



**TUGAS AKHIR –TL 184834**

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR SOLUTION TREATMENT  
DAN MEDIA PENDINGIN PADA PROSES HEAT TREATMENT  
Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOY TERHADAP EFEK SHAPE  
MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO**

**MONICA GAYATRI K.  
NRP. 0251164000080**

**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 VARIASI TEMPERATUR SOLUTION  
TREATMENT DAN MEDIA PENDINGIN PADA PROSES  
HEAT TREATMENT Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOY  
TERHADAP EFEK SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR  
MIKRO**

MONICA GAYATRI K.  
NRP. 0251164000080

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 SOLUTION TREATMENT  
TEMPERATURE AND QUENCHING MEDIA VARIATION  
IN HEAT TREATMENT PROCESS Cu–Zn–Al SHAPE  
MEMORY ALLOYS ON SHAPE MEMORY EFFECT AND  
MICROSTRUCTURES**

MONICA GAYATRI K.  
NRP. 0251164000080

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

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

*(This page is intentionally left blank)*

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR SOLUTION  
TREATMENT DAN MEDIA PENDINGIN PADA PROSES  
HEAT TREATMENT Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOY  
TERHADAP EFEK SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR  
MIKRO**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

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

Oleh:

**MONICA GAYATRI K.**  
NRP. 0251164000080

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR SOLUTION  
TREATMENT DAN MEDIA PENDINGIN PADA PROSES  
HEAT TREATMENT Cu-Zn-Al SHAPE MEMORY ALLOY  
TERHADAP EFEK SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR  
MIKRO**

**Nama** : Monica Gayatri K.  
**NRP** : 02511640000080  
**Departemen** : Teknik Material dan Metalurgi  
**Dosen Pembimbing I** : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc  
**Dosen Pembimbing II** : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

**Abstrak**

*Shape memory alloys (SMA) adalah logam paduan yang memiliki kemampuan reversible setelah dideformasi pada temperatur tertentu (disebut sebagai Efek Shape Memory, SME,). SMA seperti paduan Ni-Ti dan Cu-Zn-Al dapat diaplikasikan pada bidang kesehatan, dll. Namun, SMA yang lebih sering digunakan ialah Ni-Ti karena memiliki sifat SME yang lebih baik dari Cu-Zn-Al tetapi memiliki harga jual yang mahal. Namun sifat SME paduan Cu-Zn-Al masih dapat dikembangkan menjadi lebih baik. SME sangat dipengaruhi oleh keberadaan fasa martensit pada struktur mikronya. Untuk mendapatkan fasa martensit dan meningkatkan SME pada paduan Cu-21Zn-5Al diberikan proses perlakuan panas homogenizing, annealing, solution treatment dan di-quenched dengan media pendingin (brine solution dan dry ice). Paduan yang telah dilakukan perlakuan panas kemudian dilakukan uji kekerasan, X-Ray Difrraction, metalografi, SME, dan Differential Scanning Calorimetry untuk mengetahui SME dan struktur mikro Cu-21 Zn-5 Al. Dari hasil pengujian, didapatkan bahwa spesimen yang memiliki nilai SME tertinggi pada spesimen dengan solution treatment temperatur 850°C dan media pendingin brine solution, yaitu 36,67%. Selain itu, pada semua spesimen variasi media pendingin terdapat fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , (martensit) dan  $\gamma$ .*

**Kata Kunci:** *Shape memory alloy, Paduan Cu-Zn-Al, Perlakuan Panas.*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**THE EFFECT OF SOLUTION TREATMENT  
TEMPERATURE AND QUENCHING MEDIA VARIATION  
IN HEAT TREATMENT PROCESS Cu–Zn–Al SHAPE  
MEMORY ALLOYS ON SHAPE MEMORY EFFECT AND  
MICROSTRUCTURES**

**Student Name** : Monica Gayatri K.  
**NRP** : 0251164000080  
**Department** : Material Engineering  
**Supervisor** : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc  
**Co-supervisor** : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

**Abstract**

*Shape memory alloys (SMA) are metal alloys that have a reversible ability at a certain temperature after being deformed (referred to as the Shape Memory Effect, SME,). Shape memory alloys like Ni-Ti and Cu-Zn-Al can be applied to medical tools, automotives, etc. However, the most useable SMA is Ni-Ti because Ni-Ti has better SME than Cu-Zn-Al alloy but the price is quite expensive. Therefore, the SME in Cu-Zn-Al needed to be developed. The SME influenced by the existance of martensite phase in microstructure. To obtain the martensitic phase and good ductility of Cu-21 Zn-5 Al, the alloy will undergo several heat treatmeant process such as homogenizing, annealing, and solution treatment with several cooling media (brine solution and dry ice). Then, on the specimen undergo several testing such as hardness test, X-Ray Diffraction (XRD), metallography, shape memory effect, and Differential Scanning Calorimetry (DSC) to find out the shape memory effect and microstructure of Cu-21 Zn-5 Al. As the result, specimen with the highest SME is specimen with solution treatment at 850°C and quenched with brine solution which is 36,67%. Futhermore, the microstructure on each specimen contain several phase which isa,  $\beta$ ,  $\beta'$  (martensite) and  $\gamma$ .*

**Keywords:** *Shape memory alloy, Cu-Zn-Al Alloy, Heat Treatment*

*(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 Variasi Temperatur Solution treatment dan Media Pendinginan pada Proses Heat Treatment Cu-Zn-Al Shape Memory Alloy 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:

1. Kedua orang tua, adik, dan keluarga besar penulis yang selalu memberikan doa, motivasi, dukungan dan kasih sayang.
2. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc dan Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 1 dan 2.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material FTI ITS
4. Bapak Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T. selaku Dosen Wali
5. Pak Anto, Pak Tari, Pak Chanan dan seluruh Dosen Karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang telah membantu pengerjaan secara teknis dan non-teknis dalam proses penelitian.

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

Surabaya, 10 Januari 2020

Penulis

Monica Gayatri K.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 <i>Shape Memory alloys</i> .....	5
2.1.1 Fenomena Transformasi Fasa pada <i>Shape Memory</i> .....	5
2.1.2 Paduan <i>Shape memory alloys</i> .....	9
2.2 Diagram Fasa Terner Cu-21 Zn-5 Al.....	11
2.3 Perlakuan Panas .....	17
2.3.1 <i>Homogenizing</i> .....	18
2.3.2 <i>Annealing</i> .....	18
2.3.3 <i>Solution treatment</i> .....	18
2.3.4 <i>Quenching</i> .....	20
2.4 Resilien .....	22
2.5 Pengujian .....	24
2.5.1 Pengujian <i>X-ray Diffraction (XRD)</i> .....	24
2.5.2 Pengujian Metalografi .....	24
2.5.3 Pengujian Kekerasan Vickers.....	25
2.5.4 Pengujian <i>Shape Memory Effect</i> .....	26
2.5.5 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimeter (DSC)</i> .....	27

