentukan dan pengerjaan selanjutnya dapat dilakukan dengan lebih mudah. Untuk baja, pemanasan ke titik di atas temperatur austenitisasi, temperatur di mana struktur material mulai berubah, dan menahan pada temperatur tersebut hingga transformasi selesai. Benda kerja kemudian secara perlahan didinginkan hingga temperatur ruangan. Ketika istilah, "anil" diterapkan tanpa kata sifat yang memenuhi syarat untuk logam besi, biasanya hal ini mengacu pada *full annealing*.

2.4.3 Solution Treatment

Solution treatment merupakan proses yang sering dilakukan. Perlakuan ini biasanya sering dilakukan pada material logam *non-ferrous*. Langkah yang dilakukan adalah dengan memanaskan bahan benda kerja, yang temperaturnya tepat di bawah temperatur leleh eutektik. Pada temperatur ini, konstituen paduan menjadi terdispersi secara merata dalam larutan padat. Langkah selanjutnya yaitu pendinginan, mempertahankan larutan dalam keadaan padat super jenuh karena konstituen paduan tidak punya waktu untuk mengendap. *Solution treatment* umumnya dilakukan pada aluminium, tembaga, nikel, magnesium, titanium, zirkonium, dan paduannya, serta pada paduan tahan panas. (Singh, 2006). Pada tahap *solution treatment*, terjadi pelarutan fasa-fasa yang ada menjadi larutan padat. Tujuan dari *solution heat treatment* itu sendiri yaitu untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogen (Mukti, 2018).

2.5 Media Pendingin

Salah satu parameter yang penting dalam proses austempering adalah laju pendinginan. Laju pendinginan dapat disimulasikan dengan penggunaan media pendingin. Banyak sekali media pendingin yang digunakan dalam proses perlakuan panas. Avner (1974) menyatakan bahwa ada sejumlah media pendingin yang biasa digunakan dalam proses pengerasan yaitu air, larutan garam atau soda dalam air, minyak, campuran air dan minyak, udara, dan garam cair atau *salt bath*.

2.5.1 Brine Solution (Larutan Garam)

Air sebagai media pendingin dapat dimodifikasi, salah satunya yaitu dengan menambahkan garam dengan kadar tertentu, misalnya 5% - 10%. Penambahan garam dengan kadar tertentu tersebut bertujuan untuk mempertinggi kapasitas pendinginan, karena larutan air garam dapat mencegah timbulnya gelembung uap air (*vapour blanket stage*), dimana akan mengakibatkan flek-flek lunak pada permukaan benda kerja. Selain itu garam juga memiliki sifat mendinginkan yang teratur dan cepat. Dan perlu diingat bahwa air garam mempunyai efek yang tidak baik yaitu mempercepat terjadinya korosi, maka setelah proses *quenching* sebaiknya specimen segera dibersihkan (Lakthin Y, 1999).

2.5.2 Dry Ice

Menurut Aryawan (2016), *dry ice* atau es kering adalah karbon dioksida berbentuk padat dengan rumus kimia: CO₂, yang terdiri dari dua atom oksigen terikat pada atom karbon tunggal. *Dry ice* ini tidak berwarna, tidak berbau, tidak mudah terbakar, dan sedikit asam. Pada temperatur di atas -56,4°C (-69,5°F) dan tekanan di bawah 5,2 bar, perubahan CO₂ dari padat ke gas disebut sublimasi. Proses yang berlawanan disebut deposisi, di mana perubahan CO₂ dari gas ke fase padat (es kering). Pada tekanan atmosfer, sublimasi / deposisi terjadi pada -78,5°C (-109,3°F). Temperatur yang rendah dan sublimasi langsung ke gas membuat es kering merupakan pendingin yang efektif. Pendinginan secara

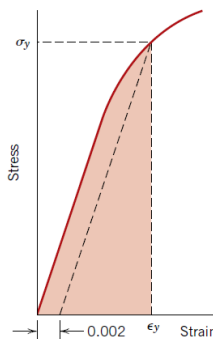
cepat dengan media pendingin ekstrem seperti *dry ice* tujuannya adalah untuk mendapatkan struktur martensit. Karena martensit terbentuk dari fase austenit yang didinginkan secara cepat. Hal ini disebabkan karena atom karbon tidak sempat berdifusi keluar dan terjebak dalam struktur kristal dan membentuk struktur tetragonal yang ruang kosong antar atomnya kecil, sehingga kekerasannya meningkat.

2.6 Resilien

Menurut Callister (2013), resilien adalah kemampuan material untuk menyerap energi ketika dideformasi elastis dan mengembalikannya saat beban dilepaskan. Resilien dihitung dengan modulus resilien, yaitu energi regangan per unit volume yang digunakan untuk menegangkankan material dari tegangan nol ke *yield stress* σ_0 . Nilai energi regangan per unit volume dapat dicari dengan Persamaan 2.1 di bawah ini:

$$Ur = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{1}{2} \sigma_y \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) = \frac{\sigma_y^2}{E} \quad (2.1)$$

Dimana menunjukkan banyaknya kerja per volume untuk mencapai batas elastis / *yield*, satuannya kg.mm/mm^3 atau lb.in/in^3



Gambar 2.9 Skema tegangan-regangan yang menunjukkan bagaimana modulus resilien ditentukan (Callister, 2013).

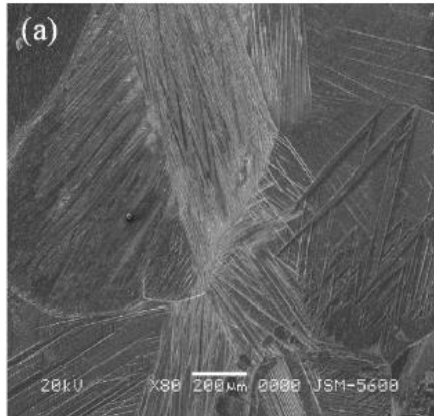
Modulus resilien dapat ditunjukkan oleh daerah yang diarsir di bawah kurva sesuai dengan Gambar 2.9 berdasarkan kurva tegangan-regangan suatu material. Tabel 2.3 menunjukkan nilai modulus resilien untuk beberapa material.

Tabel 2.3 Modulus resilien berbagai material (Callister, 2013)

Material	E (psi)	S ₀ (psi)	Modulus Resilien
Baja karbon medium	30 x 10 ⁶	45,000	33.7
Baja pegas karbon tinggi	30 x 10 ⁶	140,000	320
Duraluminium	10.5 x 10 ⁶	18,000	17
Tembaga	16 x 10 ⁶	4,000	5.3
Karet	150	300	300
Akrilik polimer	0.5 x 10 ⁶	2,000	4.0

2.7 Struktur Mikro

Dalam paduan logam, struktur mikro ditandai oleh jumlah fase yang ada, proporsinya, dan distribusinya. Struktur mikro paduan tergantung pada variabel-variabel seperti elemen paduan yang ada, konsentrasinya, dan perlakuan panas yang diterima dari paduan tersebut seperti temperatur, waktu pemanasan, dan laju pendinginan hingga suhu kamar (Callister, 2013). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Aldirmaz (2013), struktur mikro pada sampel yang *diquench* langsung ke dalam larutan *brine* dingin menunjukkan struktur mikro yang sepenuhnya martensit. Martensit tampak seperti morfologi khas martensit tipe 01. Pelat martensit juga terlihat dengan bentuk-V pada beberapa butir, dan juga terdapat martensit yang berbentuk seperti jarum. Jenis martensit seperti jarum dalam paduan Cu-Zn-Al telah banyak diketahui pada penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Berikut gambar struktur mikro pada penelitian yang dilakukan Aldirmaz (2013).



Gambar 2.10 Struktur mikro Cu-26,04Zn%-4,01Al%
(Aldirmaz, 2013)

2.8 Metode Pengujian

Terdapat beberapa metode pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini. Diantaranya adalah pengujian metalografi, pengujian kekerasan, pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), dan pengujian *Shape Memory Effect* (SME).

2.8.1 Pengujian Metalografi

Menurut Sawitri (2013), metalografi merupakan ilmu yang mempelajari karakteristik mikrostruktur suatu logam dan paduannya serta hubungannya dengan sifat-sifat logam dan paduannya tersebut. Untuk mendapatkan struktur mikro yang jelas, maka permukaan sampel harus benar-benar diratakan agar sampel yang telah dipreparasi dapat terlihat dan tergambar bentuk struktur mikro dari mikroskop sehingga cahaya yang berasal dari mikroskop akan memantul ke mata kita. Oleh karena itu, sebelum dilakukan pengamatan mikrostruktur dengan mikroskop maka diperlukan proses-proses persiapan sampel. Sampel yang akan diuji harus dipreparasi dengan tahap-tahap preparasi spesimen yaitu:

a. *Sampling Position* (proses pengambilan sampel)

Pemilihan sampel yang tepat dari suatu benda uji studi mikroskopik merupakan hal yang sangat penting. Pemilihan sampel tersebut didasarkan pada tujuan pengamatan yang hendak dilakukan. Pengambilan sampel dilakukan pada daerah yang akan diamati mikrostruktur maupun makrostrukturnya.

b. *Cutting* (pemotongan sampel)

Cutting adalah proses pemotongan sampel. Pemotongan yang dilakukan harus tepat dan hati-hati, karena jika tidak maka akan dapat menyebabkan struktur mikro beruba atau rusak. Dalam proses pemotongan pasti terjadi gesekan antara dua logam, yaitu antara logam yang ingin dipotong dengan alat pemotongnya (gergaji). Oleh karena itu, dalam pemotongan harus dijaga jangan sampai adanya gesekan yang dapat menghasilkan panas berlebih agar tidak merusak struktur mikro sehingga diperlukannya *coolants*. *Coolants* adalah cairan pendingin.

c. *Mounting*

Pada dasarnya, sampel yang diuji berukuran sangat kecil atau memiliki bentuk yang tidak beraturan sehingga sangat sulit dalam penanganan untuk proses preparasi selanjutnya yaitu *grinding* dan *polishing*. Oleh karena itu untuk memudahkan kita memegang benda uji, maka sampel harus di-*mounting*.

d. *Grinding*

Grinding merupakan salah satu tahap preparasi spesimen dimana dalam proses ini dilakukan pengampelasan. Permukaan spesimen hasil dari proses sebelumnya, pasti memiliki permukaan yang tidak rata, terkorosi, terdapat gesekan bahkan porositas. Untuk meratakan dan menghilangkan itu semua maka dilakukan *grinding* (pengampelasan). Pengampelasan dilakukan dengan ampelas yang ukurannya berbeda-beda yaitu ukuran kertas ampelasnya dinyatakan dengan mesh. Pengampelasan

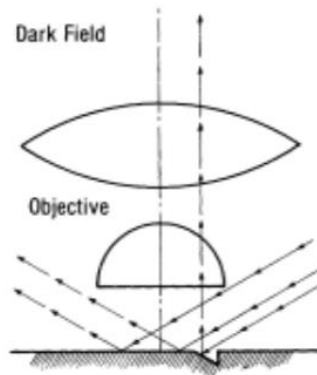
dilakukan mulai dari nomor mesh yang rendah (kasar) hingga yang tinggi (halus). Pada saat proses pengampelasan, dilakukan dengan memberikan *coolants* air. Air berfungsi untuk memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul yang dapat merubah struktur mikro sampel dan memperpanjang masa pemakaian kertas amplas. Dengan pengampelasan dapat meratakan dan menghaluskan permukaan sampel dengan cara menggosokkan sampel pada kertas abrasif / amplas.

e. *Polishing*

Polishing adalah proses terakhir dari bagian preparasi spesimen untuk mendapatkan permukaan benda kerja yang halus dengan mengoleskan alumina terhadap permukaan sampel supaya didapatkan permukaan sampel yang halus dan mengkilap.

f. Observasi mikroskopis

Observasi mikroskopis dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik untuk mengetahui struktur mikro spesimen yang telah dipreparasi. Untuk prinsip alur cahaya pada pengamatan mikroskopis dapat dilihat pada Gambar 2.11 di bawah ini.



Gambar 2.11 Alur cahaya pada pengamatan mikroskopis
(Kauffman, 2003)

2.8.2 Pengujian Kekerasan

Pada umumnya, kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen. Terdapat tiga jenis ukuran kekerasan, tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu: (1) Kekerasan goresan (*scratch hardness*); (2) Kekerasan lekukan (*indentation hardness*); (3) Kekerasan pantulan (*rebound*). Untuk logam, hanya kekerasan lekukan yang banyak menarik perhatian dalam kaitannya dengan bidang rekayasa.

Uji kekerasan vickers menggunakan indentor piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besar sudut antar permukaan-permukaan piramida yang saling berhadapan adalah 136°. Nilai ini dipilih karena mendekati sebagian besar nilai perbandingan yang diinginkan antara diameter lekukan dan diameter bola penumbuk pada uji kekerasan brinell. Angka kekerasan vickers didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan. Pada prakteknya, luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. *Vickers Hardness Number* (VHN) dapat ditentukan dari Persamaan 2.2 berikut:

$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{(1,854)P}{d^2} \quad (2.2)$$

Dengan :

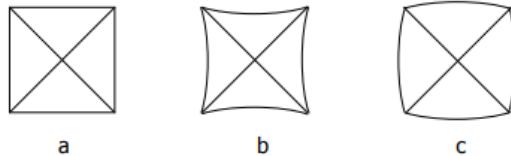
P = Beban yang digunakan (kg)

d = Panjang diagonal rata-rata (mm)

θ = Sudut antara permukaan intan yang berhadapan = 136°

Karena jejak yang dibuat dengan penekan piramida serupa secara geometris dan tidak terdapat persoalan mengenai ukurannya, maka VHN tidak tergantung kepada beban. Pada umumnya hal ini dipenuhi, kecuali pada beban yang sangat ringan. Beban yang biasanya digunakan pada uji vickers berkisar antara 1 hingga 120 kg. Tergantung pada kekerasan logam yang akan diuji. Hal-hal yang menghalangi keuntungan pemakaian metode vickers adalah: (1) Uji ini tidak dapat digunakan untuk pengujian rutin

karena pengujian ini sangat lamban, (2) Memerlukan persiapan permukaan benda uji yang hati-hati, dan (3) Terdapat pengaruh kesalahan manusia yang besar pada penentuan panjang diagonal.



Gambar 2.12 Tipe-tipe lekukan piramida intan: (a) lekukan yang sempurna; (b) lekukan bantal jarum; (c) lekukan berbentuk tong (Dieter, 1987)

Lekukan yang benar yang dibuat oleh penekan piramida intan harus berbentuk bujur sangkar Gambar 2.12 (a). Lekukan bantal jarum Gambar 2.12 (b) adalah akibat terjadinya penurunan logam di sekitar permukaan piramida yang datar. Keadaan demikian terjadi pada logam-logam yang dilunakkan dan mengakibatkan pengukuran panjang diagonal yang berlebihan. Lekukan berbentuk tong Gambar 2.12 (c) akibat penimbunan ke atas logam-logam di sekitar permukaan penekan terdapat pada logam-logam yang mengalami proses pengerjaan dingin (Dieter, 1987).