2.6	Penelitian Sebelumnya.....	28
<b>BAB III</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>35</b>
3.1	Diagram Alir .....	35
3.2	Bahan .....	37
3.3	Alat.....	38
3.4	Variabel Penelitian.....	41
3.5	Prosedur Penelitian .....	42
3.5.1	Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Homogenizing</i> .....	42
3.5.2	Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Annealing</i> .....	42
3.5.3	Prosedur Proses Perlakuan Panas <i>Solution treatment</i> .....	43
3.6	Proses Pengujian .....	43
3.6.1	Pengujian Kekerasan Vickers.....	43
3.6.2	Pengujian XRD.....	44
3.6.3	Pengujian Metalografi .....	44
3.6.4	Pengujian <i>Shape memory effect</i> .....	44
3.6.5	Pengujian DSC .....	44
3.7	Rancangan Penelitian.....	44
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>47</b>
4.1	Logam Paduan dan Hasil Proses <i>Machining</i> Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> .....	47
4.2	Hasil Pengujian Kekerasan Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> .....	49
4.3	Hasil Pengujian XRD Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape</i> <i>memory alloys</i> .....	51
4.4	Hasil Pengujian Metalografi Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> .....	54
4.5	Hasil Pengujian Efek <i>Shape Memory</i> Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape Memory Alloys</i> .....	64
4.6	Hasil Pengujian DSC Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape</i> <i>memory alloys</i> .....	67
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>71</b>
5.1	Kesimpulan .....	71

5.2	Saran .....	71
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	<b>73</b>
<b>LAMPIRAN</b>	.....	<b>77</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b>	.....	<b>89</b>
<b>BIODATA PENULIS</b>	.....	<b>91</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Transformasi Fasa pada Paduan <i>Shape memory</i> : (a) <i>Forward transformation</i> dan (b) <i>Reverse transformation</i> .....	7
<b>Gambar 2.2</b>	Skema Proses <i>Detwinning</i> Martensit .....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Skema tekanan-regangan-suhu menunjukkan <i>shape memory effect</i> untuk SMA NiTi.....	8
<b>Gambar 2.4</b>	Jenis Reaksi pada Diagram Fasa.....	14
<b>Gambar 2.5</b>	Diagram Fasa <i>Ternary</i> .....	15
<b>Gambar 2.6</b>	Diagram Fasa <i>Ternary</i> Cu-21 Zn-5 Al pada Temperatur 550°C .....	16
<b>Gambar 2.7</b>	Diagram Fasa <i>Ternary</i> Cu-21 Zn-5 Al pada Temperatur 700°C .....	17
<b>Gambar 2.8</b>	Diagram Fasa Paduan A dan B .....	20
<b>Gambar 2.9</b>	Tahapan Proses <i>Quenching</i> .....	21
<b>Gambar 2.10</b>	Kurva Media Pendinginan .....	22
<b>Gambar 2.11</b>	Arah Cahaya pada Pengujian Metalografi .....	25
<b>Gambar 2.12</b>	Indentor Vickers Hardness Test.....	26
<b>Gambar 2.13</b>	Pola XRD Sampel A1 .....	29
<b>Gambar 2.14</b>	Hasil Metalografi dan SEM-EDX dari sampel A1 (kiri), sampel A2 (tengah), dan sampel A3 (kanan).....	31
<b>Gambar 2.15</b>	Pengujian DSC pada Paduan Cu-25%Zn-4%Al .....	32
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir.....	35
<b>Gambar 3.2</b>	Logam Paduan Cu-21 Zn-5 Al .....	37
<b>Gambar 3.3</b>	Alat Uji Kekerasan .....	39
<b>Gambar 3.4</b>	Mikroskop Optik.....	39
<b>Gambar 3.5</b>	<i>High Temperatur Furnace</i> .....	40
<b>Gambar 3.6</b>	Alat Uji XRD.....	41
<b>Gambar 3.7</b>	Kurva Perlakuan Panas Penelitian .....	42

<b>Gambar 4.1</b>	Spesimen Cu-Zn- Al <i>Shape memory alloys</i> (a) Sebelum Proses <i>Machining</i> ; (b) Setelah Proses <i>Machining</i> .....	48
<b>Gambar 4.2</b>	Grafik nilai kekerasan spesimen Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> . ....	49
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik Hasil Pengujian XRD Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> pada spesimen dengan media pendinginan <i>dry ice</i> .....	52
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik Hasil Pengujian XRD Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> pada spesimen dengan media pendinginan <i>dry ice</i> .....	52
<b>Gambar 4.5</b>	Hasil Pengujian Metalografi Spesimen AC Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> Perbesaran 100x.....	55
<b>Gambar 4.6</b>	Hasil Pengujian Metalografi Spesimen H850 Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> Perbesaran 100x.....	57
<b>Gambar 4.7</b>	Hasil Pengujian Metalografi Spesimen AM Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> Perbesaran 100x.....	58
<b>Gambar 4.8</b>	Hasil Pengujian Metalografi Spesimen A550 Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> Perbesaran 100x.....	59
<b>Gambar 4.9</b>	Hasil Pengujian Metalografi Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> Perbesaran 100x pada Spesimen: (a) 750-BC; (b) 850-BC; dan (c) 900-BC.....	61
<b>Gambar 4.10</b>	Hasil Pengujian Metalografi Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> Perbesaran 100x pada Spesimen: (a) 750-DC; (b) 850-DC; dan (c) 900-DC. ....	62
<b>Gambar 4.11</b>	Spesimen Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory Alloys</i> Sebelum <i>Recovery Shape</i> (a) dan Sesudah <i>Recovery Shape</i> (b).....	66

**Gambar 4.12** Grafik Hasil Pengujian DSC Cu-21 Zn-5 Al  
*Shape memory alloys*.....68

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Sifat Paduan Cu-21 Zn-5 Al .....	10
<b>Tabel 2.2</b>	Data dasar tembaga, seng, dan aluminium.....	11
<b>Tabel 2.3</b>	Nilai Modulus Resilien Beberapa Material.....	23
<b>Tabel 2.4</b>	Komposisi 3 Sampel PaduanCu-21Zn-5Al.....	28
<b>Tabel 2.5</b>	Nilai Kekerasan Vickers Sampel Paduan Cu-21 Zn-5 Al.....	29
<b>Tabel 3.1</b>	Rancangan Penelitian.....	45
<b>Tabel 4.1</b>	Tabel Komposisi Standar dan Paduan Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> .....	47
<b>Tabel 4.2</b>	Hasil Analisis Perbandingan Jumlah Fasa $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ dan $\beta'$ Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape memory alloys</i> .....	55
<b>Tabel 4.3</b>	Hasil Pengujian Efek <i>Shape memory</i> pada Cu- 21 Zn5 Al <i>Shape memory Alloys</i> .....	65
<b>Tabel 4.4</b>	Temperatur Transformasi Cu-21 Zn-5 Al <i>Shape Memory Alloy</i> .....	67

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Shape Memory Alloy* (SMA) merupakan material cerdas yang memiliki kemampuan untuk mengingat bentuk sebagai respon dari panas, medan magnet atau gelombang elektromagnetik yang disebut dengan *Shape memory effect*. Dengan sifat yang unik tersebut, SMA banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang seperti alat aktuator pada bidang otomotif dan alat filter pembekuan darah pada bidang medis. Kedua alat tersebut memanfaatkan kemampuan *shape memory effect* yang dapat mengingat dan memulihkan bentuk kembali pada bentuk aslinya setelah diubah sebagai respon atas perubahan temperatur di lingkungan sekitar. Penyebab kemampuan *Shape memory effect* tersebut berkaitan erat dengan struktur mikro dari paduan berupa transisi fasa martensit ke austenit yang melibatkan perubahan struktur kristal paduan. Pada kondisi suhu kamar *shape memory alloy* berada dalam fasa martensit dan mudah mengalami deformasi (perubahan bentuk). Material tersebut dapat kembali ke bentuk semula dengan memberikan stimulus termal sehingga kembali berubah dari fasa martensit ke austenit, kemudian berubah kembali dari austenit menjadi martensit ketika dilakukan proses pendinginan.

Pada umumnya, *shape memory alloy* yang sering digunakan ialah paduan *shape memory* berbasis Ni-Ti. Paduan Ni-Ti memiliki regangan atau efek *shape memory* lebih baik (diatas 8%). Namun paduan Ni-Ti, memiliki harga dagang yang cukup mahal. Salah satu alternatif pengganti paduan Ni-Ti sebagai *shape memory alloy* ialah paduan berbasis Cu, khususnya paduan Cu-Zn-Al, yang memiliki harga dagang relatif lebih rendah. Tetapi bila dibandingkan dengan Ni-Ti, paduan Cu-Zn-Al memiliki regangan atau efek *shape memory* lebih kecil hanya 4-5% saja (Huang, 1998).

Salah satu upaya peningkatan efek *shape memory* pada paduan Cu-Zn-Al dengan diberi perlakuan panas dan mempercepat

kurva pendinginan untuk meningkatkan kadar martensit. Perlakuan panas yang diberikan berdasarkan diagram fasa terner Cu-Zn-Al dan tujuan perlakuan panas yang akan dituju seperti homogenisasi, *annealing*, dan *solution treatment*. Percepatan kurva pendinginan dapat dilakukan dengan media pendingin yang tepat. Untuk itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas dengan variasi media pendingin terhadap efek *shape memory* dan struktur mikro pada *shape memory alloys* Cu-Zn-Al.

### 1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur *solution treatment* dan media pendingin pada proses perlakuan panas terhadap *shape memory effect* pada paduan logam Cu-Zn-Al?
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur *solution treatment* dan media pendingin pada proses perlakuan panas terhadap struktur mikro pada paduan logam Cu-Zn-Al?

### 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Distribusi paduan pada spesimen dianggap homogen.
2. Waktu pengeluaran spesimen dari *furnace* saat perlakuan panas dianggap sama.
3. Pengaruh lingkungan terhadap spesimen saat perlakuan panas diabaikan.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian pada penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi temperatur *solution treatment* dan media pendingin saat proses perlakuan panas terhadap *shape memory effect* pada paduan logam Cu-Zn-Al.
2. Menganalisis pengaruh variasi temperatur *solution treatment* dan media pendingin saat proses perlakuan panas terhadap struktur mikro pada paduan logam Cu-Zn-Al.

---

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Dengan adanya penelitian perihal paduan *shape memory* ini, diharapkan tulisan ini dapat bermanfaat sebagai literatur maupun pengembangan penelitian lainnya pada keilmuan teknik material dan metalurgi.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 *Shape Memory alloys***

*Shape Memory Alloy* (SMA) merupakan paduan yang memiliki kemampuan mengingat dan memulihkan bentuk kembali pada bentuk aslinya setelah diubah dengan dipanaskan pada suhu transformasi. Secara umum, paduan ini dapat terdeformasi plastis pada suhu yang relatif rendah, dan setelah terpapar pada suhu yang lebih tinggi akan kembali ke bentuknya sebelum deformasi. Kemampuan unik ini untuk kembali ke geometri asli setelah deformasi inelastis yang besar (hampir 10%) dikenal sebagai *Shape Memory Effect* (SME). SME memiliki dua jenis tipe mengingat bentuk, yaitu *one way shape memory* dan *two way shape memory*. *One way shape memory* merupakan efek mengingat kembali ke bentuk asli yang terjadi ketika paduan dipanaskan tetapi ketika didinginkan paduan tidak berubah bentuk makroskopis. *Two way shape memory* merupakan paduan dengan efek mengingat kembali yang terjadi pada saat pemanasan dan pendinginan kembali.

Terdapat beberapa logam yang menunjukkan efek *shape memory* yang baik dan sering digunakan adalah logam paduan Nikel-Titanium (Ni-Ti) dan logam paduan Tembaga (Cu) dengan paduan lain seperti Tembaga-Aluminium-Nikel (Cu-Al-Ni) dan Tembaga-Seng-Nikel (Cu-21 Zn-5 Al). *Shape memory alloys* dapat diaplikasikan dalam beberapa aplikasi, seperti untuk filter pembekuan darah, bio material, sebagai aktuator konvensional seperti sistem hidrolis untuk automotif, pesawat luar angkasa, bahkan digunakan dalam industri minyak (ASM International, 1990).

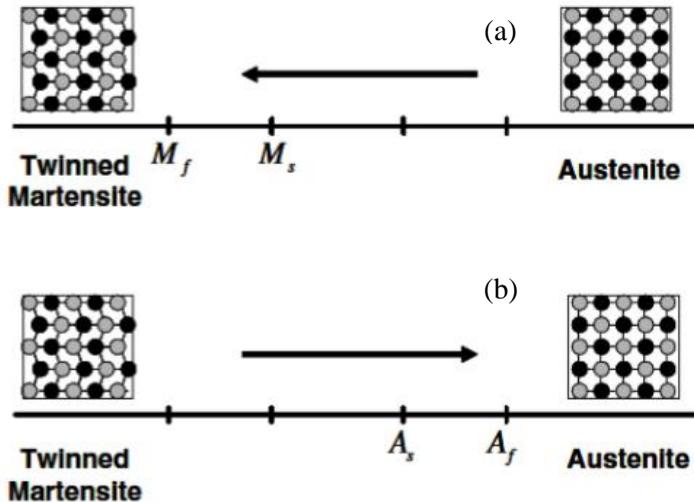
##### **2.1.1 Fenomena Transformasi Fasa pada *Shape Memory***

*Shape memory alloys* memiliki *shape memory effect* yang dapat diketahui melalui perubahan fasa yang terjadi pada paduannya. *Shape memory alloys* memiliki dua fasa, dimana setiap fasanya memiliki struktur kristal dan sifat yang berbeda, yaitu pada

temperatur tinggi yang disebut austenit (A) dan pada temperatur rendah yang disebut martensit (M). Paduan *shape memory* yang belum menerima tegangan mempunyai 4 temperatur transisi, yakni :  $M_f$ ,  $M_s$ ,  $A_s$ , dan  $A_f$  dari temperatur rendah hingga temperatur tinggi. M merupakan fasa martensit sedangkan A merupakan fasa austenit. F dan S merupakan *finish* dan *start* dari temperatur proses transformasi. Ketika temperatur T lebih rendah dibanding  $M_f$ , maka fasa martensit akan stabil. Ketika temperatur lebih tinggi dibanding  $A_f$ , maka fasa austenit akan stabil. Ketika temperatur berada pada rentang  $M_s$  dan  $A_s$ , maka kedua fasa ini akan stabil (Lobo, 2015).

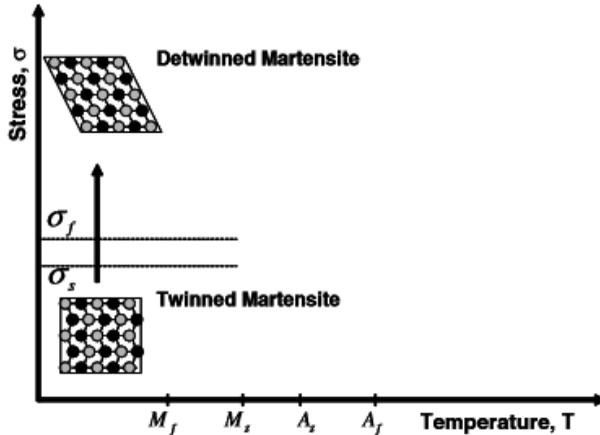
Austenit memiliki struktur kristal *cubic* dan martensit memiliki struktur kristal tetragonal, *orthorombic* atau *monoclinic*. Pada *shape memory alloy* austenit disebut sebagai fasa induk dengan sifat yang lebih keras daripada martensitnya. Sedangkan, martensitnya memiliki 2 susunan kisi yaitu *twinned martensite* ( $M_T$ ) berupa kisi multi varian dan *detwinned martensite* ( $M_D$ ) berupa kisi *single* varian. Kedua fasa tersebut berperan penting pada *shape memory effect* paduan Cu-21 Zn-5 Al dalam transformasi fasa. Terjadi 2 proses transformasi fasa, skema dapat dilihat pada Gambar 2.1, yaitu:

1. *Forward transformation* merupakan proses perubahan fasa dari austenit ke *twinned martensite*. Transformasi terjadi saat pendinginan dari  $T_{M_s}$  ke  $T_{M_f}$  dan tidak terdapat pembebanan mekanik sehingga transformasi tidak merubah bentuk paduan secara makroskopik.
2. *Reverse transformation* merupakan proses perubahan fasa dari *detwinned martensite* ke austenit. Transformasi terjadi saat pemanasan dari  $T_{A_s}$  ke  $T_{A_f}$  dan terdapat pembebanan mekanik sehingga transformasi merubah bentuk paduan secara makroskopik.