Terdapat hubungan antara kekerasan Vickers dengan kekuatan luluh / *yield strength* (σ_y), dimana dengan adanya penekanan beban pada permukaan benda uji menyebabkan aliran plastis benda uji di bawah indenter. Hal ini menunjukkan resistensi terhadap lekukan atau kekerasan sebanding dengan kekuatan luluh material dan tekanan pada indenter adalah tiga kali kekuatan luluh tarik bahan. Sehingga didapatkan hubungan seperti Persamaan 2.3:

$$\sigma_y \left(\frac{\text{in.kgf}}{\text{mm}^2} \right) = \frac{1}{3} HV (0.1)^{n-2} \quad (2.3)$$

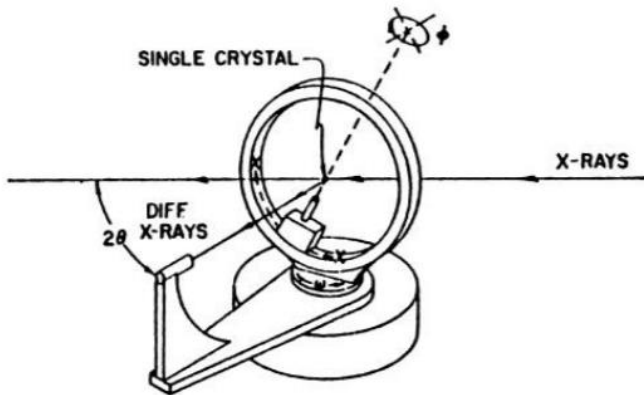
Dimana:

HV = *Hardness Vickers*

n = *Meyer's strain hardening coefficient*

2.8.3 Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Teknik difraksi sinar-x dapat digunakan untuk analisis kualitatif karena setiap unsur atau senyawa mempunyai pola difraksi tertentu. Dengan demikian, jika pola difraksi unsur atau senyawa diketahui maka unsur atau senyawa tersebut dapat diidentifikasi. Prinsip kerja pada pengujian XRD adalah ketika suatu material dikenai sinar-x, maka intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan adanya penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar-x yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-x yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi (Kaufmann, 2003).



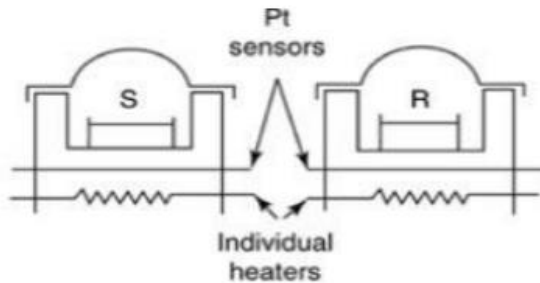
Gambar 2.13 Prinsip kerja XRD (Kaufmann, 2003)

Bentuk keluaran dari difraktometer dapat berupa data analog atau digital. Rekaman data analog berupa grafik garis-garis yang terekam per menit sinkron, dengan detektor dalam sudut 2θ per menit, sehingga sumbu-x setara dengan sudut 2θ . Sedangkan rekaman digital menginformasikan intensitas sinar-x terhadap jumlah intensitas cahaya per detik. Pola difraktogram yang

dihasilkan berupa deretan puncak-puncak difraksi dengan intensitas relatif bervariasi sepanjang nilai 2θ tertentu. Besarnya intensitas relatif dari deretan puncak-puncak tersebut bergantung pada jumlah atom atau ion yang ada, dan distribusinya di dalam sel satuan material tersebut. Pola difraksi setiap padatan kristalin sangat khas, yang bergantung pada kisi kristal, unit parameter dan panjang gelombang sinar-x yang digunakan. Dengan demikian, sangat kecil kemungkinan dihasilkan pola difraksi yang sama untuk suatu padatan kristalin yang berbeda (Warren, 1969).

2.8.4 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Pada dasarnya ada dua macam metode *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) yaitu *power compensation Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dan *Heat flux mode*. Menurut Mark (2005), konsep pengoperasian *Power Compensation Differential Scanning Calorimetry* (DSC) didasarkan pada menjaga suhu pada R dan S yang sama (R dan S nama sampel pada Gambar 2.14). Skema dari *Power Compensation Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dapat dilihat pada Gambar 2.14. Hal ini dicapai dengan menempatkan sensor temperatur ke dalam penghubung rangkaian. Setiap perubahan temperatur baik sampel atau referensi segera diimbangi dengan jumlah yang setara dengan aliran yang diperlukan untuk mendorong pemanas untuk menjaga pada temperatur yang sama. Dengan demikian, integral dari input daya selama transisi atau perubahan kapasitas panas adalah sama dengan perbedaan energi (ΔH) yang dipasok ke sampel atau referensi selama waktu tertentu. Hal ini akan menjadi endotermik atau eksotermik tergantung pada saat perjalanan ke sampel atau panci referensi, masing-masing. Puncak yang menunjuk kebawah dinamakan eksotermik dan puncak yang menunjuk ke atas dinamakan endotermik.



Gambar 2.14 Skematik dari instrumen *power compensation* DSC (Mark, 2005)

Tipe yang kedua dari *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) yaitu metode *Heat Flux*, metode ini yaitu mirip dengan DTA yang menghasilkan sinyal ΔT . Cara pengoperasiannya yaitu menghubungkan perangkat keras ke perangkat lunak, dengan hati-hati keduanya dihubungkan kedalam sistem, secara kualitatif mengkonversi dari ΔT ke ΔH dan mengkompensasi kekurangan lainnya yaitu berupa rugi-rugi aliran termal dan sensitifitas dari sensor (Mark, 2005).

Prinsip dasar dari analisa DSC adalah ketika sampel mengalami perubahan fisik seperti transisi fase, diperlukan perubahan panas yang mengalir dari referensi dan sampel untuk mempertahankan suhu referensi dan sampel agar tetap sama. Proses eksotermik atau endotermik yaitu tergantung pada lebih atau kurangnya panas yang harus mengalir ke sampel. Misalnya, sampel padat yang bertransisi menuju fase cair, akan memerlukan lebih banyak panas, karena panas yang mengalir ke sampel untuk meningkatkan temperatur pada tingkat yang sama sebagai referensi diserap oleh sampel, ini merupakan proses endotermik karena membutuhkan banyak panas. Proses eksotermik yaitu proses pengeluaran energi panas dari sampel. Efek termal berbentuk puncak, ditandai dengan perubahan entalpi dan kisaran temperatur.

2.8.5 Pengujian Efek *Shape Memory*

Pengujian Efek *Shape Memory* ini dilakukan berdasarkan standar ASTM F2082-01. Metode pengujian ini dilakukan dengan pendinginan spesimen uji ke fasa nominal sehingga fasa sepenuhnya martensit, kemudian mendeformasi spesimen, dan memanaskan spesimen ke fasa austenitik sepenuhnya. Selama pemanasan, gerakan spesimen diukur dan diplot terhadap temperatur spesimen. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui persentase *recovery* dari paduan *shape memory* yang telah dideformasi. Bentuk spesimen untuk pengujian ini dapat berupa *strip*, *wire*, maupun *tube* dengan ketebalan atau diameter 0,3-3,0 mm. Spesimen yang sudah diberi perlakuan panas pembentukan *shape memory* ditebuk, lalu dipanaskan hingga terjadi *recovery shape*. Untuk mengetahui persentase *recovery* atau efek *shape memory* dapat dihitung dengan Persamaan 2.4 di bawah ini:

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

Dimana:

θ_0 = Sudut awal

θ_t = Sudut akhir setelah pemanasan

2.9 Penelitian Sebelumnya

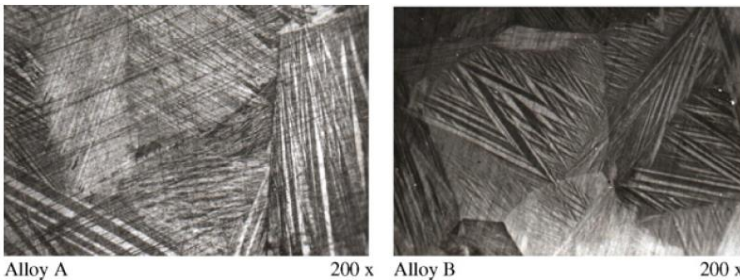
Pada tahun 2007 Asanovic dan kawan-kawannya telah melakukan penelitian terkait studi transformasi fasa β pada Cu-Zn-Al *shape memory alloys*. Dua paduan *shape memory* Cu-Zn-Al dengan komposisi tertentu yang ditunjukkan pada tabel di bawah selanjutnya disiapkan untuk diberikan perlakuan panas. Pertama dilakukanlah perlakuan panas *homogenizing* pada temperatur 1073-1123 K selama 2 jam, dilanjutkan *quenching* dengan media pendingin air pada temperatur ruangan. Setelah di *homogenizing*, *ingot* kemudian diberi perlakuan *hot forged* dan *cold rolled* sehingga menghasilkan ketebalan 0.3 mm. *Intermediate annealing* pada temperatur 773 K selama 60 menit dilakukan setiap melewati proses perlakuan sebanyak dua atau tiga kali. Spesimen yang

dipotong hingga berbentuk plat kemudian dilakukan *solution treatment* selama 10 menit pada daerah fasa β (temperatur 1143 K untuk paduan A dan 1133 K untuk paduan B), kemudian dilakukan *step quench*. Semua spesimen di *quench* dengan media pendingin oli pada temperatur 378 ± 5 K selama 10 menit dan di *quench* lagi dengan air es. Prosedur *step quenching* ini dipilih untuk dilakukan supaya menghindari fenomena stabilisasi martensit, dimana ketika *aging* dilakukan dan langsung di *quench* maka spesimen akan mengalami stabilisasi martensit dan degradasi dari karakteristik *shape memory*. Tabel 2.4 menunjukkan komposisi paduan yang digunakan.

Tabel 2.4 Komposisi paduan dalam % massa (Asanovic, 2007)

Paduan	Zn	Al	Cu
A	20.8	5.8	<i>Rest</i>
B	22.3	5.1	<i>Rest</i>

Hasil observasi menggunakan mikroskop optik dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari paduan A dan paduan B berdasarkan proses yang dilakukan pada spesimen *step quench* menunjukkan fasa induk batas butir dan struktur martensit yang dapat dilihat sesuai dengan Gambar 2.15

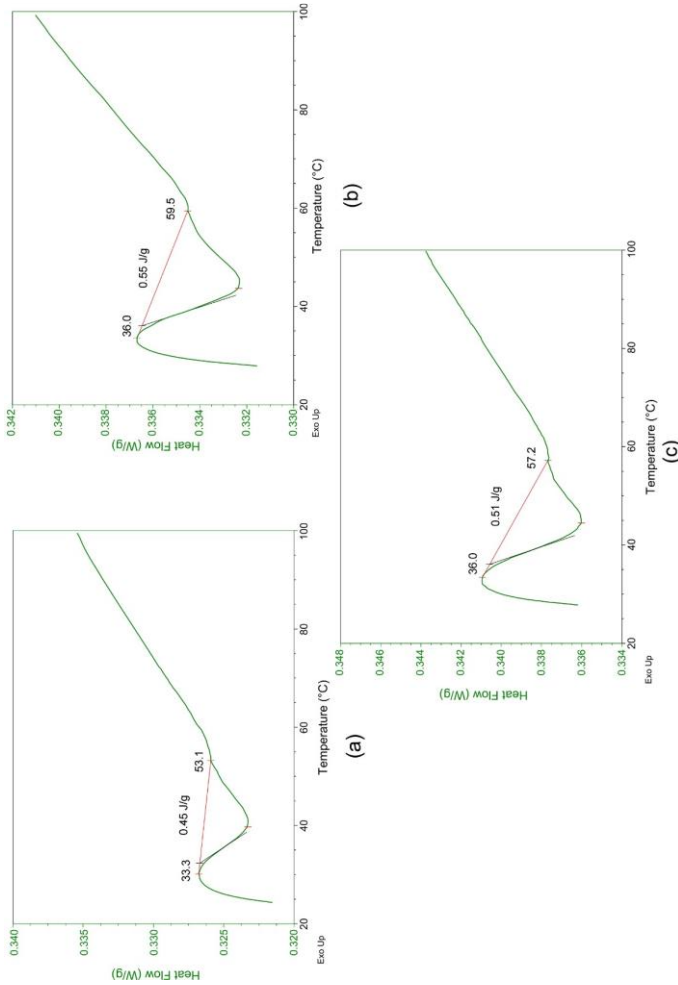


Gambar 2.15 Struktur mikro spesimen hasil *quench* (Asanovic, 2007)

Pada tahun 2017, Stosic juga meneliti terkait efek komposisi dan perlakuan termal dari paduan Cu-Zn-Al dengan konten aluminium yang rendah dalam sifat *shape memory*. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan dua komposisi paduan, yang pertama dengan komposisi Cu-25%Zn-4Al dan Cu-30%Zn-4%Al. Paduan tersebut dibuat dengan proses pengecoran menggunakan 99.9% tembaga, seng, dan aluminium. Hasil coran yang berbentuk *ingot* kemudian dilakukan *hot-rolled* sehingga menjadi bentuk *strips* dengan tebal 0.5 mm. Selanjutnya paduan tersebut diberi perlakuan panas termasuk β *solutionizing* pada temperatur 850°C selama 30 menit dan diikuti dengan: (1) *direct quenching* dengan air pada temperatur ruangan; (2) *up-quenching – quenching* dengan air pada temperatur ruangan dan *subsequent-ageing* pada temperatur 100°C selama 30 menit sebelum dilakukan *quench* kembali dengan air pada temperatur ruangan; (3) *step-quenching – quenching* dengan air mendidih pada temperatur 100°C selama 15 menit dan akhirnya didinginkan dengan air pada temperatur ruangan. Berdasarkan perlakuan yang telah diberikan tersebut, maka pada penelitian Stosic didapatkan hasil uji DSC dimana menunjukkan temperatur austenit *start* dan *finish*. Tabel 2.5 menunjukkan temperature transformasi dan Gambar 2.16 menunjukkan hasil pengujian DSC.

Tabel 2.5 Temperatur austenit *start* dan *finish* hasil uji DSC (Stosic, 2017)

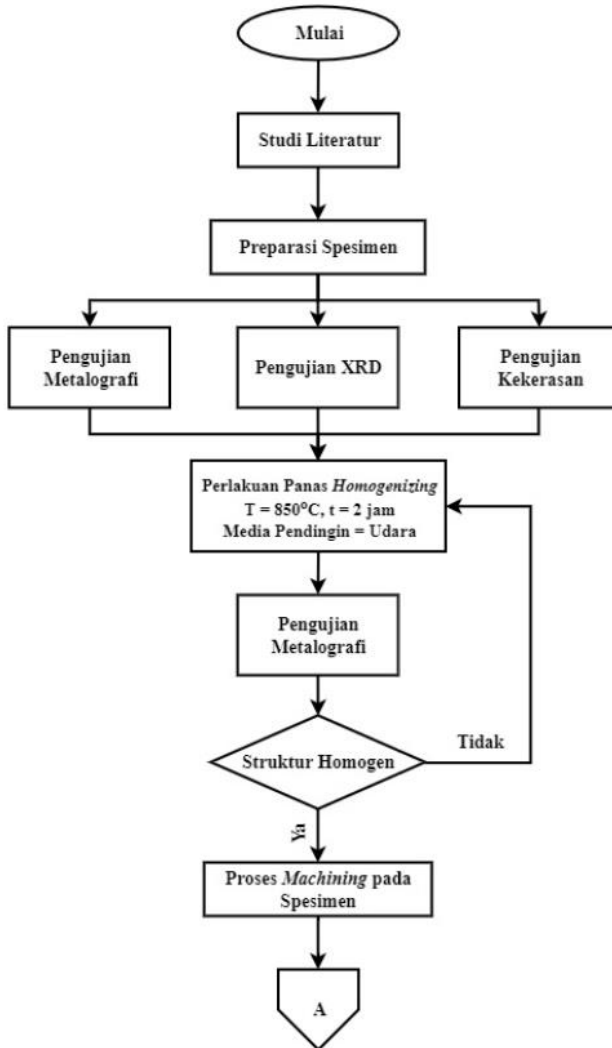
Sampel	Temperatur Transformasi (°C)						Tranformasi entalpi rata-rata (J/g)
	<i>Heating run 1</i>		<i>Heating run 2</i>		<i>Heating run 3</i>		
	As	Af	As	Af	As	Af	
1 (<i>directly quenched</i>)	33.3	53.1	36.0	59.5	36.0	57.2	0.50
2 (<i>up-quenched</i>)	34.2	54.3	34.8	55.7	35.2	56.3	0.49
3 (<i>step-quenched</i>)	32.5	51.3	33.6	54.0	37.8	56.1	0.47