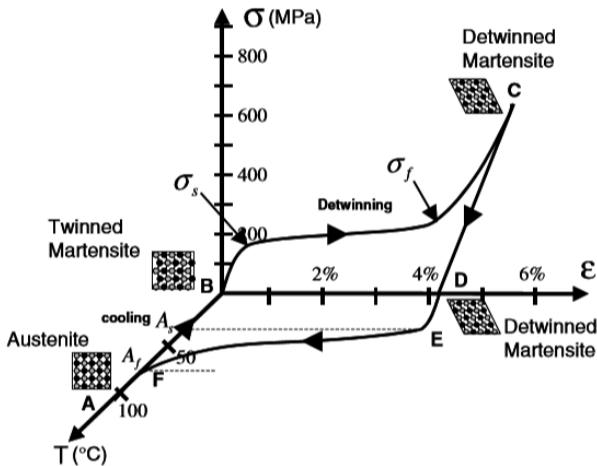


**Gambar 2. 1** Transformasi fasa pada paduan *shape memory* : (a) *Forward transformation* dan (b) *Reverse transformation* (Kumar, 2008).

Selain terjadi transformasi dari austenit ke martensit, pada *shape memory alloy* juga terjadi perubahan *detwinned martensite* ke *twinned martensite* yang disebut dengan proses *detwinning*. Perubahan terjadi akibat pembebanan dari luar sehingga terjadi deformasi kisi yang dapat terlihat secara makroskopik seperti Gambar 2.2. Perubahan bentuk dari martensit twinning dapat kembali ke bentuk semula sebelum diberi beban dengan dipanaskan hingga  $T_{Af}$ . Sifat paduan yang dapat kembali ke bentuk awal tersebut adalah efek *shape memory*. (Kumar, 2008).



Gambar 2. 2 Skema proses *detwinning* martensit (Kumar, 2008).



Gambar 2. 3 Skema tekanan-regangan-suhu menunjukkan *shape memory effect* untuk SMA NiTi (Kumar, 2008).

Pada Gambar 2.3 merupakan skema *shape memory effect* pada paduan Ni-Ti yang diplot pada kurva tekanan-regangan suhu

yang dapat dilihat transformasi fasanya. Bila diurutkan secara runtut dimulai pada fasa induk atau fasa austenit maka urutan transformasi yang terjadi ialah *forward transformation*, jika fasa induk didinginkan hingga temperatur austenit *start* (titik A ke titik B, Gambar 2.3). Kemudian, saat paduan menerima beban terjadi proses *detwinning* martensit (titik B ke titik C, Gambar 2.3) kemudian ketika dipanaskan ke temperatur austenit *finish* maka terjadi *reverse transformation* (Kumar, 2008)

### 2.1.2 Paduan *Shape memory alloys*

Terdapat hanya ada dua paduan logam yang memiliki efek *shape memory* yang paling bagus dan banyak diperdagangkan, yaitu paduan Ni-Ti dan paduan utama Cu ditambah unsur lainnya. Kedua paduan tersebut memiliki sifat yang berbeda. Paduan Ni-Ti memiliki regangan atau *shape memory effect* yang lebih baik (diatas 8%) dari pada paduan utama Cu dengan penambahan unsur lainnya yang memiliki regangan atau efek *shape memory* 4-5% saja. Hal tersebut menunjukkan bahwa paduan Ni-Ti cenderung lebih stabil secara termal dibanding paduan Cu dengan penambahan unsur lainnya. Selanjutnya, paduan Ni-Ti memiliki ketahanan korosi dan memiliki duktiliti yang lebih baik dibanding pada paduan utama Cu dengan penambahan unsur lainnya. Bahkan, paduan utama Cu dengan penambahan unsur lainnya memungkinkan dapat terjadinya *stress-corrosion cracking*. Di satu sisi, paduan utama Cu dengan penambahan unsur lainnya membutuhkan biaya yang relatif murah, dapat dibentuk dengan mudah dan memiliki transformasi temperatur yang lebih luas dibanding dengan paduan Ni-Ti (ASM *Metal Handbook Volume 2*, 1990). Pada Tabel 2.1 merupakan sifat dari paduan Cu-21 Zn-5 Al.

**Tabel 2. 1** Sifat paduan Cu-21 Zn-5 Al (ASM *International*, 1990)

Sifat Termal	
Temperatur Leleh (°C)	950-1020
Massa Jenis (g/cm <sup>3</sup> )	7,64
Resistivitas (μΩ.cm)	8,5-9,7
Konduktivitas Termal (W/m.°C)	120
Kapasitas Panas (J/Kg)	400
Sifat Mekanik	
Modulus Young Fasa (Gpa)	72
Modulus Young Martensit (Gpa)	70
Yield Strength Fasa (Mpa)	350
Yield Strength Martensit (Mpa)	80
Kekuatan Tarik Maksimum (Mpa)	600
Sifat <i>Shape Memory</i>	
Transformasi Temperatur (°C)	<120
Recoverable Strain (%)	4

Proses peleburan logam paduan utama Cu hampir sama dengan proses peleburan logam pada umumnya. Namun, peleburan logam paduan biasanya menggunakan pelelehan induksi. Dalam proses peleburan logam paduan Cu-21 Zn-5 Al menggunakan fluks pelindung dan gas nitrogen atau gas inert sebagai pelindung pada proses penuangan untuk mencegah penguapan Zn dan oksidasi Al. Sifat dari masing masing logam penyusun Cu-Zn-Al dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2. 2** Data dasar tembaga, seng, dan aluminium (Groover, 2010)

Keterangan	Tembaga	Seng	Aluminium
Simbol	Cu	Zn	Al
Nomor Atom	29	30	13
Struktur Kristal	FCC	HCP	FCC
<i>Density</i> (g/cm <sup>3</sup> )	8.96	7.14	2.7
Titik Lebur (°C)	1083	420	660

Pada temperatur kamar, fasa yang terbentuk pada paduan Cu-21 Zn-5 Al adalah  $\alpha + \beta$ . Untuk melihat efek *shape memory* pada paduan Cu-21 Zn-5 Al, dilakukan proses *solution heat treatment*. Diawali dengan proses pemanasan pada paduan Cu-21 Zn-5 Al hingga temperatur tinggi (diatas 850°C) hingga terbentuk fasa tunggal atau austenit. Hal ini berdasarkan pada diagram fasa Cu-21 Zn-5 Al. Kemudian, di tahan pada temperatur tersebut dengan waktu tertentu supaya terbentuk fasa sepenuhnya. Setelah itu dilakukan proses pendinginan secara cepat (*quenching*) agar fasa  $\alpha$  tidak muncul pada temperatur kamar dan terbentuklah fasa atau disebut martensit. Kemudian paduan tersebut dideformasi dan kemudian dipanaskan kembali hingga mencapai temperatur austenit dan bentuk paduan akan kembali seperti semula. Dari proses tersebut terjadi *shape memory effect* (ASM Metal Handbook Volume 2, 1990).

## 2.2 Diagram Fasa Terner Cu-21 Zn-5 Al

Pada umumnya logam tidak dapat berdiri sendiri dalam keadaan murni, tetapi lebih banyak logam dalam keadaan paduan dengan unsur-unsur tertentu, sehingga struktur yang terdapat dalam keadaan setimbang pada temperatur dan tekanan tertentu akan berbeda. Kombinasi antar beberapa unsur dapat membentuk paduan logam yang menghasilkan sifat yang berbeda-beda dari logam aslinya. Pengamatan sifat-sifat tersebut dapat diperhatikan

dari fasa-fasa paduan yang terdapat pada diagram fasa. Diagram fasa merupakan suatu grafik atau diagram sebagai representasi mengenai fasa-fasa dalam paduan dengan variasi temperatur, komposisi paduan, dan tekanan. Diagram fasa suatu paduan dapat mengidentifikasi kelarutan pada suatu paduan dan menunjukkan jenis-jenis fasa yang terbentuk pada kondisi kesetimbangan atau ekuilibrium. Kondisi ekuilibrium maksudnya adalah kondisi dimana tidak terjadi perubahan yang bergantung pada waktu. Kondisi ekuilibrium dapat diperoleh dengan proses pemanasan dan pendinginan yang sangat lambat sehingga bila ada perubahan fasa yang harus terjadi maka akan tersedia waktu yang cukup untuk mencapai kondisi kesetimbangan. Dalam proses pemanasan atau pendinginan yang lambat, tentu tidak praktis sehingga temperatur perubahan fasa akan menjadi lebih tinggi pada saat pemanasan dan lebih rendah saat pendinginan bila dibandingkan dengan temperatur perubahan fasa yang ditunjukkan pada diagram kesetimbangan. Besarnya temperatur ini tergantung pada kecepatan pemanasan atau pendinginan. (Avner, 1974)

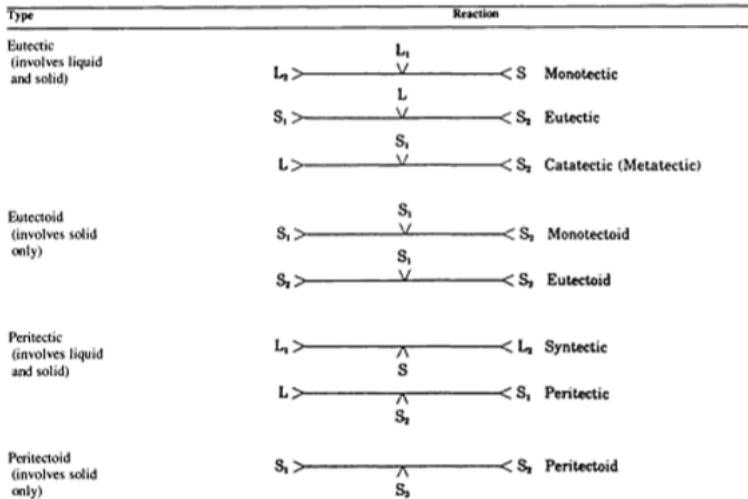
Ada berbagai macam diagram fasa, salah satu jenis diagram fasa ialah diagram fasa *binary*. Diagram fasa *binary* merepresentasikan fasa-fasa dalam paduan yang melibatkan 2 komponen dengan tekanan konstan 1 atm dan komposisi dan temperatur yang berubah-ubah. Diagram fasa dapat memiliki paduan yang melibatkan 3 komponen yaitu, diagram fasa *ternary*. Diagram fasa dibuat pada suatu salib sumbu dengan temperatur pada sumbu vertikal (sebagai ordinat) dengan satuan celsius dan komposisi paduan pada sumbu horizontal (sebagai absis) dengan satuan persen berat. Untuk membuat diagram fasa, pertama dibuat sejumlah paduan dengan berbagai komposisi, kemudian masing - masing paduan dipanaskan atau didinginkan dengan sangat lambat, kemudian diamati temperatur dimana mulai terjadi perubahan laju pemanasan/pendinginan. Setiap perubahan laju pemanasan atau pendinginan akan menunjukkan mulai atau selesainya perubahan fasa karena setiap perubahan fasa akan melibatkan panas laten. Titik tersebut kemudian diplot pada salib sumbu sehingga

---

diperoleh diagramnya. Pada diagram fasa terdapat istilah - istilah yang sering digunakan seperti pada Gambar 2. 4, yaitu:

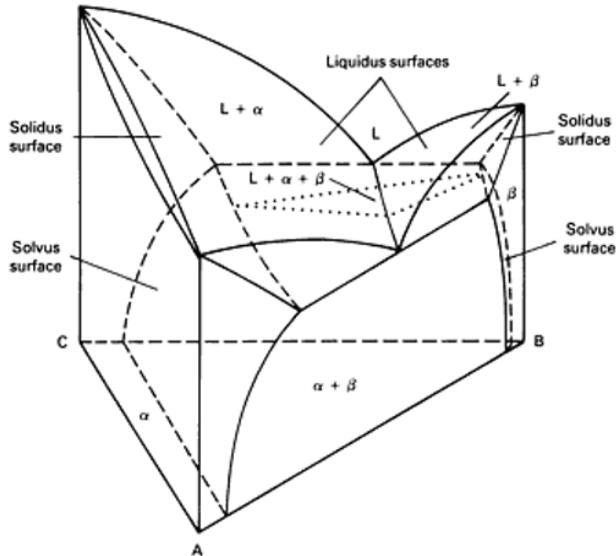
1. Garis liquidus menunjukkan temperatur terendah dimana logam dalam keadaan cair atau temperatur dimana awal terjadinya pembekuan dari kondisi cair akibat proses pendinginan.
2. Garis solidus menunjukkan temperatur tertinggi suatu logam dalam keadaan padat atau temperatur terendah dimana masih terdapat fasa cair.
3. Garis solvus menunjukkan temperatur tertinggi suatu logam dalam keadaan fasa padat yang kedua atau temperatur terendah dimana masih terdapat fasa padat yang pertama.
4. Eutectoid merupakan reaksi dimana fasa solid berubah menjadi 2 fasa solid yang berbeda.
5. Eutektik merupakan reaksi dimana fasa liquid berubah menjadi 2 fasa solid yang berbeda.
6. Peritektik merupakan reaksi dimana 2 fasa yang berbeda (liquid dan suatu solid) menjadi suatu fasa solid baru
7. Peritectoid merupakan reaksi dimana 2 fasa solid yang berbeda menjadi suatu fasa solid yang baru.