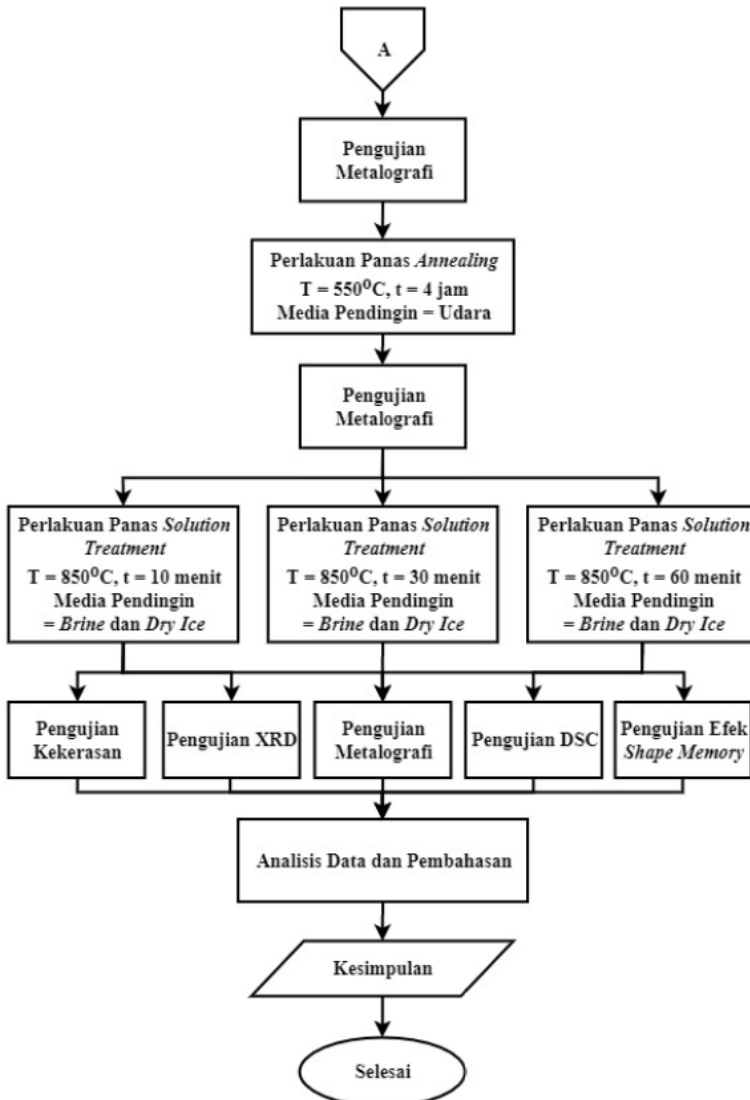


Gambar 2.16 Hasil uji DSC Cu-25%Zn-4%Al; (a) heating run 1; (b) heating run 2; (c) heating run 3 (Stosic, 2017)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

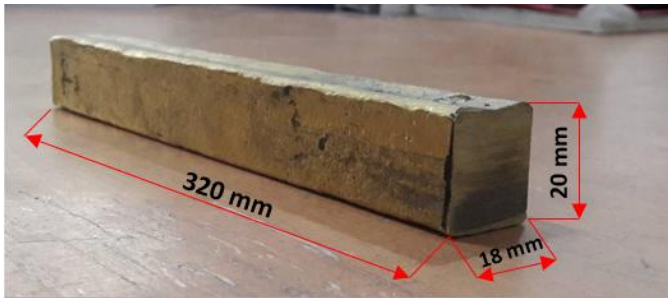
Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap sesuai yang tertera pada diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Penelitian dimulai dengan melakukan dan melakukan studi literatur yang sesuai dengan penelitian yang dilakukan. Selanjutnya, melakukan preparasi spesimen. Setelah itu spesimen yang telah dipreparasi kemudian dilakukan Uji Metalografi dan Uji Kekerasan. Kemudian, logam spesimen diberikan perlakuan panas *homogenizing* pada temperatur 850°C dengan waktu tahan selama 2 jam dan media pendingin. Kemudian melakukan *machining* pada spesimen. Selanjutnya, logam spesimen diberikan perlakuan panas *annealing* pada temperatur 550°C dengan waktu tahan selama 4 jam dan media pendingin udara. Setelah itu, logam diberikan perlakuan panas kembali dengan metode *Solution Treatment* pada temperatur 850°C dengan waktu tahan selama 10 menit, 30 menit, dan 60 menit dengan masing-masing 2 variasi media pendingin yaitu *brine solution* dan *dry ice*. Kemudian, logam dilakukan Uji Metalografi, Uji XRD, Uji Kekerasan dan Uji *Shape Memory Effect* dan untuk Uji DSC hanya pada spesimen dengan perlakuan panas *solution treatment* dengan waktu tahan selama 10 menit dan media pendingin *brine solution*. Setelah tahap pengujian selesai, dilakukan analisis data hasil pengujian serta pembahasan sehingga didapatkan kesimpulan.

3.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesimen Ingot Cu-21Zn-5Al

Spesimen ingot yang digunakan dalam penelitian ini merupakan spesimen hasil pengecoran tembaga, kuningan, dan aluminium dengan komposisi 21Zn, 5Al, dan Cu *balance*. Ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Spesimen ingot Cu-21Zn-5Al

2. Bahan Etsa

Bahan etsa yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Alaneme pada tahun 2018, yaitu:

- a. 5 gram FeCl_3
- b. 10 ml HCl
- c. 95 ml Etanol

3. *Brine Solution*

Brine solution pada penelitian ini digunakan sebagai media pendingin. *Brine solution* merupakan H_2O yang ditambahkan larutan NaCl lebih dari 5%. (ASM Metal Handbook Vol. 4). Pada penelitian ini H_2O ditambahkan dengan 10% NaCl untuk membentuk larutan *brine*.

4. *Dry Ice*

Dry ice pada penelitian ini digunakan sebagai media pendingin yang ekstrem.

3.3 Alat Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Gergaji Mesin

Gergaji mesin yang digunakan dalam penelitian ini adalah untuk melakukan preparasi spesimen logam coran maupun preparasi untuk spesimen uji.

2. Timbangan Digital

Timbangan digital yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai alat untuk meninmbang berat logam sesuai dengan target komposisi.

3. *Electrical Furnace*

Electrical Furnace yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berfungsi sebagai alat yang digunakan untuk melakukan proses perlakuan panas dengan memanaskan spesimen hingga temperatur tertentu dan menahannya pada waktu tertentu. Alat ini merupakan milik Laboratorium Metalurgi Teknik Material ITS. Ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 *Electrical furnace*

4. Mesin *Grinding* dan *Polishing*

Mesin *grinding* dan *polishing* dalam penelitian ini digunakan untuk melakukan proses *grinding* pada spesimen paduan untuk keperluan uji metalografi. Ditunjukkan pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Mesin *grinding* dan *polishing*

5. Gelas Ukur

Gelas ukur yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk mengukur bahan-bahan yang digunakan untuk pembuatan larutan etsa

6. *Beaker Glass*

Beaker Glass yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi sebagai wadah untuk mencampur bahan larutan etsa

7. Alat *Wire Cut*

Alat *wire cut* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan alat potong yang berbentuk kawat dengan bahan dasar molybdenum yang digunakan untuk preparasi spesimen uji efek *shape memory*.

8. Mikroskop Optik (OLYMPUS BX51M-RF)

Mikroskop optik yang digunakan dalam penelitian ini merupakan alat untuk mengetahui struktur mikro Cu-21Zn-5Al *Shape memory alloys* sebelum dan sesudah diberi perlakuan panas. Alat ini merupakan milik Laboratorium Metalurgi Teknik Material ITS. Ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Mikroskop optik

9. Alat Uji Kekerasan

Alat uji kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat uji kekerasan *Universal Hardness Tester HBRV 187,5 A* milik Laboratorium Metalurgi Teknik Material ITS yang digunakan untuk mengukur nilai kekerasan Cu-21Zn-5Al *Shape memory alloys* sebelum maupun sesudah diberi perlakuan panas. Ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Alat uji kekerasan

10. Alat Uji DSC

Alat uji DSC yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk mengetahui temperature martensit *start* dan, martensit *finish*, austenit *start*, dan autenit *finish* dari Cu-21Zn-5Al *Shape memory alloys* dengan memanaskan paduan tersebut yang berfasa martensit dari temperatur kamar sampai temperatur tertentu. Alat uji DSC kemudian akan mendeteksi perubahan kalor secara eksotermik maupun endotermik yang menandakan terjadinya awal dan akhir perubahan fasa pada temperatur tertentu. Alat ini merupakan milik LPPM ITS.

11. Alat Uji XRD

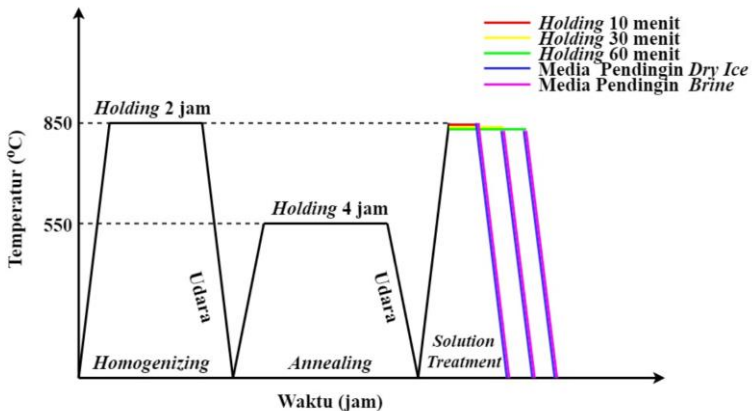
Alat uji XRD yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk pada Cu-21Zn-5Al *Shape memory alloys* dengan cara menembakkan sinar X pada paduan tersebut. Alat uji XRD ini menggunakan PAN *Analytical XRD* dan merupakan milik Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material ITS. Ditunjukkan pada Gambar 3.7 di bawah ini



Gambar 3.7 Alat uji XRD

3.4 Variabel Penelitian

Adapun variabel dalam penelitian ini adalah *holding time* dan variasi media pendingin proses *solution treatment* yang ditunjukkan pada Gambar 3.8



Gambar 3.8 Diagram perlakuan panas

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan terdapat beberapa tahap yaitu diantaranya:

3.5.1 Prosedur Proses *Homogenizing*

Adapun proses *homogenizing* yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Menyiapkan spesimen.
2. Menyiapkan *furnace* untuk perlakuan panas.
3. Memasukkan spesimen ke dalam *furnace*, kemudian dipanaskan hingga temperatur 850°C dan ditahan selama 2 jam.
4. Mengeluarkan spesimen dari *furnace* dan dibiarkan dingin di udara.

3.5.2 Prosedur Proses *Annealing*

Adapun proses *annealing* yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Menyiapkan spesimen.
2. Menyiapkan *furnace* untuk perlakuan panas.
3. Memasukkan spesimen ke dalam *furnace*, kemudian dipanaskan hingga temperatur 550°C dan ditahan selama 4 jam.
4. Mengeluarkan spesimen dari *furnace* dan dibiarkan dingin di udara.

3.5.3 Prosedur Proses *Solution Treatment*

Adapun proses *solution treatment* yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Menyiapkan spesimen
2. Menyiapkan *furnace* untuk perlakuan panas
3. Memasukkan spesimen ke dalam *furnace*, kemudian dipanaskan hingga temperatur 850°C dan ditahan selama 10 menit.
4. Mengeluarkan spesimen dari *furnace* dan memasukkannya ke dalam media pendingin *dry ice* dan *brine*.
5. Mengulangi langkah 1 – 4 namun ditahan selama 30 menit dan 1 jam.

3.6 Proses Pengujian

Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ada lima pengujian yaitu : pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro paduan, pengujian kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan paduan, pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) untuk mengetahui temperature martensit *start*, martensit *finish*, austenit *start*, dan austenit *finish*, pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui fasa apa saja yang terkandung dalam paduan, dan juga pengujian *Shape Memory*

Effect (SME) untuk mengetahui *shape memory recovery* dari paduan.

3.6.1 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari spesimen yang akan diuji. Prinsip pengujian ini adalah dengan mengamati permukaan spesimen yang sebelumnya sudah dipreparasi, *dipolish*, dan di etsa menggunakan etsa dengan komposisi 5 gr FeCl₃, 10 ml HCl, dan 95 ml etanol. Dengan ukuran sampel yang digunakan yaitu 25 mm x 20 mm x 10 mm. Kemudian diamati dengan menggunakan alat mikroskop optik *Metallurgical Microscope* OLYMPUS BX51M-RF.

3.6.2 Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan dari sampel yang diuji. Pengujian kekerasan ini dilakukan sebelum dan sesudah perlakuan panas *solution treatment*. Pengujian kekerasan dalam penelitian ini menggunakan metode Vickers sesuai dengan standar ASTM E92-17. Dengan ukuran sampel yang digunakan yaitu 25 mm x 20 mm x 10 mm, diberikan beban sebesar 30 kgf dan ditahan selama 10 detik.

3.6.3 Pengujian Differential Scanning Calorimeter (DSC)

Pengujian *Differential Scanning Calorimeter* atau yang biasa disingkat dengan DSC, merupakan sebuah alat yang dapat mengukur kalor yang terserap atau dikeluarkan dari sebuah material selama material tersebut dipanaskan dan didinginkan pada rentang temperatur transformasi. Sampel material yang diuji berukuran sangat kecil (beberapa miligram). Puncak endoterm dan eksoterm muncul saat sampel menyerap atau mengeluarkan energi akibat adanya transformasi. Sehingga, dapat diukur temperatur awal, akhir, serta puncak dari perubahan fasa material yang diuji.

3.6.4 Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD ditujukan untuk mengetahui fasa yang terkandung dalam spesimen yang diuji. Pengujian XRD dilakukan pada spesimen yang belum diberi perlakuan panas dan juga yang sudah diberikan perlakuan panas untuk mengetahui perbandingan fasa yang terbentuk. Sampel material yang digunakan untuk pengujian XRD ini ukuran tebalnya tidak lebih dari 4 mm.

3.6.5 Pengujian Efek *Shape Memory*

Pengujian *shape memory effect* dilakukan berdasarkan pada standar ASTM F2082-01. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui persentase *recovery* dari paduan *shape memory* yang telah dideformasi. Bentuk spesimen untuk pengujian ini dapat berupa *strip*, *wire*, maupun *tube* dengan ketebalan atau diameter 0,3-3,0 mm. Spesimen yang sudah diberi perlakuan panas pembentukan *shape memory* ditekuk, kemudian dipanaskan hingga terjadi *recovery shape*.

3.7 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian yang dilakukan, ditujukan supaya mendapatkan data yang sistematis. Secara detail dapat dilihat pada Tabel 3.1 di bawah ini

Tabel 3.1 Rancangan penelitian

Komposisi	Variabel Penelitian	Nama Spesimen	Pengujian				
			Uji Metalografi	Uji XRD	Uji Kekerasan	Uji DSC	Uji SME
Cu-21Zn-5Al	-	AC	√	√	√	-	-
	<i>Dry Ice</i> dengan <i>holding time</i> 10 menit	DI10	√	√	√	-	√

<i>Dry Ice</i> dengan <i>holding time</i> 30 menit	DI30	√	√	√	-	√
<i>Dry Ice</i> dengan <i>holding time</i> 60 menit	DI60	√	√	√	-	√
<i>Brine</i> dengan <i>holding time</i> 10 menit	B10	√	√	√	√	√
<i>Brine</i> dengan <i>holding time</i> 30 menit	B30	√	√	√	-	√
<i>Brine</i> dengan <i>holding time</i> 60 menit	B60	√	√	√	-	√

Keterangan:

AC : *As Cast*

DI10 : *Dry Ice* 10 menit

DI30 : *Dry Ice* 30 menit

DI60 : *Dry Ice* 60 menit

B10 : *Brine* 10 menit

B30 : *Brine* 30 menit

B60 : *Brine* 60 menit

3.8 Jadwal Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan selama empat bulan dimulai dari bulan September 2019 hingga bulan Desember 2019. Rencana jadwal penelitian secara terperinci dapat dilihat pada Tabel 3.2 di bawah

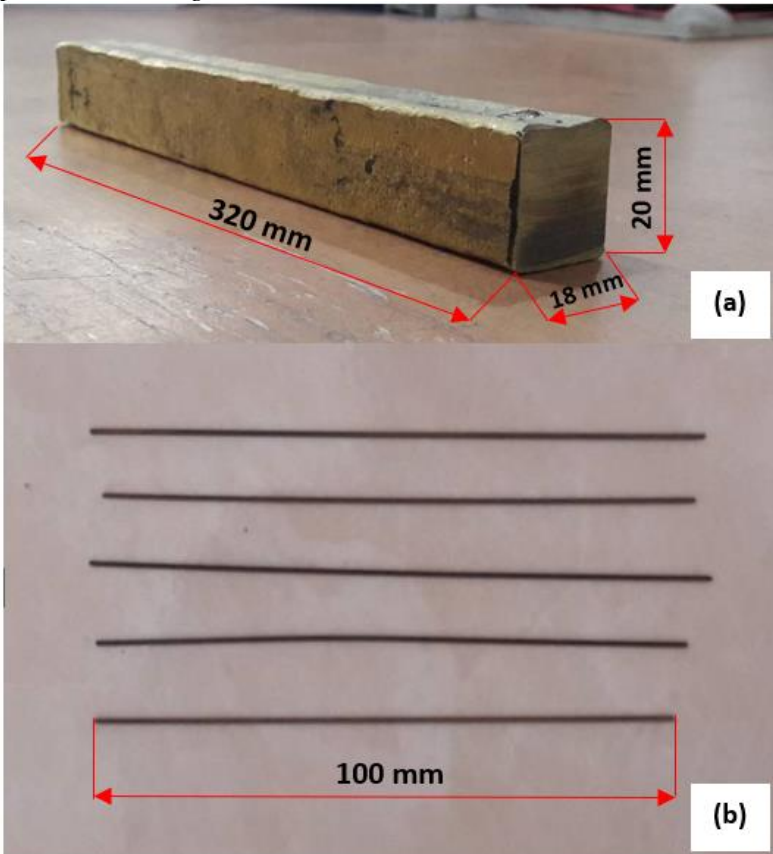
Tabel 3.2 Jadwal penelitian

Kegiatan	Bulan																			
	Agustus				September				Oktober				November				Desember			
	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			
Studi Literatur																				
Konsultasi Kepada Dosen Pembimbing																				
Pengecoran																				
Pengujian Komposisi																				
Perlakuan Panas																				
Pengujian DSC																				
Pengujian Metalografi																				
Pengujian Kekerasan																				
Pengujian Shape Memory Effect																				
Penyusunan Laporan Akhir																				

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengecoran dan Proses *Machining* Cu-21Zn-5Al *Shape Memory Alloys*

Gambar 4.1 di bawah ini menunjukkan gambar spesimen Cu-21Zn-5Al hasil pengecoran berbentuk balok dan juga hasil proses *machining*.



Gambar 4.1 Spesimen Cu-21Zn-5Al *Shape Memory Alloys* :
(a) Hasil coran, (b) Hasil *machining*

Gambar 4.1 (a) merupakan spesimen Cu-21Zn-5Al *Shape memory alloys* hasil coran yang berbentuk balok dengan dimensi 320 x 18 x 20 mm dimana setelah proses pengecoran dilakukan uji komposisi dengan alat uji *X-Ray Fluorescence (XRF)* PANalytical MiniPal4 yang hasil komposisinya ditunjukkan oleh Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Komposisi standar dan hasil uji komposisi spesimen Cu-Zn-Al *shape memory alloys*

Keterangan	Komposisi		
	Cu (%)	Zn (%)	Al (%)
ASM Handbook			
Vol. 2 Bab			
<i>Shape Memory</i>	<i>Balance</i>	10-35	4-10
<i>Alloys</i>			
Hasil Uji	<i>Balance</i>	21	5

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa hasil uji komposisi yang dihasilkan sesuai dengan standard ASM *Handbook* Vol. 2 untuk *shape memory alloys*. Setelah dilakukan uji komposisi selanjutnya dilaksanakan proses *machining* dengan menggunakan alat *wirecut*. Tujuan dari dilakukannya proses *machining* yaitu untuk membentuk spesimen Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* yang mulanya berbentuk balok menjadi berbentuk kawat atau *wire* dengan panjang 100 mm dan diameter 1 mm sesuai dengan ketentuan pada ASTM F-2082 yang nantinya digunakan untuk pengujian efek *shape memory*. Hasil proses *machining* dapat dilihat pada Gambar 4.1 (b) dan secara makro tidak terlihat adanya cacat pada hasil *machining* tersebut.

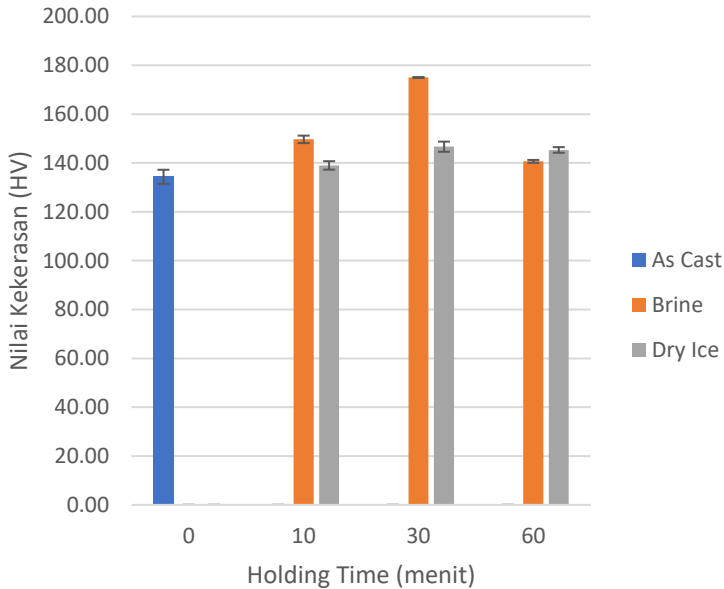
4.2 Hasil Pengujian Kekerasan Cu-21Zn-5Al *Shape Memory Alloys*

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan spesimen yang diuji dengan menggunakan metode Vickers. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat uji

Universal Hardness Tester HBRV 187,5 A milik Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material FTI-ITS. Spesimen yang diuji yaitu spesimen AC (*As Cast*) yang belum diberi perlakuan panas, spesimen DI10 (*Dry Ice* 10 menit), B10 (*Brine* 10 menit), DI30 (*Dry Ice* 30 menit), B30 (*Brine* 30 menit), DI60 (*Dry Ice* 60 menit), dan B60 (*Brine* 60 menit) yang telah diberi perlakuan panas *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment* dengan *holding time* 10 menit, 30 menit, dan 60 menit dengan media pendingin *brine* dan *dry ice*. Beban yang digunakan saat pengujian kekerasan yaitu 30 kgf dengan indentasi selama 10 detik. Pengujian dilakukan dengan indentasi sebanyak 3 titik pada masing-masing spesimen dan kemudian nilai kekerasan di rata-rata sehingga didapatkan hasil sesuai dengan Tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kekerasan Cu-21Zn-5Al *Shape memory alloys*

Spesimen	Nilai Kekerasan (HV)
As Cast	$134,33 \pm 2,89$
B10	$149,67 \pm 1,53$
B30	175 ± 0
B60	$140,67 \pm 0,57$
DI10	$139 \pm 1,73$
DI30	$146,67 \pm 2,08$
DI60	$145,33 \pm 1,15$



Gambar 4.2 Grafik nilai kekerasan Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys*

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan didapatkan bahwa kekerasan untuk spesimen *as cast* memiliki nilai $134,33 \pm 2,89$ HV, untuk spesimen B10 $149,67 \pm 1,53$ HV, untuk spesimen B30 175 ± 0 HV, untuk spesimen B60 memiliki nilai $140,67 \pm 0,57$ HV. untuk spesimen DI10 $139 \pm 1,73$ HV, untuk spesimen DI30 $140,33 \pm 0,57$ HV, dan untuk spesimen DI60 $145,33 \pm 1,15$ HV, Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa nilai kekerasan meningkat setelah diberi perlakuan panas.

Sifat keras pada Cu-Zn-Al *shape memory alloys* berasal dari adanya fasa β , karena fasa β memiliki sifat yang keras dan rapuh pada paduan Cu-Zn menurut Sadayappan (2004). Unsur Al dapat meningkatkan fasa β sehingga dapat meningkatkan kekerasan. Ketika dilakukan pendinginan cepat, maka terbentuk fasa martensit. Semakin cepat laju pendinginan, maka fasa martensit

yang terbentuk semakin cepat dan banyak. Pada baja, sifat martensit adalah keras. Namun, menurut Lobo (2015) pada *shape memory alloys*, sifat martensit adalah lunak.

Pada spesimen *dry ice* diketahui berdasarkan Grafik 4.2 nilai kekerasan mengalami kenaikan dari *holding time* dengan waktu 10 menit ke *holding time* dengan waktu 30 menit, namun kekerasan menurun pada waktu *holding time* 60 menit. Sehingga terjadi kekerasan maksimum pada spesimen dengan *holding time* 30 menit. Hal ini sesuai dengan hasil metalografi pada spesimen *dry ice* pada gambar Lampiran 2 bahwa untuk spesimen *dry ice* dengan *holding time* 30 menit memiliki bentuk butir yang lebih kecil dibandingkan spesimen *dry ice* yang lain.

Pada spesimen *brine solution* dapat dilihat pada grafik terjadi kekerasan maksimum pada spesimen dengan *holding time* 30 menit. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian metalografi bahwa ukuran butir pada spesimen B30 memiliki ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan spesimen yang lain sehingga membuat kekerasannya meningkat dibandingkan dengan spesimen yang lainnya.

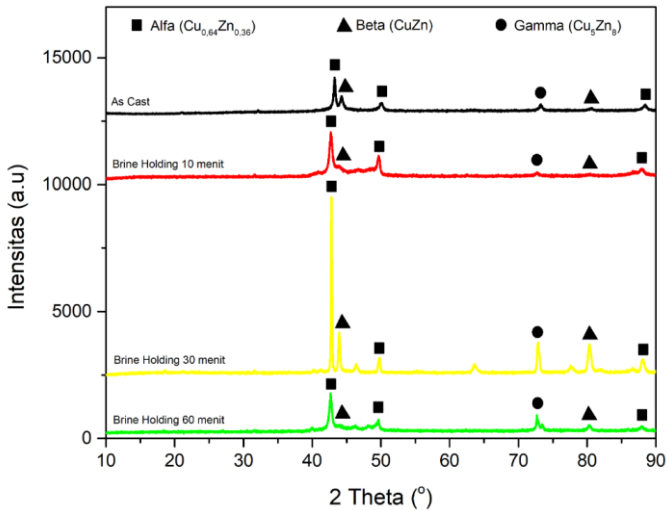
Berdasarkan ASM *Metal Handbook* Vol. 4 (1991), semakin lama waktu yang digunakan untuk perlakuan panas *solution treatment* maka akan menyebabkan terjadinya pertumbuhan butir, dimana pertumbuhan butir tersebut akan meningkatkan kekerasan pada spesimen. Namun, setelah dilakukan proses *quenching* struktur atau fasanya masih berupa larutan padat lewat jenuh (*super saturated solid solution*). Seiring dengan penambahan waktu *holding*, maka mulai terbentuk zona presipitat dan paduan aluminium menjadi agak kuat dan keras. Ketika waktu *holding* ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *peak aged*. Pada daerah *peak aged* presipitat mengumpul dan terbentuk fasa yang halus (fasa β). Jika fasa-fasa tersebut mulai terbentuk maka akan didapatkan tingkat kekerasan dan kekuatan logam paduan aluminium yang optimal. Apabila setelah mencapai *peak aged* (puncak penuaan) waktu *holding* masih ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *over aged*. Pada daerah *over aged* ini akan

didapatkan fasa α , jika fasa α ini terbentuk maka akan menyebabkan paduan aluminium menjadi lunak kembali dan berkurang kekerasannya (Smith, 1995). Penurunan nilai kekerasan juga disebabkan karena adanya fasa α , dimana menurut Suhadi (2016) dalam paduan Cu-Zn fasa α memiliki karakteristik yaitu struktur kristal FCC yang bersifat ulet, nilai kekerasan yang rendah dan mudah dilakukan pengerjaan dingin.

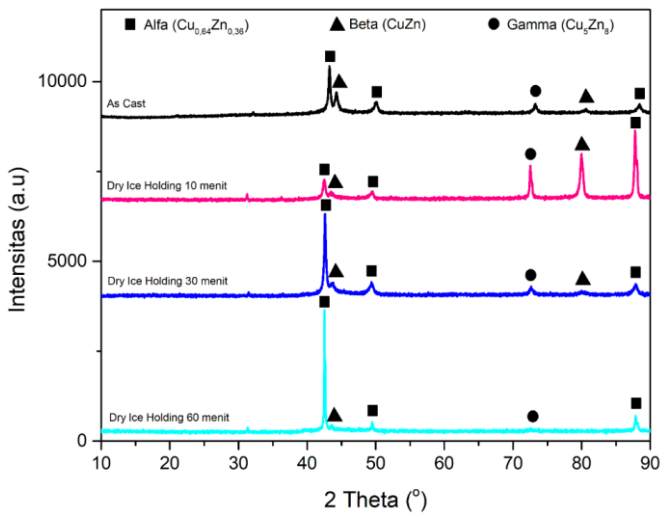
Kekerasan juga berhubungan dengan resilien, dimana semakin kuat dan keras suatu material maka nilai energi resiliennya pun semakin besar dikarenakan tegangan *yield* yang juga tinggi. Hal ini menyebabkan daerah elastis dibawah kurva membesar sehingga kemampuan untuk menyerap energi pada daerah elastis semakin besar maka diperlukan energi yang cukup untuk melakukan deformasi. Sebaliknya, jika semakin lunak material maka resilien semakin kecil dan lebih mudah untuk dideformasi.

4.3 Hasil Pengujian XRD Cu-21Zn-5Al *Shape Memory Alloys*

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan dengan menggunakan alat XRD PANalytical. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) ini ditujukan untuk mengetahui fasa dan senyawa yang terbentuk serta struktur kristal pada spesimen Cu-Zn-Al *shape memory alloys* dari sebelum diberi perlakuan panas seperti pada spesimen *as cast* dan setelah diberi perlakuan panas seperti pada spesimen B10, DI10, B30, DI30, B60, dan DI60. Hasil dari pengujian ini kemudian dianalisa dengan menggunakan *software High Score Plus Marven* untuk membandingkan *peak* yang terbentuk sesuai dengan data standar *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) yang sesuai dengan fasa tersebut. Pada Gambar 4.3 di bawah ini menunjukkan grafik hasil pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk spesimen dengan media pendingin *brine* dan Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengujian XRD untuk spesimen dengan media pendingin *dry ice*.