(ASM Metals *Handbook* Vol.3, 1992)



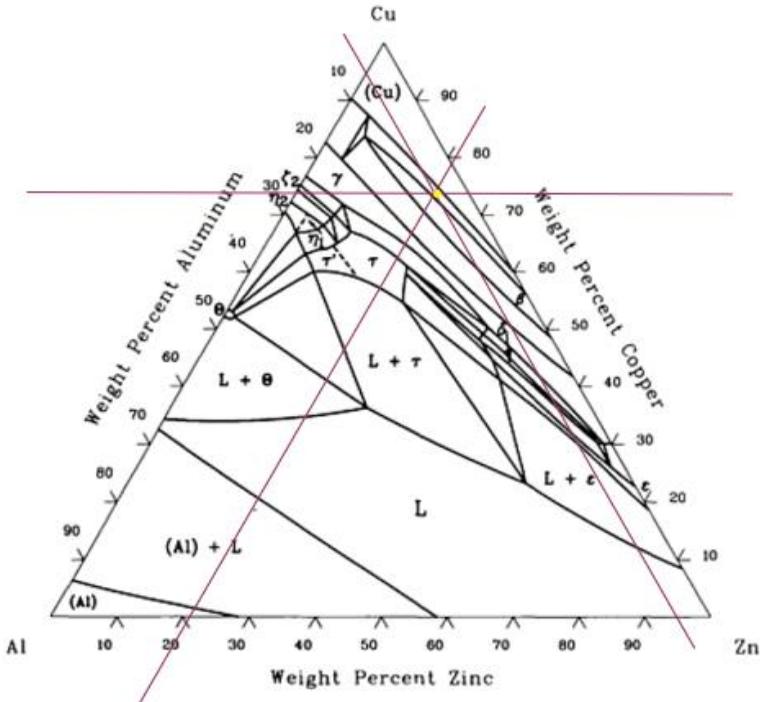
**Gambar 2. 4** Jenis reaksi pada diagram fasa (ASM Metals *Handbook* Vol.3, 1992).

Selain diagram fasa dengan dua unsur yang memiliki satu atau dua fasa (diagram fasa *binary*), terdapat juga diagram fasa yang terdiri dari 3 unsur yang memiliki satu, dua, dan tiga fasa dalam diagramnya yang disebut diagram fasa *ternary*. Diagram fasa *ternary* ini lebih rumit dalam cara membacanya. Ketika suatu unsur ditambahkan ke dalam sistem diagram fasa *binary*, akan membentuk diagram padat yang memiliki diagram biner pada sisi vertikal. Hal tersebut dapat menggambarkan diagram fasa *ternary* dengan tiga unsur (ASM Metals *Handbook* Vol.3, 1992). Pada Gambar 2.5 dibawah ini menunjukkan contoh dari diagram fasa *ternary*.



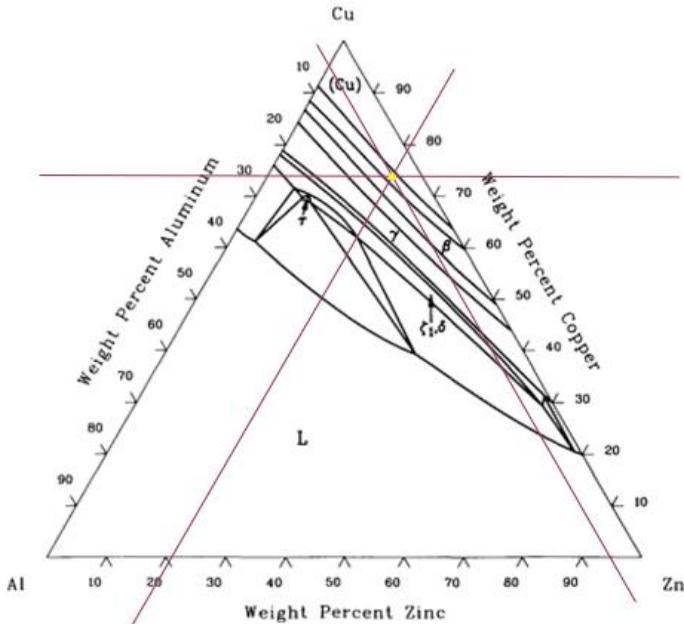
**Gambar 2. 5** Diagram fasa *ternary* (ASM Metals *Handbook* Vol.3, 1992)

Pada Gambar 2.5 terdapat batas-batas pada daerah *single phase* (garis cairan, garis padatan, garis solvus pada diagram binary) menjadi permukaan-permukaan. Area satu dan dua fasa menjadi volume-volume, dan garis-garis yang terdiri dari tiga fasa menjadi volume. Pada bidang dengan unsur A-B dan B-C merupakan diagram fasa *binary* eutektik dan termasuk kedalam diagram fasa *ternary*. Diagram fasa *ternary* ditunjukkan melalui gambar tiga dimensi, yang dapat membantu untuk memudahkan memahami hubungan-hubungan pada diagramnya. Namun, dalam membaca nilai dalam diagramnya masih sangat sulit. Untuk mengatasi hal tersebut, terdapat sistem *ternary* yang menampilkan diagram *binary* meliputi permukaan dan proyeksi dua dimensi dari permukaan liquidus dan solidus dengan bagian horizontal (*isotherms*) dan bagian vertikal (*isopleths*) melalui diagram solid (ASM Metals *Handbook* Vol.3, 1992).



**Gambar 2. 6** Diagram Fasa *ternary* Cu-21 Zn-5 Al pada temperatur 550°C (ASM Metals *Handbook* Vol.3, 1992)

Pada Gambar 2.6 terdapat diagram fasa *ternary* dari paduan Cu-21 Zn-5 Al di temperatur 550°C. dan didapatkan fasa-fasa apa saja yang terdapat pada diagram fasa *ternary* tersebut. Contoh, pada garis-garis coklat yang berpotongan di Gambar 2. 6, titik tersebut berada pada posisi sekitar 70-75% Cu, 20-25% Zn dan 3-7% Al.



**Gambar 2. 7** Diagram fasa *ternary* Cu-21 Zn-5 Al pada temperatur 700°C (ASM Metals *Handbook* Vol.3, 1992)

Pada Gambar 2. 7 terdapat diagram fasa *ternary* dari paduan Cu-21 Zn-5 Al di temperatur 700°C dan didapatkan fasa-fasa apa saja yang terdapat pada diagram fasa *ternary* tersebut.. Contoh pada garis-garis coklat yang berpotongan di Gambar 2.7, titik tersebut berada pada posisi sekitar 70-75% Cu, 20-25% Zn dan 3-7% Al.

### 2.3 Perlakuan Panas

Perlakuan panas merupakan pemrosesan termal pasca solidifikasi dalam bentuk pemanasan atau pendinginan untuk mencapai serangkaian sifat mekanik yang diinginkan. Pemilihan perlakuan panas untuk suatu material bergantung pada berbagai faktor, seperti aplikasi, dimensi dan stabilitas mikrostruktur, sifat

mekanik, sensitivitas terhadap degradasi lingkungan, dan sebagainya. Masing-masing perlakuan panas yang dibahas mengacu pada paduan Cu-21 Zn-5 Al (Asm *Handbook*, 2008).

### 2.3.1 *Homogenizing*

*Homogenizing* adalah proses perlakuan panas pada logam dengan kondisi temperatur yang tinggi dan didinginkan secara lambat yang berfungsi untuk membuat struktur mikro menjadi lebih homogen sehingga bisa memberikan sifat mekanik yang lebih baik, seperti keuletan, kekerasan, dan lain-lain. Proses *homogenizing* paling banyak dilakukan untuk paduan yang memiliki rentang titik beku yang luas, 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. Untuk memperhalus struktur mikronya, perlu dilakukan proses *annealing*. Temperatur yang digunakan untuk *homogenizing* pada umumnya berkisar antara 700 - 1000°C (ASM Metals *Handbook* Vol. 4, 1992).