Gambar 4.3 Hasil pengujian XRD Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan media pendingin *brine*



Gambar 4.4 Hasil pengujian XRD Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan media pendingin *dry ice*

Dari hasil pengujian XRD seperti Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 di atas, dapat dilihat bahwa spesimen *as cast* terdapat *peak* yang menunjukkan fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) yang terletak pada posisi 2θ $42,325^\circ$ pada bidang (1,1,1), posisi 2θ $49,275^\circ$ pada bidang (2,0,0), dan posisi 2θ $87,455^\circ$ pada bidang (3,1,1), serta fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) memiliki struktur kristal kubik sesuai dengan kode referensi 00-050-1333. Berdasarkan Gambar 4.3 di atas diketahui bahwa fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) juga muncul pada spesimen lainnya dengan media pendingin *brine* begitupun juga pada Gambar 4.4 dengan media pendingin *dry ice*, dimana fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$) memiliki intensitas yang cukup tinggi pada semua spesimen dibandingkan dengan fasa yang muncul lainnya.

Kemudian terdapat fasa β -brass (CuZn) yang terletak pada posisi 2θ $43,473^\circ$ pada bidang (1,1,0), posisi 2θ $79,631^\circ$ pada bidang (2,2,1), serta fasa β -brass (CuZn) memiliki struktur kristal kubik sesuai dengan kode referensi 00-002-1231. Berdasarkan Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 di atas diketahui bahwa fasa β -brass (CuZn) juga muncul pada spesimen lainnya baik media pendingin *brine* maupun media pendingin *dry ice*. Namun yang membedakan adalah intensitas pada setiap spesimennya.

Selain fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}$) dan fasa β -brass (CuZn), fasa terakhir yang muncul adalah fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) yang terletak pada posisi 2θ $72,455^\circ$ pada bidang (6,3,1) dan fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) memiliki struktur kristal kubik sesuai dengan kode referensi 01-074-5803. Berdasarkan Gambar 4.3 dan 4.4 di atas diketahui bahwa fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) juga muncul pada spesimen lainnya baik pada media pendingin *brine* maupun media pendingin *dry ice*. Intensitas fasa γ -brass (Cu_5Zn_8) dibandingkan dengan fasa α -brass ($\text{Cu}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}$) dan fasa β -brass (CuZn) memiliki intensitas yang relatif rendah pada semua spesimen.

Dari fasa yang muncul pada hasil pengujian XRD dapat diketahui bahwa hal tersebut sesuai dengan diagram fasa terner yang menyebutkan bahwa ketika Cu-21Zn-5Al dipadukan maka akan terbentuk fasa α , fasa β , dan juga fasa γ . Dimana ketika diberi perlakuan panas *solution treatment* maka fasa α akan terlarut

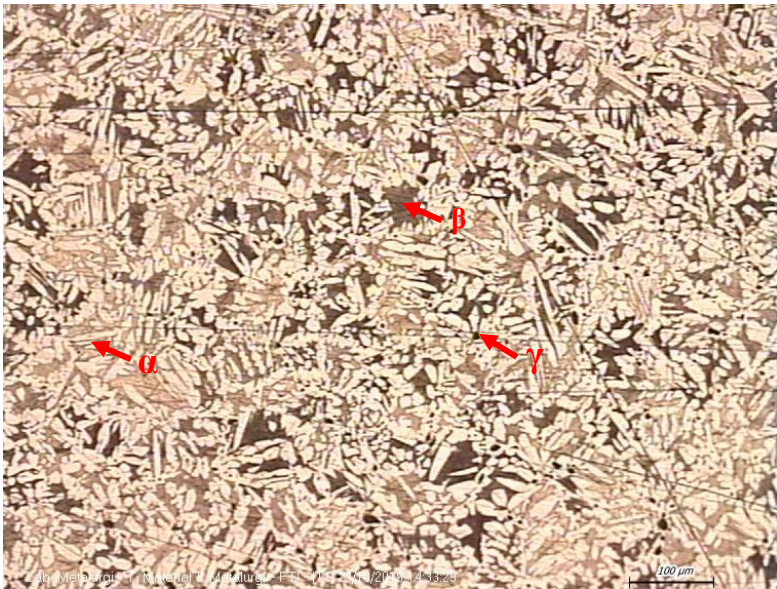
menjadi fasa β . Fasa β yang teridentifikasi pada hasil XRD spesimen *as cast* disebabkan oleh kondisi pendinginan yang tidak ekuilibrium pada proses pengecoran.

4.4 Hasil Pengujian Metalografi Cu-21Zn-5Al *Shape Memory Alloys*

Pengujian metalografi dilakukan setelah spesimen Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dilakukan proses *heat treatment* mulai dari *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment*. Kemudian pengujian metalografi ini dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk pada paduan. Pengujian metalografi ini menggunakan *Metallurgical Microscope* OLYMPUS BX51M-RF.. Sebelum melakukan pengamatan menggunakan mikroskop optik, spesimen dietsa menggunakan larutan etsa khusus untuk paduan Cu-Zn dengan komposisi 5 gram FeCl_3 , 100 ml etanol, dan 10 ml HCl. Metode etsa yang dilakukan yaitu dengan metode *immerse* selama 10-20 detik.

Tabel 4.3 Hasil analisis perbandingan jumlah fasa Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* menggunakan aplikasi fiji

Spesimen	% Area			
	α	β	γ	β'
<i>As Cast</i>	65,974	32,889	1,137	-
<i>Homogenizing</i>	68,501	27,679	3,820	-
<i>Machining</i>	63,768	12,605	0,641	22,986
<i>Annealing</i>	64,191	17,730	4,301	13,778
B10	31,226	26,546	1,330	40,898
B30	47,372	24,328	0,395	27,905
B60	32,646	28,608	4,399	34,347
DI10	63,838	14,374	2,454	19,334
DI30	57,378	27,227	1,904	13,491
DI60	45,13	24,937	2,089	27,844



Gambar 4.5 Hasil pengujian metalografi spesimen *as cast* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* perbesaran 100x

Gambar 4.5 di atas menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen *as cast* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x. Sesuai dengan gambar yang tertera bahwa fasa yang muncul dari spesimen *as cast* adalah fasa α , β , dan γ . Hal ini sesuai dengan diagram fasa terner Cu-Zn-Al. Menurut ASM *Metal Handbook* Vol. 9 tahun 2004, fasa α memiliki karakteristik berwarna terang, untuk fasa β berwarna gelap, dan fasa γ berbentuk seperti butiran presipitat berwarna gelap. Dari hasil metalografi tersebut dapat diketahui bahwa fasa α merupakan fasa yang lebih dominan dibandingkan dengan fasa β dan fasa γ . Hal ini dapat dibuktikan dengan persentase area yang telah dihitung menggunakan aplikasi fiji menunjukkan bahwa berdasarkan Tabel 4.3 untuk persentase area fasa α sebesar 65,974%, untuk fasa β sebesar 32,889%, dan untuk fasa γ sebesar 1,137%. Dengan adanya fasa α dan fasa β yang muncul dalam hasil

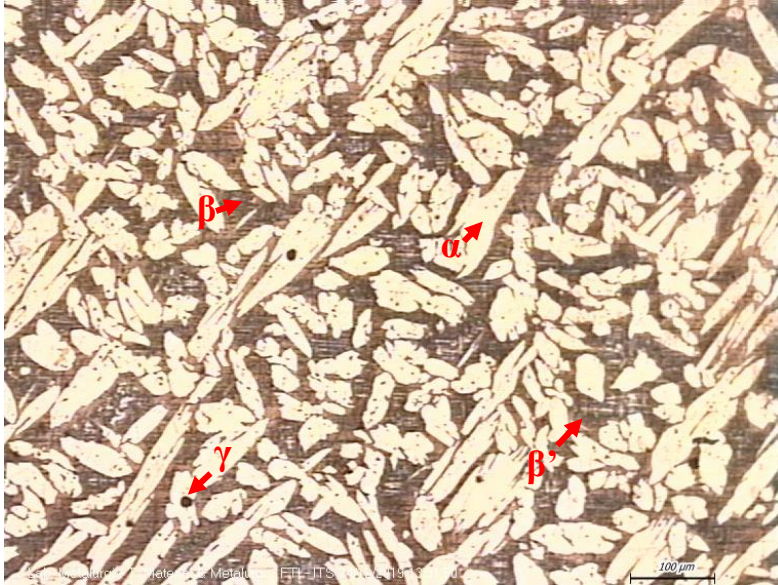
metalografi, dapat mengindikasikan bahwa paduan Cu-21Zn-5Al memiliki efek *shape memory* (Dasgupta, 2014).



Gambar 4.6 Hasil pengujian metalografi spesimen *homogenizing* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* perbesaran 100x

Gambar 4.6 menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen *homogenizing* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x. Dimana pada gambar dapat dilihat bahwa fasa yang muncul masih tetap sama seperti fasa yang muncul pada spesimen *as cast*, yaitu fasa α , fasa β , dan fasa γ . *Homogenizing* dalam penelitian ini ditujukan untuk membuat struktur mikro dari spesimen menjadi lebih homogen, hal ini dapat dilihat pada hasil metalografi sesuai gambar di atas bahwa struktur mikro yang terbentuk memiliki bentuk yang homogen daripada spesimen *as cast* pada Gambar 4.4 sebelumnya. Spesimen *homogenizing* juga telah dianalisis persentase fasa yang terbentuk yaitu untuk fasa α

sebesar 68,501%, fasa β sebesar 27,679%, dan fasa γ sebesar 3,820%.



Gambar 4.7 Hasil pengujian metalografi spesimen *machining* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* perbesaran 100x

Gambar 4.7 menunjukkan hasil metalografi pada spesimen *machining* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* pada perbesaran 100x, dimana dapat dilihat bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa α , fasa β , fasa γ , dan juga martensit. Pada spesimen *machining* muncul struktur martensit namun hanya sedikit. Martensit terbentuk akibat pendinginan yang sangat cepat, dimana pada spesimen *machining* ini terjadi pendinginan cepat saat pemberian *coolant* saat proses *machining* ketika pembentukan *wire* berlangsung. Spesimen *machining* juga telah dianalisis persentase fasa yang terbentuk menggunakan aplikasi fiji yaitu untuk fasa α sebesar 63,768%, fasa β sebesar 12,605%, fasa γ sebesar 0,641%, dan martensit sebesar 22,986%.



Gambar 4.8 Hasil pengujian metalografi spesimen *annealing* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* perbesaran 100x

Gambar 4.8 menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen *annealing* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x, dimana fasa yang terbentuk masih sama seperti spesimen yang sebelumnya yaitu fasa α , fasa β , fasa γ , dan juga martensit namun dengan besar persentase yang berbeda. Dimana untuk fasa α sebesar 64,191%, untuk fasa β sebesar 17,730%, untuk fasa γ sebesar 4,301%, dan untuk martensit sebesar 13,778%. Proses *annealing* dilakukan dengan tujuan untuk melepas tegangan sisa setelah proses *machining* berlangsung dan juga meningkatkan keuletan spesimen Cu-21Zn-5Al.

Pada Gambar 4.9 (a) menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen B10 Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x dimana dapat terlihat fasa yang muncul adalah fasa α , fasa β , fasa γ , dan juga martensit. Pada spesimen ini fasa martensit muncul paling dominan diantara fasa-

fasa yang lain, hal ini dibuktikan dengan besar persentase yang telah dianalisis menggunakan aplikasi fiji. Untuk fasa α sebesar 31,226%, untuk fasa β sebesar 26,546%, untuk fasa γ sebesar 1,330%, dan untuk martensit sebesar 40,898%. Menurut Dasgupta (2014), dengan adanya fasa martensit maka akan berpotensi untuk terjadi transformasi martensit dimana akan mengakibatkan adanya efek *shape memory*. Semakin banyak martensit yang terbentuk maka efek *shape memory* yang dihasilkan akan lebih baik.

Kemudian pada Gambar 4.9 (b) menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen B30 Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* pada perbesaran 500x, dimana dapat terlihat bahwa fasa yang terbentuk adalah α , fasa β , fasa γ , dan juga martensit. Namun pada spesimen ini, ukuran butir relatif lebih kecil dibandingkan dengan spesimen-spesimen yang lain, sehingga struktur baru dapat dilihat dengan jelas saat menggunakan perbesaran mikroskop yang lebih besar. Hal ini dikarenakan bahwa semakin lama waktu yang digunakan pada proses *solution treatment* maka akan menyebabkan pertumbuhan butir menurut ASM *Metal Handbook* Vol. 4 (1991). Besar persentase fasa yang terbentuk juga telah dianalisis menggunakan aplikasi fiji sehingga didapatkan hasil untuk fasa α yaitu sebesar 47,372%, untuk fasa β sebesar 24,328%, untuk fasa γ sebesar 0,395%, dan untuk martensit sebesar 27,905%. Dengan adanya struktur martensit yang muncul maka spesimen B30 berpotensi untuk memiliki efek *shape memory*.

Pada Gambar 4.9 (c) menunjukkan hasil pengujian metalografi pada spesimen B60 Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x. Dimana fasa yang terbentuk pada spesimen dapat dilihat pada gambar yaitu fasa α , fasa β , fasa γ , dan juga martensit. Dengan besar persentase fasa γ sebesar 32,646%, fasa β sebesar 28,608%, fasa γ sebesar 4,399%, dan martensit sebesar 34,347%. Dengan adanya struktur martensit pada seluruh media pendingin *brine solution* maka spesimen tersebut memiliki potensi adanya efek *shape memory*.

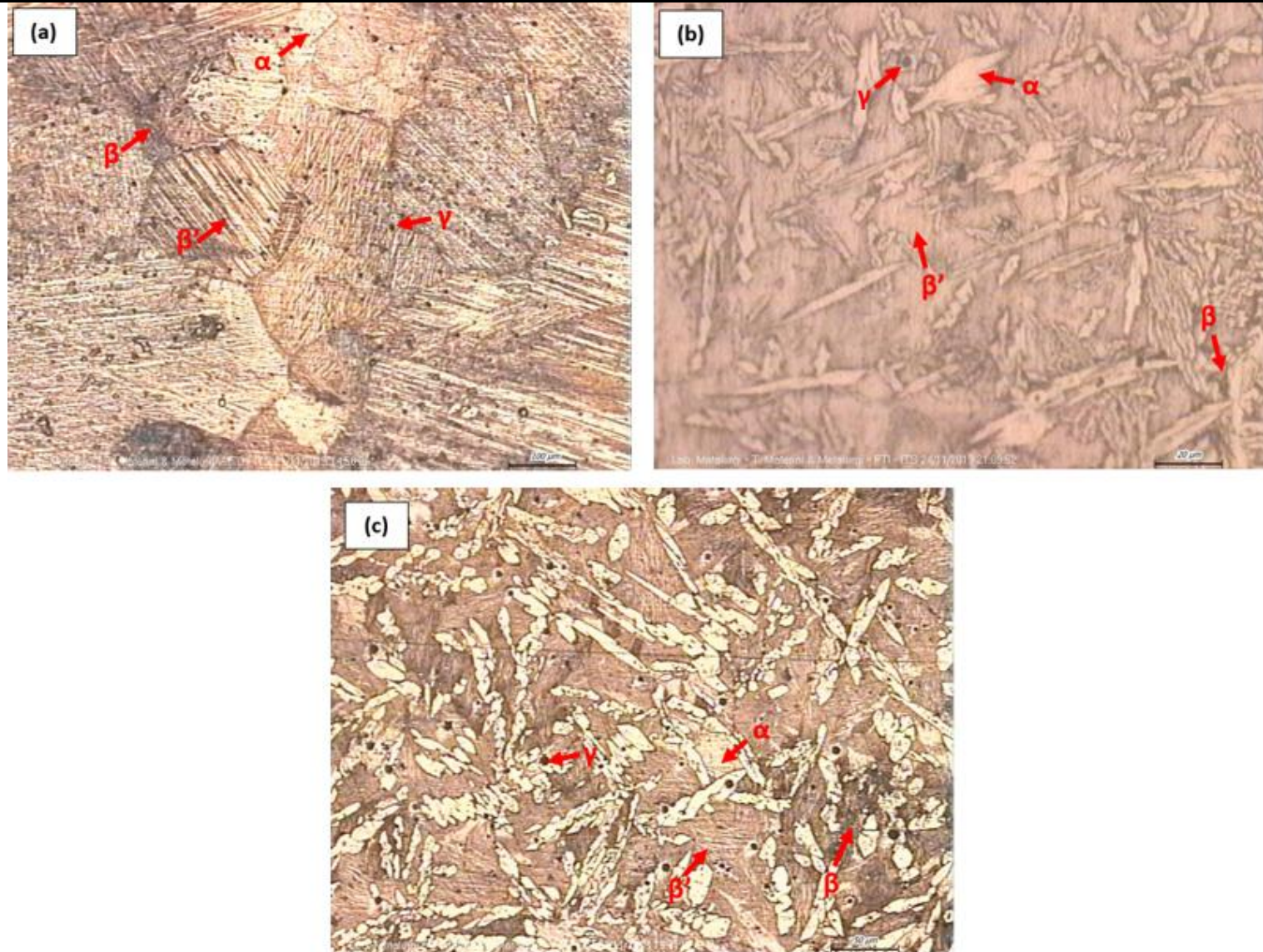
Kemudian pada Gambar 4.10 (a) merupakan hasil pengujian metalografi pada spesimen DI10 Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa α , fasa β , fasa γ , dan juga martensit. Persentase fasa juga telah dihitung dengan menggunakan aplikasi fiji untuk mengetahui besar tiap fasanya. Untuk fasa α adalah sebesar 63,838%, untuk fasa β sebesar 14,374%, untuk fasa γ sebesar 2,454%, dan untuk martensit sebesar 19,334%. Pada spesimen *dry ice* ini persentase martensit yang terbentuk lebih sedikit daripada martensit yang terbentuk pada spesimen *brine solution*.

Pada Gambar 4.10 (b) merupakan hasil pengujian metalografi pada spesimen DI30 Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x dimana dapat dilihat bahwa fasa yang terbentuk masih sama dengan spesimen sebelumnya yaitu fasa α , fasa β , fasa γ , dan juga martensit. Kemudian besar persentase fasa juga telah dianalisis untuk setiap fasa yang terbentuk. Untuk fasa α persentasenya sebesar 57,378%, untuk fasa β sebesar 27,227%, untuk fasa γ sebesar 1,904%, dan martensit sebesar 13,491%.

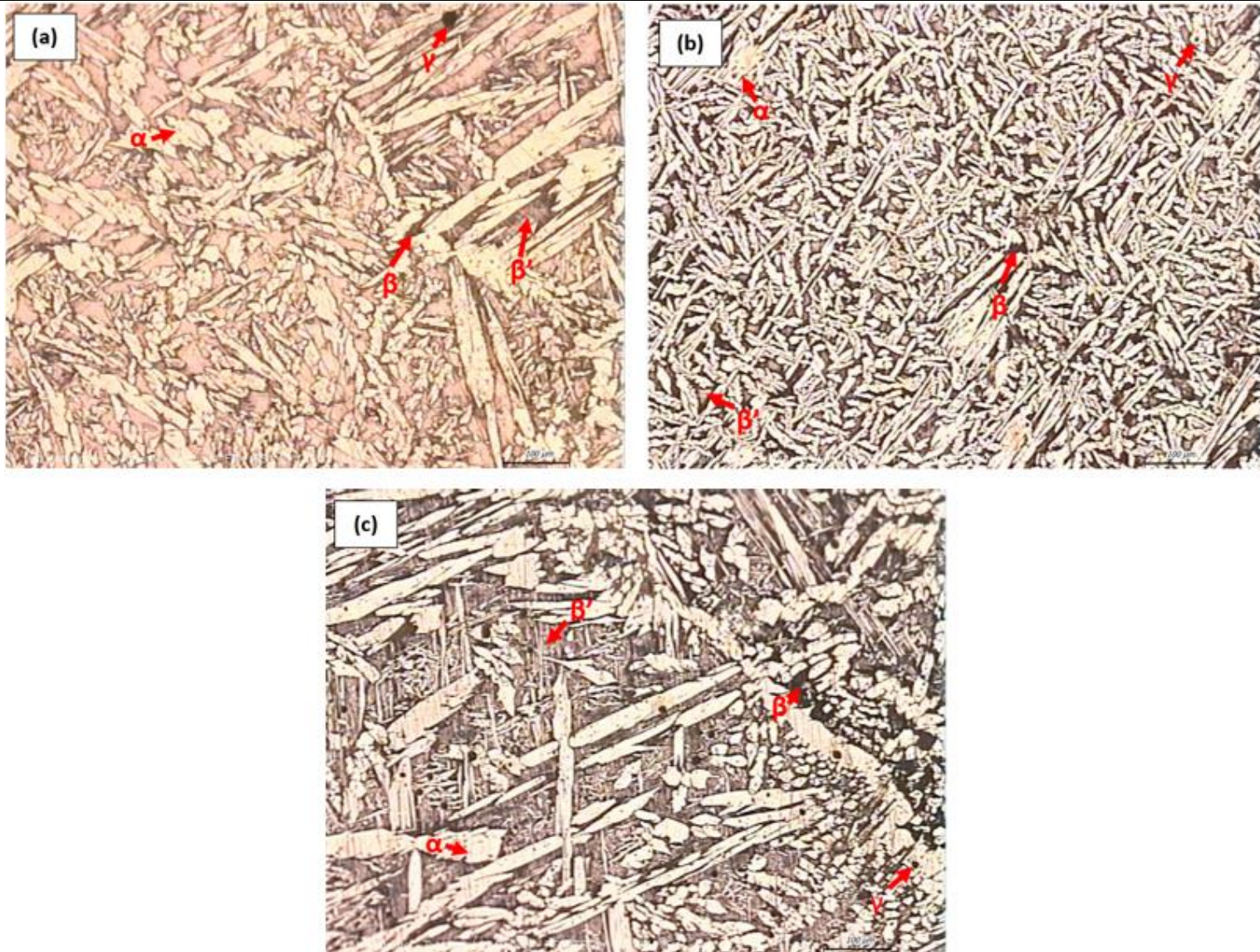
Pada Gambar 4.10 (c) merupakan hasil pengujian metalografi untuk spesimen DI60 Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x, dimana menurut gambar tersebut fasa yang terbentuk terdapat beberapa fasa yaitu fasa α , fasa β , fasa γ , dan juga martensit. Setelah dilakukan analisis menggunakan aplikasi fiji, maka didapatkan besar persentase tiap fasa yang terbentuk. Untuk fasa α yaitu sebesar 45,13%, untuk fasa β sebesar 24,937%, untuk fasa γ sebesar 2,089% dan untuk martensit sebesar 27,844%.

Pada semua spesimen *dry ice* muncul fasa yang sama yaitu fasa α , fasa β , fasa γ , dan juga martensit namun yang membedakan hanyalah persentasenya saja dimana dari semua spesimen fasa yang paling dominan adalah fasa α . Hal ini juga sesuai dengan hasil pengujian XRD yang menunjukkan bahwa intensitas fasa α memiliki intensitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan dengan

fasa lain yang terbentuk. Kemudian untuk spesimen dengan media pendingin *dry ice* memiliki persentase martensit yang lebih sedikit dibandingkan dengan media pendingin *brine*, hal ini dikarenakan media pendingin *dry ice* berbentuk padat sehingga ketika proses *quenching* pendinginan tidak merata di seluruh bagian spesimen.



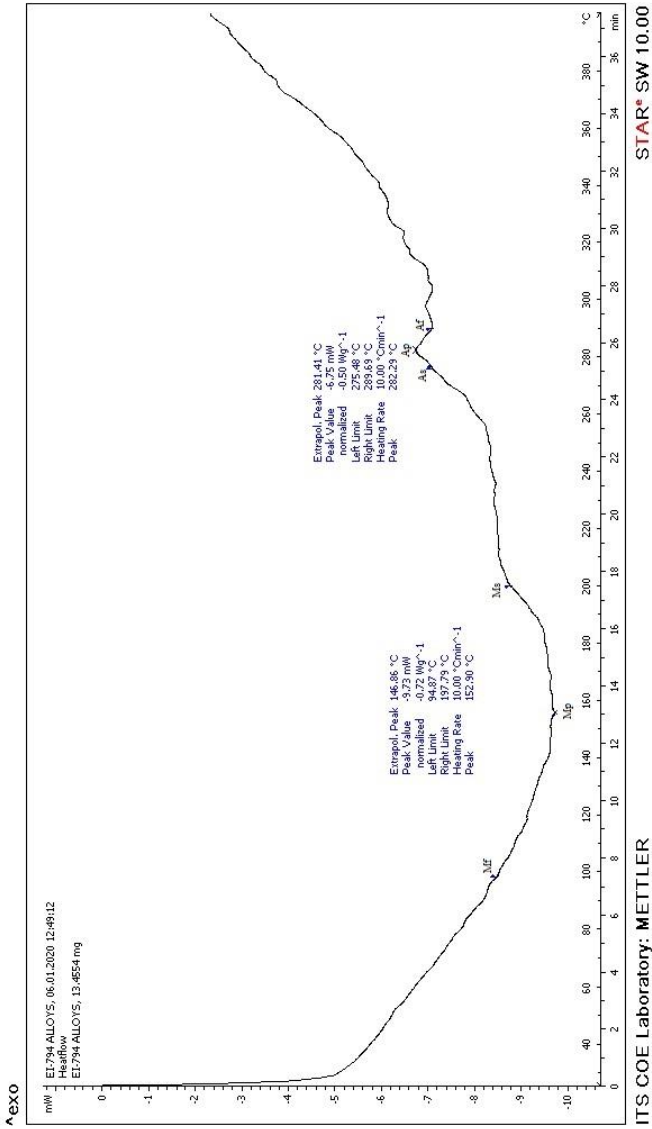
Gambar 4.9 Hasil pengujian metalografi spesimen *brine* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan *holding time* (a) 10 menit (b) 30 menit, dan (c) 60 menit



Gambar 4.10 Hasil pengujian metalografi spesimen *brine* Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* dengan *holding time* (a) 10 menit (b) 30 menit, dan (c) 60 menit

4.5 Hasil Pengujian DSC Cu-21Zn-5Al *Shape Memory Alloys*

Pengujian DSC dilakukan untuk mengetahui suatu transformasi temperatur dari spesimen Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys*. Pengujian ini menggunakan alat *Differential Scanning Calorimeter* (DSC) Mettler Toledo. Sebelum proses pengujian, spesimen dipreparasi dengan ketebalan 5 mm. Kemudian di lakukan *solution treatment* pada temperatur 850°C dengan waktu tahan 2 jam dan *quenched* dengan *brine solution*. Pada proses pengujian, kecepatan pemanasan yang digunakan adalah 10°C/menit dan menggunakan *range* temperatur antara 25° - 400° C.



Gambar 4.11 Grafik hasil pengujian DSC Cu-21Zn-5Al shape memory alloys

Dari hasil pengujian DSC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 menunjukkan terdapat dua *peak* yang terbentuk pada grafik. *Peak* pertama terbentuk karena adanya reaksi eksotermis. Dimana hal ini dibuktikan dengan adanya penurunan *heat flow* sebesar -9,73 mW. Selain itu terdapat *range* transformasi temperatur yang terjadi, pertama terjadi pada batas *peak* kiri pada $T=197,79^{\circ}\text{C}$, puncak *peak* pada $T=152,9^{\circ}\text{C}$, dan batas *peak* kanan pada $T=94,87^{\circ}\text{C}$. Temperatur tersebut disebut juga dengan temperatur transformasi martensit. Untuk martensit *start* (M_s) adalah $94,87^{\circ}\text{C}$, martensit *peak* (M_p) adalah $152,9^{\circ}\text{C}$, dan untuk martensit *finish* (M_f) adalah $197,79^{\circ}\text{C}$. *Peak* kedua terbentuk karena adanya reaksi endotermis dimana hal ini dibuktikan dengan adanya kenaikan *heat flow* sebesar -6,75 mW. Selain itu terdapat *range* transformasi temperatur yang terjadi, pertama terjadi pada batas *peak* kiri pada $T=275,48^{\circ}\text{C}$, puncak *peak* pada $T=282,29^{\circ}\text{C}$, dan batas *peak* kanan pada $T=289,69^{\circ}\text{C}$. Temperatur tersebut disebut juga dengan temperatur transformasi austenit. Untuk austenit *start* (A_s) adalah $275,48^{\circ}\text{C}$, austenit *peak* (A_p) adalah $282,29^{\circ}\text{C}$, dan untuk austenit *finish* (A_f) adalah $289,69^{\circ}\text{C}$.

Tabel 4.4 Temperatur transformasi Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys*

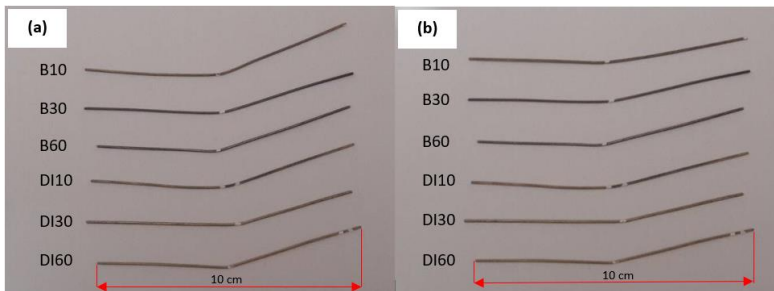
Spesimen	A_s ($^{\circ}\text{C}$)	A_p ($^{\circ}\text{C}$)	A_f ($^{\circ}\text{C}$)	M_s ($^{\circ}\text{C}$)	M_p ($^{\circ}\text{C}$)	M_f ($^{\circ}\text{C}$)
Cu- 21Zn- 5Al	275,48	282,29	289,69	197,79	152,9	94,87

Berdasarkan Tabel 4.4 di atas yang menunjukkan temperatur transformasi Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys*, hasil yang ditunjukkan sesuai dengan ASTM 2005-00 tentang pengujian DSC, dimana grafik pengujian yang ditunjukkan memiliki dua *peak* transformasi temperatur dimana untuk *peak* dengan bentuk seperti gunung menunjukkan reaksi endotermis yang dikenal dengan temperatur transformasi austenit sedangkan untuk *peak*

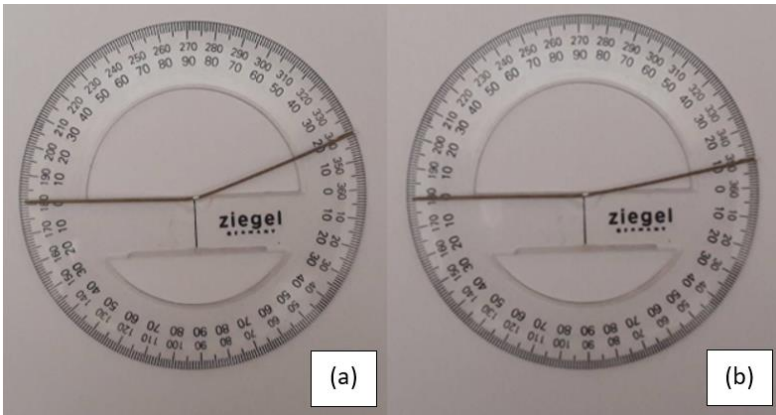
berbentuk lembah menunjukkan reaksi eksotermis yang dikenal dengan temperatur transformasi martensit. Hasil uji DSC ini juga sesuai dengan hasil uji metalografi dimana terbentuk martensit pada semua spesimen yang telah dilakukan proses *solution treatment*.