### 2.3.2 *Annealing*

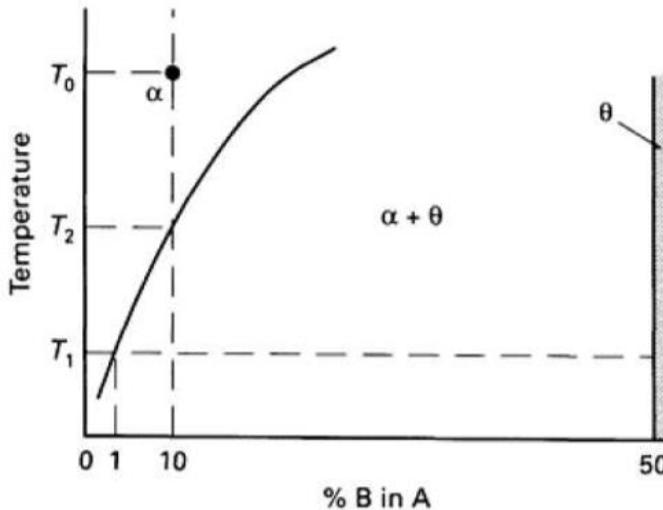
Anil (*annealing*) adalah suatu proses perlakuan panas (*heat treatment*) yang dilakukan pada logam/paduan dalam proses pembuatan produk. Pada prinsipnya, anil dilakukan dengan memanaskan sampai temperatur tertentu, kemudian menahannya pada temperatur tersebut, dan didinginkan dengan sangat lambat. Biasanya anil dilakukan untuk mempersiapkan logam/paduan untuk pengerjaan atau perlakuan panas berikutnya. Tujuan dari proses anil adalah untuk melunakkan paduan atau meningkatkan keuletan, menghilangkan tegangan, memperbaiki *machinability*-nya, dll (Suherman, 2003).

### 2.3.3 *Solution treatment*

*Solution treatment* adalah proses perlakuan panas yang umum untuk banyak keluarga logam yang berbeda seperti aja

---

paduan aluminium, *superalloy* berbasis nikel, paduan titanium, dan beberapa paduan berbasis tembaga. Tujuan dari *solution treatment* adalah untuk melarutkan fasa atau persipitat dan mendapatkan suatu fasa tunggal. *Solution treatment* merupakan perlakuan panas dengan memanaskan paduan hingga diatas garis solvus pada diagram fasa logam paduan. Perlakuan panas ini pada beberapa paduan dilakukan dengan memanaskan sampai terjadi fasa tunggal kemudian ditahan beberapa saat dan diteruskan dengan pendinginan cepat untuk menghindari terjadinya presipitasi selama pendinginan. Contoh proses *solution treatment* dapat digambarkan dengan skema *solution treatment* pada paduan A-B pada Gambar 2.8 Pada diagram fasa diambil titik 10% B dimana pada titik tersebut memiliki fasa  $\alpha + \theta$  pada temperatur kamar. Demi mendapatkan fasa tunggal  $\alpha$ , maka paduan dipanaskan hingga mencapai temperatur  $T_0$ . Karena jika paduan dipanaskan hanya mencapai temperatur  $T_1$ , fasanya masih tetap  $\alpha + \theta$  dan jika paduan dipanaskan hanya mencapai temperatur  $T_2$ , fasanya masih tetap  $\alpha + \theta$  tetapi fasa  $\alpha$  lebih dominan dibanding dengan fasa  $\theta$ . Semakin naik temperatur, maka fasa  $\theta$  akan terlarut dalam fasa  $\alpha$ . Ketika dilakukan pendinginan secara cepat, fasa  $\theta$  terhambat untuk keluar sehingga pada temperatur kamar tetap terbentuk fasa  $\alpha$  (ASM *Handbook* Vol. 4, 1992).

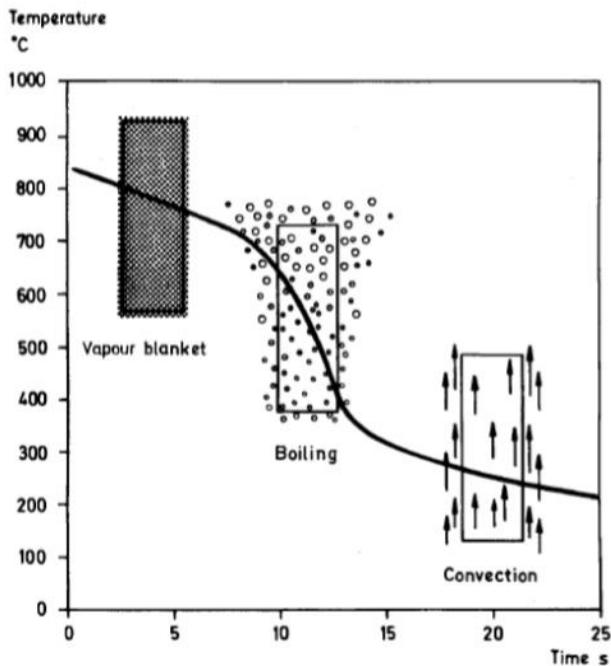


**Gambar 2. 8** Diagram fasa paduan A dan B (*ASM Handbook* Vol. 4, 1992)

### 2.3.4 Quenching

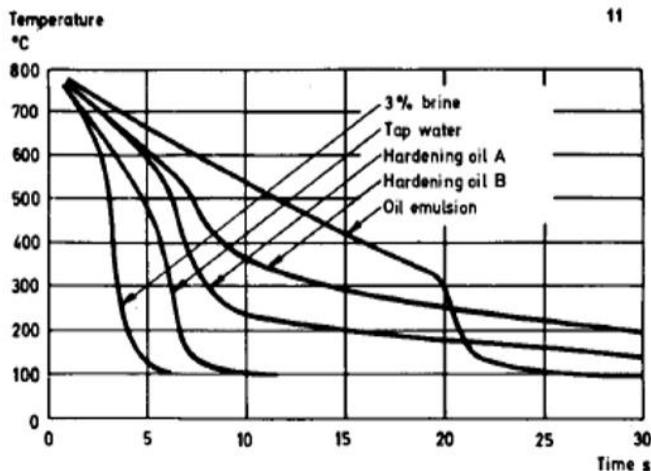
Untuk menghasilkan struktur yang diinginkan dalam proses pengerasan, yaitu martensit maka austenit yang diperoleh harus didinginkan secara cepat, setidaknya dapat mencapai laju pendinginan kritis dari paduan yang bersangkutan. Dalam proses pendinginan biasanya paduan yang telah dipanaskan akan dicelupkan ke media pendingin berupa liquid. Selama proses quenching, panas dari benda kerja akan mengalir ke media pendingin, sehingga temperatur benda kerja akan menurun. Laju penurunan temperatur ditentukan oleh kecepatan aliran dari panas tersebut (Avner, 1974). Terdapat tiga tahapan hilangnya panas selama proses quenching berlangsung, seperti pada Gambar 2.9, yaitu *vapour blanket stage*, *boiling stage*, dan *convection stage*. Ketika material hasil pemanasan dicelupkan ke dalam media pendingin, liquid yang menyentuh permukaan benda kerja akan berubah menjadi uap dan membentuk film tipis yang menutupi seluruh permukaan benda kerja. Tahap ini disebut *vapour blanket*

*stage*. Selanjutnya temperatur liquid di sekitar benda kerja mencapai titik didih, dan semakin banyak uap yang terbentuk sehingga blanket tidak mampu lagi menempel pada permukaan benda kerja. Dan akan terlepas membentuk gelembung-gelembung (mendidih). Begitu *blanket* terlepas, maka akan ada liquid baru yang mengisi dan segera berubah menjadi gelembung uap. Energi pembentukan uap diambil dari panas pada benda kerjanya. Tahap ini merupakan *boiling stage* dimana memiliki laju pendinginan tertinggi. Kemudian tahap terakhir adalah *convection stage*. Pada tahap ini gelembung uap mulai menghilang. Perpindahan panas terjadi secara konveksi dan selisih temperatur antara liquid dan benda kerja tinggal sedikit, sehingga laju pendinginan sangat rendah (Suherman, 2011).