4.6 Hasil Pengujian Efek *Shape Memory Cu-21Zn-5Al Shape Memory Alloys*

Pengujian efek *shape memory* dilakukan untuk mengetahui persentase *recovery* pada spesimen Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys* yang telah terdeformasi. Bentuk spesimen yang digunakan untuk pengujian ini berupa *wire* dengan ketebalan diameter 1 mm dan panjang 10 cm sesuai dengan standar ASTM F2082. Sebelum dilakukan pengujian, spesimen Cu-21Zn-5Al diberikan perlakuan panas *homogenizing* pada temperatur 850°C dengan waktu tahan 2 jam, *annealing* pada temperatur 550°C dengan waktu tahan 4 jam, dan *solution treatment* pada temperatur 850°C dengan waktu tahan 10 menit, 30 menit, dan 60 menit serta didinginkan dengan variabel media pendingin yang berbeda yaitu *brine solution* dan *dry ice*. Setelah itu, spesimen *dibending* sebesar 20° seperti yang tertera pada Gambar 4.12 (a) dan Gambar 4.13 (a), kemudian dipanaskan hingga terjadi *recovery shape* yang dapat dilihat pada Gambar 4.12 (b) dan Gambar 4.13 (b).



Gambar 4.12 Spesimen uji efek *shape memory* berbagai variabel (a) Sebelum diuji (b) Setelah diuji



Gambar 4.13 Spesimen B10 (a) Sebelum diuji (b) Setelah diuji

Setelah dilakukan pengujian maka nilai *recovery* dari semua spesimen yang didapatkan dirangkum pada Tabel 4.5 yang tertera di bawah ini:

Tabel 4.5 Hasil pengujian efek *shape memory* pada Cu-21Zn-5Al *shape memory alloys*

Spesimen	<i>Recovery</i> (%)
B10	$36,67 \pm 12,58$
B30	$21,67 \pm 5,77$
B60	25 ± 0
DI10	$16,67 \pm 7,64$
DI30	$13,33 \pm 7,64$
DI60	20 ± 0

Menurut Kumar (2008), suatu *Shape Memory Alloys* memiliki *Shape Memory Effect* (SME) ketika dideformasi dalam fasa *twinned* martensit dan ketika beban dilepaskan pada saat temperatur di bawah A_s . Selanjutnya ketika dipanaskan diatas A_r , *shape memory alloys* akan kembali ke bentuk aslinya dengan berubah menjadi fasa induknya yaitu fasa austenitik. Untuk itu proses pengujian efek *shape memory* diawali dengan proses

penekukan berupa pemberian tegangan untuk mengubah fasa *twinned* martensit menjadi *detwinned* martensit. Kemudian dipanaskan sehingga fasanya berubah kembali ke fasa induk yaitu austenit sehingga bentuk akan kembali seperti semula. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, nilai *recovery* yang paling besar terletak pada spesimen B10 dengan nilai *recovery* sebesar 36,67%, untuk spesimen B30 sebesar 21,67%, untuk spesimen B60 sebesar 25%, untuk spesimen DI10 sebesar 16,67%, untuk spesimen DI30 sebesar 13,33%, dan untuk spesimen DI60 sebesar 20%. Hal ini membuktikan adanya kesesuaian dengan hasil pengujian metalografi yang menunjukkan bahwa martensit yang terbentuk pada spesimen B10 paling banyak. Menurut Panjaitan (2016), jika semakin banyak martensit yang terbentuk maka efek *shape memory* akan meningkat pula.

Pada hasil metalografi juga dapat diketahui bahwa pada spesimen *dry ice* fasa yang lebih dominan diantara fasa yang lain adalah fasa α . Dimana menurut Dasgupta (2014), dengan adanya banyak fasa α akan menyebabkan berkurangnya kemampuan efek *shape memory* pada *shape memory alloys*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Pengaruh *holding time* proses *solution treatment* dan variasi media pendingin pada paduan Cu-21Zn-5Al menghasilkan efek *shape memory* pada semua spesimen uji dengan nilai *recovery* yang bervariasi. Nilai *recovery* terbaik yang didapatkan adalah spesimen *brine solution* dengan *holding time* 10 menit dengan nilai *recovery* sebesar 36,67%.
2. Pengaruh *holding time* pada proses *solution treatment* menghasilkan butir struktur mikro yang lebih kecil pada *holding time* 30 menit sehingga didapatkan kekerasan maksimum. Serta, variasi media pendingin mempengaruhi pembentukan martensit pada paduan Cu-21Zn-5Al, dimana martensit terbentuk paling banyak pada spesimen dengan media pendingin *brine solution*.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah:

1. Menentukan komposisi paduan dengan teliti, karena perbedaan komposisi sedikit saja dapat mempengaruhi fasa serta sifat mekanik yang didapatkan.
2. Menggunakan media pendingin berbentuk cair supaya pada saat proses *quenching* permukaan spesimen tercelup merata.
3. Menggunakan *furnace* dengan temperatur yang stabil saat proses perlakuan panas.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- ___ . 1992. **ASM Handbook Volume 2 : Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.** ASM International Handbook Committee.
- ___ . 1992. **ASM Handbook Volume 3 : Alloy Phase Diagrams.** ASM International Handbook Committee.
- ___ . 1991. **ASM Handbook Volume 4 : Heat Treating.** ASM International Handbook Committee.
- ___ . 2004. **ASM Handbook Volume 9 : Metallography and Microstructure.** ASM International Handbook Committee.
- Aghinotri, Rajesh dan Sidharth Bhardwaj. 2016. "Synthesis and Characterization of CuZnAl Based Shape memory alloys and to Optimize Behavior on Different Properties by Varying Weight Percentage". **International Journal of Material Science and Engineering** Vol 4 Number 4. University Institute of Engineering and Technology, Kurukshetra University, Kurukshetra, India.
- Aldirmaz, E dkk. 2013. "SEM and X-Ray Diffraction Studies on Microstructures in Cu-26,04%Zn-4,01%Al Alloy". **ACTA PHYSICA POLONICA A** Vol. 124 No. 1.
- Aryawan, I Putu Yudi dkk. 2016. "Study Eksperimental Performa Pendingin Ice Bunker dengan Kombinasi Massa Dry Ice dan Ice". **Jurnal Ilmiah TEKNIK DESAIN MEKANIKA** Vol. 5 No. 3.
- Asanovic, Vanja, Kemal Delijic, dan Nada Jaukovic. December 2007. "A Study of Transformations of β -Phase in Cu-Zn-Al Shape memory alloys". **Scripta Materialia**, 58:599-601.
- Avner, S.H. 1974. **Introduction To Physical Metallurgy.** New York : McGraw-Hill Book Company.
- Bagherpour, M. 2017. "Effect of Severe Plastic Deformation on Shape Memory and Mechanical Properties of Nanostructured Cu-Zn-Al Alloy". **Journal of Nano and**

-
- Electronic Physics** Vol. 9 No 1, 01008 (6pp) Sumy State University.
- Callister, William D. 2013. **Material Science and Engineering An Introduction 9th Edition**. New York : JohnWiley & Sons, Inc.
- Collini, Luca. 2012. **Copper Alloys - Early Applications and Current Performance - Enhancing Processes**. Croatia : InTech.
- Dasgupta, Rupa, A. K. Jain, P. Kumar, S. Hussein, A. Pandey. July 2014. "Effect of Alloying Constituents on the Martensitic Phase Formation in Some Cu-Based SMAs". **Journal of Materials Research and Technology** 3:264-273.
- Dieter, G.E. 1987. **Metalurgi Mekanik**. Jakarta : Erlangga
- Gouda, El Said. 2014. "Classifications, Characterization and Applications of Metallic Alloys". **International Journal of Physics and Astronomy** June 2014, Vol. 2, No. 2, pp. 15-49.
- Groover, M. 2010. **Fundamental Of Modern Manufacture 4th Edition**. USA : JohnWiley & Sons, Inc.
- Kaufmann, E.N. 2003. **Characterization Of Materials: Volumes 1 and 2**. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Kumar, P.K. dan D.C. Lagoudas. 2008. "Shape memory alloys":. **Modeling and Engineering Applications**. Springer : US.
- Lai, M. O, Lu,L., dan Lee, W. H. 1996. "Influence of Heat Treatment on Properties of Copper-Based Shape Memory Alloy". **Journal of Materials Science** 31 1537-1543.
- Lobo, Paulo Silvia, J. Almeida, L. Guerreiro. 2015. **Shape Memory Alloys Behaviour: A Review**. Procedia Engineering, 114:776-783.
- Mark, Herman. s. 2005. **Encyclopedia Of Polymer Science Technology**. Amerika : John Wiley & Sons, Inc.
- Mukti, M Ginanjar Widodo, dkk. 2018. "Pengaruh Homogenizing Terhadap Kekerasan Komposit A356/Nano- Al_2O_3 ". **Jurnal STATOR** Volume 1, Nomor 1.
-

-
- Panjaitan, Elman, S.G. Sukarjo. 2016. “Pengaruh Waktu Penuaan Terhadap Sifat Superelastisitas Paduan Shape Memory Ti-50,85% at Ni”. **Pusat Penelitian dan Pengembangan Ilmu Pengetahuan Teknologi Bahan- BATAN 01:75 – 84.**
- Sadayappan, M. 2004. **Grain Refinement of Permanent Mold Cast Copper Base Alloys.** USA: Materials Technology Laboratory.
- Sari, Nasmi Herlina. 2018. **Material Teknik.** Yogyakarta : CV Budi Utama.
- Sawitri, Dyah dan Albaet Firdausi. 2013. **Perancangan Mekanik Mesin Poles Untuk Proses Metalografi Bahan Menggunakan Motor Listrik.** Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Singh, Rajender. 2006. **Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology.** New Delhi : New Age International (P) Limited, Publishers.
- Smith, F. William. 1995. **Material Science and Engineering. (Second Ed.).** New York: Mc Graw-Hill Inc.
- Stosic, Zoric, D. Manasijevic, L. Balanovic, T.H. Grguiric, U. Stamenkovic, M. Premovic, D. Minic, M. Gorgievski, R. Todorovic. 2017. “Effects of Composition and Thermal Treatment of Cu-Al-Zn Alloys with Low Content of Al on their Shape-Memory Properties”. **Materials Research 20:1425 – 1431.**
- Suhadi, Amin, Eka Febriyanti, Tri Handayani, dan Rini Riastuti. 2016. “Pengaruh Suhu dan Persentase Reduksi Terhadap Limit Drawing Ratio (LDR) pada Proses Metal Forming Paduan 70Cu-30Zn”. **Metalurgi, V 31.2.2016, E-ISSN 2443-3926/ 79-86.**
- Surdia, Tata dan Shinroku Saito. 1999. **Pengetahuan Bahan Teknik.** Bandung : Pradnya Paramita.
- Warren. 1969. **X-Ray Diffraction, 1st Ed.** Addition Wessly Pub, New York.
-

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. Komposisi Paduan Hasil Pengecoran

EI - 711		
Suhu : 24,9 C.		
Kelembaban : 49%.		
Berat : 25,4806 gram.		
Metode:		
1. Tanpa Standar		
2. Filter Al		
3. Medium Udara		
4. Waktu 60		
5. Energi 30 KV		
Hasil		
Compound	Conc	Unit
Al	5	0%
Ca	0,2	0%
Fe	0,36	0%
Co	0,009	0%
Ni	0,17	0%
Cu	71,05	0%
Zn	21	0%
Nb	0,1	0%
Pb	2	0%

2. Perhitungan Uji Kekerasan

Spesimen	Titik 1 (HV)	Titik 2 (HV)	Titik 3 (HV)	Rata-rata (HV)	STDEV
<i>As Cast</i>	136	136	131	134,3333	2,886751
B10	148	150	151	149,6667	1,527525
B30	175	175	175	175	0
B60	141	141	140	140,6667	0,57735
DI10	140	140	137	139	1,732051
DI30	140	140	141	140,3333	0,57735
DI60	146	146	144	145,3333	1,154701

3. PDF Card α brass

Name and formula

Reference code:	00-050-1333
Compound name:	Copper Zinc
Common name:	α -brass
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/cm ³):	8.44
Measured density (g/cm ³):	8.43
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	50.49
Z:	4.00
RIR:	-

Subfiles and quality

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

Comments

Creation Date: 10/16/1998
Modification Date: 1/12/2011
Analysis: Chemical analysis (wt.%): "Cu" 63.44, "Zn" 36.45. Sample Preparation: Commercially available "Cu64"-⁶⁴Zn36" was abraded to produce powder, then milled and annealed under nitrogen at 300 C for 2 hours. Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

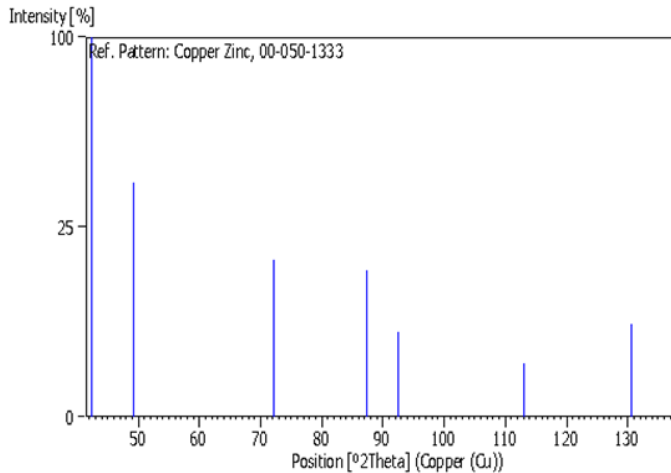
References

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

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	2.13370	42.325	100.0
2	2	0	0	1.84780	49.275	38.0
3	2	2	0	1.30670	72.243	17.0
4	3	1	1	1.11440	87.454	15.0
5	2	2	2	1.06700	92.428	5.0
6	4	0	0	0.92390	112.971	2.0
7	3	3	1	0.84800	130.563	6.0
8	4	2	0	0.82660	137.463	6.0

Stick Pattern



4. PDF Card Kode 00-002-1231 β brass**Name and formula**

Reference code:	00-002-1231
Mineral name:	Zhanghengite, syn
Compound name:	Copper Zinc
Common name:	β -brass
Empirical formula:	CuZn
Chemical formula:	CuZn

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Pm-3m
Space group number:	221
a (Å):	2.9480
b (Å):	2.9480
c (Å):	2.9480
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000

Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	25.62
Z:	1.00

RIR: -

Subfiles and quality

Subfiles:	Alloy, metal or intermetallic Common Phase Inorganic Mineral
Quality:	Indexed (I)

Comments

Color:	Yellow
Creation Date:	1/1/1970
Modification Date:	1/11/2011
Additional Patterns:	See PDF 00-008-0349
Analysis:	Analysis (wt.%): Cu 51.0, Zn 49.0. Color: Yellow. General Comments: D-values corrected for absorption. \hat{a} phase, ordered (P1). Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

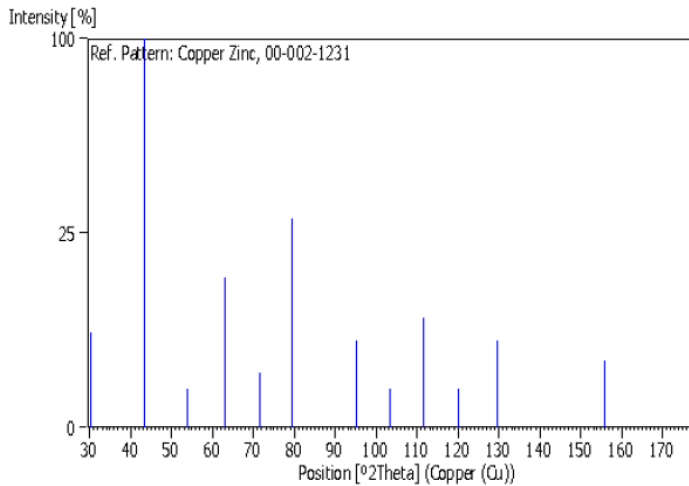
References

Primary reference:	Nowotny, Winkels., <i>Z. Phys.</i> , 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



5. PDF Card Kode 01-074-5803 γ brass**Name and formula**

Reference code: 01-074-5803
 Compound 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): 8.8400
 b (Å): 8.8400
 c (Å): 8.8400
 Alpha (°): 90.0000
 Beta (°): 90.0000
 Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 690.81
 Z: 4.00

RIR: 7.08

Status, subfiles and quality

Status: Alternate Pattern
 Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
 Common Phase
 ICSD Pattern
 Inorganic
 Quality: Indexed (I)

Comments

ANX: N508
 Creation Date: 11/19/2008
 Modification Date: 1/19/2011
 ANX: N508
 Analysis: Cu_5Zn_8
 Formula from original source: Cu_5Zn_8
 ICSD Collection Code: 108419
 Calculated Pattern Original Remarks: Annealed at 523-573 K
 Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension. No R factors reported/abstracted
 Wyckoff Sequence: g e c2(14-3M)

Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

References

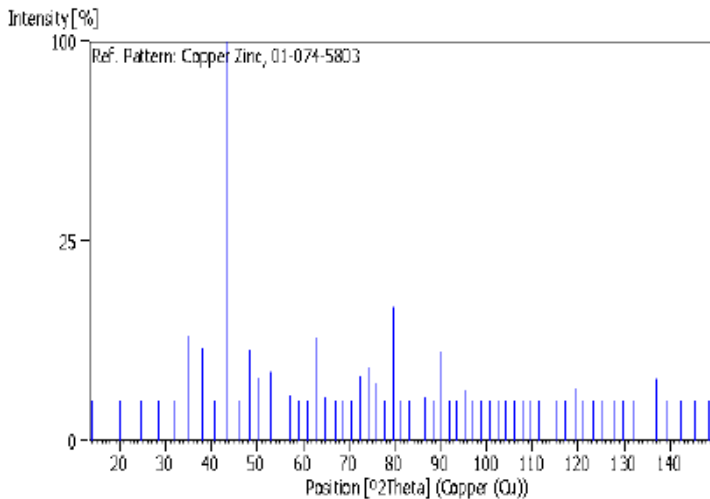
Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*
 Structure: Bradley, A.J., Gregory, C.H., *Philos. Mag.*, **12**, 143, (1931)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	6.25080	14.157	0.5
2	2	0	0	4.42000	20.073	0.1
3	2	1	1	3.60890	24.649	0.7
4	2	2	0	3.12840	28.537	0.4
5	3	1	0	2.79540	31.991	0.1
6	2	2	2	2.55190	35.138	6.8
7	3	2	1	2.36260	38.057	5.4
8	4	0	0	2.21000	40.798	0.1
9	3	3	0	2.08360	43.394	100.0
10	4	2	0	1.97670	45.870	1.0
11	3	3	2	1.88470	48.248	5.1
12	4	2	2	1.80450	50.539	2.5
13	5	1	0	1.73370	52.758	3.0
14	5	2	1	1.61400	57.013	1.3
15	4	4	0	1.56270	59.067	0.4
16	4	3	3	1.51600	61.076	0.4
17	6	0	0	1.47330	63.046	6.7
18	6	1	1	1.43400	64.982	1.2
19	6	2	0	1.39770	66.888	0.1
20	5	4	1	1.36400	68.768	0.1
21	6	2	2	1.33270	70.620	0.2
22	6	3	1	1.30340	72.455	2.6
23	4	4	4	1.27590	74.275	3.3
24	5	5	0	1.25020	76.070	2.1
25	6	4	0	1.22590	77.858	0.6
26	6	3	3	1.20300	79.631	11.1
27	6	4	2	1.18130	81.397	0.7
28	7	3	0	1.16080	83.149	0.2
29	7	3	2	1.12270	86.647	1.2
30	8	0	0	1.10500	88.390	0.1
31	7	4	1	1.08810	90.134	5.0
32	8	2	0	1.07200	91.872	0.6
33	6	5	3	1.05660	93.611	0.4
34	6	6	0	1.04180	95.360	1.6
35	8	3	1	1.02760	97.113	0.4
36	6	6	2	1.01400	98.869	0.9
37	7	5	2	1.00090	100.637	0.5
38	8	4	0	0.98830	102.415	0.1
39	8	3	3	0.97620	104.199	0.5
40	8	4	2	0.96450	106.003	0.1
41	9	2	1	0.95320	107.825	0.3
42	6	6	4	0.94230	109.664	0.1
43	9	3	0	0.93180	111.518	0.9
44	9	3	2	0.91180	113.304	0.3
45	8	4	4	0.90220	117.255	0.1
46	8	5	3	0.89300	119.219	1.7

47	8	6	0	0.88400	121.239	0.3
48	10	1	1	0.87530	123.295	0.9
49	10	2	0	0.86680	125.413	0.4
50	9	4	3	0.85860	127.574	0.2
51	10	2	2	0.85060	129.807	0.8
52	9	5	2	0.84290	132.091	0.5
53	8	7	1	0.82790	137.003	2.4
54	8	6	4	0.82080	139.594	0.1
55	9	6	1	0.81380	142.364	0.4
56	10	4	2	0.80700	145.308	0.8
57	9	5	4	0.80030	148.525	0.3










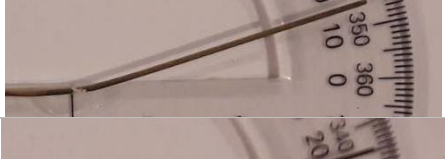

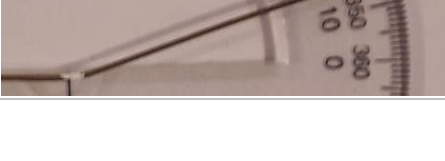
Stick Pattern

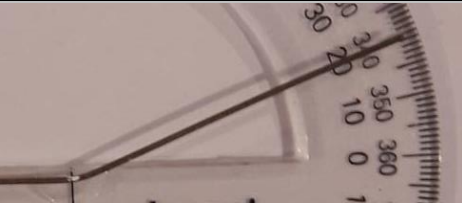



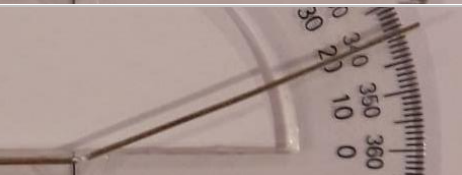

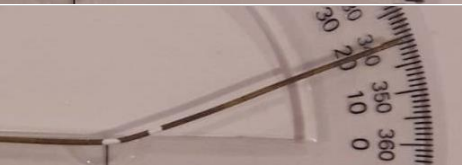

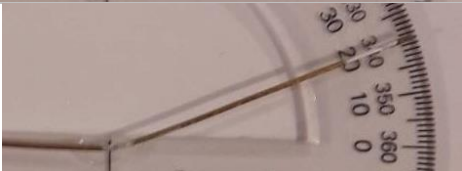





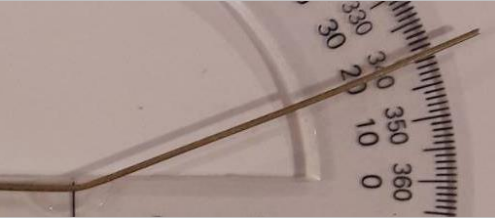
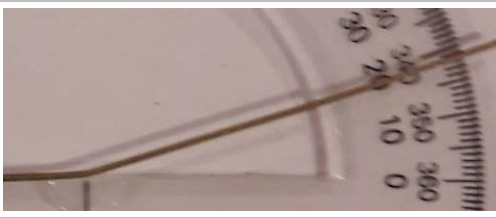
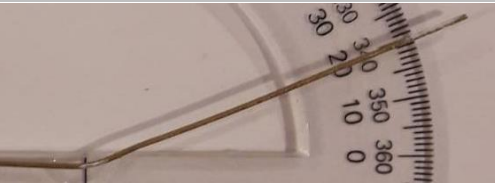
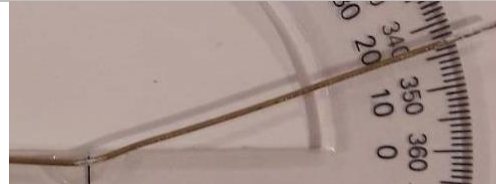





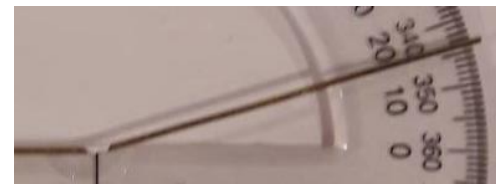


6. Perhitungan Uji Efek *Shape Memory*

Spesimen	Spesimen 1 (%)	Spesimen 2 (%)	Spesimen 3 (%)	Rata- rata (%)	STDEV
B10	50	35	25	36,67	12,58
B30	15	25	25	21,67	5,77
B60	25	25	25	25	0
DI10	10	15	25	16,67	7,64
DI30	5	15	20	13,33	7,64
DI60	20	20	20	20	0

7. Hasil Pengujian Efek Shape Memory

Spesimen	Sudut		Gambar		Recovery (%)	Rata-Rata Recovery (%)
	θ_0 (°)	θ_t (°)	Sebelum	Sesudah		
B10	20	15			25	36,67 ± 12,58
	20	13			35	
	20	10			50	
B30	20	17			15	21,67 ± 5,77
	20	15			25	
	20	15			25	

B60	20	15			25	25 ± 0
	20	15			25	
	20	15			25	
DI10	20	18			10	16,67 ± 7,64
	20	17			15	
	20	15			25	

DI30	20	19			5	13,33 ± 7,64
	20	17			15	
	20	16			20	
DI60	20	16			20	20 ± 0
	20	16			20	
	20	16			20	

LAMPIRAN

8. Perhitungan *Yield Stress*

Dengan menggunakan persamaan 2.3 maka nilai *yield stress* yang didapat sebagai berikut:

- Spesimen As Cast

$$\sigma_y = \frac{1}{3} (134,33) (0,1)^{2,5-2}$$

$$\sigma_y = 14,156 \left(\frac{\text{in. kgf}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$\sigma_y = 138,822 \text{ MPa}$$

- Spesimen B10

$$\sigma_y = \frac{1}{3} (149,67) (0,1)^{2,5-2}$$

$$\sigma_y = 15,776 \left(\frac{\text{in. kgf}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$\sigma_y = 154,709 \text{ MPa}$$

- Spesimen B30

$$\sigma_y = \frac{1}{3} (175) (0,1)^{2,5-2}$$

$$\sigma_y = 18,446 \left(\frac{\text{in. kgf}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$\sigma_y = 180,893 \text{ MPa}$$

- Spesimen B60

$$\sigma_y = \frac{1}{3} (140,67) (0,1)^{2,5-2}$$

$$\sigma_y = 14,827 \left(\frac{\text{in. kgf}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$\sigma_y = 145,403 \text{ MPa}$$

- Spesimen DI10

$$\sigma_y = \frac{1}{3} (139) (0,1)^{2,5-2}$$

$$\sigma_y = 14,651 \left(\frac{\text{in. kgf}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$\sigma_y = 143,677 \text{ MPa}$$

- Spesimen DI30

$$\sigma_y = \frac{1}{3} (146,67) (0,1)^{2,5-2}$$

$$\sigma_y = 15,460 \left(\frac{\text{in. kgf}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$\sigma_y = 151,610 \text{ MPa}$$

- Spesimen DI60

$$\sigma_y = \frac{1}{3} (145,33) (0,1)^{2,5-2}$$

$$\sigma_y = 15,319 \left(\frac{\text{in. kgf}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$\sigma_y = 150,228 \text{ MPa}$$

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam mengerjakan laporan penelitian tugas akhir ini, penulis juga mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung dan membantu. Diantaranya:

1. Kedua orang tua dan adik penulis yang selalu mendoakan, memberikan motivasi dan semangat selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Monica Gayatri dan Arfani Rizki selaku *partner* Tugas Akhir penulis yang berjuang bersama dalam suka dan duka penelitian ini.
3. Salsabila Firdausi, sahabat yang selalu ada saat penulis dalam keadaan apapun baik susah maupun senang, yang selalu memberi motivasi penulis untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir ini, yang selalu mendoakan untuk kesuksesan bersama.
4. Rosa Dewi Fitriana dan Nadya Putri Yahya, sahabat penulis yang selalu ada ketika penulis berkeluh kesah, yang selalu memberi semangat dan motivasi untuk kehidupan penulis.
5. Mas Abrar dan Mas Garias selaku kakak tingkat yang selalu membantu dan membimbing penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
6. Eka dan Handis *partner shape memory alloys* yang selalu membantu dan memberi semangat serta motivasi. Semangat ya buat kalian melanjutkan keriwahan *shape memory alloys* ini.
7. Nadlifa, Putri, Aliyah selaku sahabat W9 yang selalu memotivasi penulis serta tempat berkeluh kesah selama ini.
8. Keluarga besar ciwi MT18 yang selalu meramaikan kehidupan perkuliahan penulis.
9. Keluarga besar MT18 yang tidak henti-hentinya memberikan semangat dan hiburan kepada penulis serta

menjadi tempat kembali dan rumah yang nyaman untuk penulis.

10. Yusuf dan Favian selaku *partner* Dagri BEM FTI 18/19 yang telah memberikan pengalaman serta cerita suka duka dalam kehidupan berorganisasi.
11. Kabinet Interaksi yang telah mewarnai kehidupan kampus penulis dengan perjuangan dalam kehidupan berorganisasi di fakultas.
12. Keluarga besar BEM FTI 17/18, 18/19 yang menjadi tempat untuk berkembang di kampus serta memberikan pengalaman dan pembelajaran.
13. DAGRI DABEST dan DAMRI yang selalu menemani, memberikan warna, dan memberikan banyak pengalaman selama tahun kedua dan ketiga berkuliah.
14. MT16, MT17, MT19, MT20 yang banyak memberikan pengalaman, pembelajaran, dan kenangan yang berharga selama penulis berkuliah.
15. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.
16. Terakhir terima kasih kepada Luckyta Rizkivany, diri saya sendiri yang telah kuat menjalani segala perhelatan Tugas Akhir dari awal hingga sampai pada titik ini. Sesungguhnya usaha tidak akan mengkhianati hasil.

Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semua yang membutuhkan.

Surabaya, 10 Januari 2020
Penulis

Luckyta Rizkivany

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Gresik 2 November 1997 sebagai anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh Pendidikan formal dimulai dari SD Muhammadiyah GKB Gresik tahun 2004 – 2010. Dilanjutkan di SMP Negeri 1 Gresik tahun 2010 – 2013. Kemudian dilanjutkan di SMA Negeri 1 Gresik pada tahun 2013 – 2016. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan Pendidikan S-1 di Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama berkuliah di Departemen Teknik Material, penulis pernah mengikuti kegiatan pelatihan LKMM Pra TD, LKMW TD, BMS, LKMM TD, dan LOT BEM FTI. Penulis juga aktif dalam kegiatan berorganisasi di Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM FTI-ITS) sebagai staff pada kepengurusan 2017/2018 dan sebagai Kabiro Kemahasiswaan pada kepengurusan 2018/2019. Selain aktif di organisasi tingkat fakultas, penulis juga aktif mengikuti kepanitiaan di tingkat institut seperti GERIGI 2017 dan GERIGI 2018. Dalam bidang akademik penulis tercatat sebagai Asisten Laboratorium Kimia Material pada tahun 2017 dan 2018, serta Grader Teknologi Pengecoran tahun 2019. Untuk menyelesaikan Pendidikan S1, penulis melakukan penelitian dalam bidang studi Metalurgi Manufaktur (Pengecoran dan Perlakuan Panas) dengan tugas akhir berjudul “Pengaruh *Holding Time* Proses *Solution Treatment* dan Variasi Media Pendingin pada Cu-21Zn-5Al *Shape memory alloys* Terhadap Efek *Shape Memory* Dan Struktur Mikro” Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: luckytarizkivany@gmail.com, No. HP : 081230677775