**Gambar 2. 9** Tahapan proses *quenching* (Thelning, 1984)

Ada tiga media pendingin yang biasanya dipakai, yaitu air, *brine*, dan oli. Air merupakan media pendingin tertua dan murah. Pendinginan dengan menggunakan *brine* (air + garam) terjadi lebih cepat/mempunyai laju pendinginan yang lebih tinggi daripada dengan air biasa. Hal ini dikarenakan tahap *vapour blanket stage*-nya lebih singkat. Pendinginan dengan oli jauh lebih lambat daripada dengan air dan *brine*. Kurva media pendinginan dapat dilihat pada Gambar 2. 10 (Thelning, 1984).

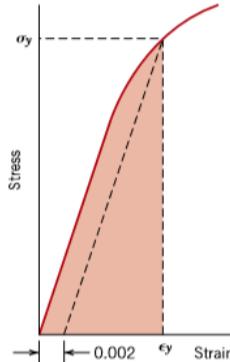


**Gambar 2. 10** Kurva Media Pendinginan (Thelning, 1984)

## 2.4 Resilien

Resilien atau modulus resilien merupakan kapasitas suatu bahan untuk menyerap energi ketika diberikan beban untuk berdeformasi secara elastis, kemudian saat beban dilepaskan energi tersebut dapat dipulihkan. Resilien juga dapat disebut sebagai Modulus Resilien ( $U_r$ ). Modulus resilien adalah energi regang persatuan volume yang diperlukan sehingga material mendapat tegangan dari kondisi tidak berbeban ketitik luluh. Modulus resilien dipengaruhi oleh tegangan dan regangan yang dapat dirumuskan pada Rumus 2.1.

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



**Gambar 2. 11** Kurva tegangan regangan

Pada Gambar 2.11 dapat terlihat kurva tegangan regangan suatu material yang dimana daerah berwarna merah tersebut merupakan modulus resilien. Modulus resilien untuk setiap material berbeda-beda seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.3.

**Tabel 2. 3** Nilai modulus resilien beberapa material  
(Callister,2009)

Material	E (psi)	s <sub>o</sub> (psi)	Modulus of resilience (U <sub>r</sub> )
<i>Medium-carbon steel</i>	30 x 10 <sup>6</sup>	45000	33,7
<i>High-carbon spring steel</i>	30 x 10 <sup>6</sup>	140000	320
<i>Copper</i>	16x10 <sup>6</sup>	4000	5,3
<i>Rubber</i>	150	300	300

(Callister, 2009)

---

## 2.5 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian seperti yang dicantumkan pada Sub-Bab 2.8.1 hingga Sub-Bab 2.8.5.

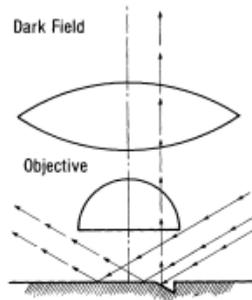
### 2.5.1 Pengujian *X-ray Diffraction* (XRD)

*X-ray Diffraction* (XRD) adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk dari sampel yang diuji. Prinsip kerja pada pengujian XRD ialah saat suatu material dikenai sinar X, maka intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan karena adanya penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi (Ginting et al., 2005).

### 2.5.2 Pengujian Metalografi

Pengujian struktur mikro atau biasa disebut metalografi adalah pengujian yang dilakukan untuk melihat struktur mikro yang terbentuk pada spesimen hasil pepaduan. Alat yang digunakan pada pengujian ini adalah mikroskop optik. Dengan dibantu oleh perbesaran pada alat mikroskop optik, serta adanya faktor cahaya yang dipantulkan ke arah mata seperti pada Gambar 2.11, maka akan terlihat struktur mikro dari spesimen uji tersebut. Struktur mikro yang terlihat akan dibandingkan dengan diagram fasa paduan. Pengamatan dilakukan pada struktur mikro yang terbentuk adalah dengan memperhatikan pengaruh unsur paduan terhadap diagram fasa dan struktur mikro. Prinsip pengujian ini adalah dengan mengamati permukaan spesimen yang sebelumnya telah dipreparasi, di-*polish*, dan di-*etch*. Kemudian, spesimen diamati pada mikroskop optik (Juliaptini, 2010). Gambar 2.11 menunjukkan alur sinar datang pada pengamatan metalografi.

---



**Gambar 2. 12** Arah cahaya pada pengujian metalografi .  
(Juliaptini, 2010)

### 2.5.3 Pengujian Kekerasan Vickers

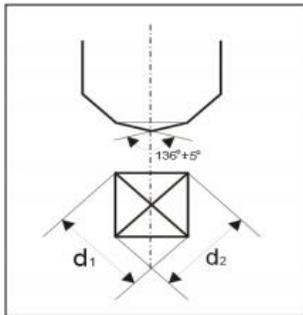
Pengujian kekerasan merupakan suatu pengujian yang digunakan untuk mengetahui harga kekerasan dari suatu material, dimana kekerasan dapat didefinisikan sebagai ketahanan suatu material terhadap deformasi permanen oleh penekanan. Kekerasan dapat diukur dengan cara pengujian menggunakan alat kekerasan Vickers (*Vickers Hardness Tester*). Uji kekerasan vickers menggunakan indenter piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar seperti Gambar 2.13. 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*. Pada prakteknya, luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak (Dieter, 1987). VHN dapat ditentukan dari persamaan berikut:

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

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.3)$$

Dimana: VHN : Nilai kekerasan Vickers(N/mm<sup>2</sup>)

- $P$  : Beban yang digunakan (N)  
 $d$  : Diagonal rata-rata (mm)  
 $\Theta$  : Sudut antara permukaan intan yang saling berhadapan ( $136^\circ$ )



**Gambar 2. 13** Indentor vickers *hardness test* (Dieter, 1987)

Nilai kekerasan juga dapat mengindikasikan bahwa resistensi terhadap lekukan atau kekerasan sebanding dengan kekuatan luluh material. Tekanan pada indenter adalah skitar tiga kali kekuatan luluh tarik bahan. Hubungan tersebut telah dikembangkan untuk menghubungkan kekuatan luluh/*Yield Strength* dengan kekerasan Vickers (Callister, 2013)

$$YS \text{ (in kgf/mm}^2\text{)} = 1/3 \text{ HV (0.1)}^{m-2} \quad (2.4)$$

Dimana:  $VH$  : Nilai kekerasan Vickers ( $N/mm^2$ )  
 $N$  : *Meyer's Strain Hardening Coefficient*

#### 2.5.4 Pengujian *Shape Memory Effect*

Pengujian *shape memory effect* mengacu pada standar ASTM F2082-01. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui persentase *recovery* dari paduan *shape memory* yang telah terdeformasi. 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 sebesar 90 derajat, lalu dipanaskan hingga terjadi *recovery shape*. Persentase *recovery* atau efek *shape memory* dapat dihitung dengan persamaan 2.5 di bawah ini:

$$SME = \frac{\theta_0 - \theta_t}{\theta_0} \times 100\% \quad (2.5)$$

Dimana:         $\theta_0$  : Sudut Awal  
                   $\theta_t$  : Sudut Akhir

### 2.5.5 Pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC)

Pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC) adalah pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan suatu transformasi temperatur dari sampel yang diuji. Sampel material berukuran sangat kecil (beberapa miligram). *Differential scanning calorimeter* merupakan salah satu alat dari *thermal analyzer* yang dapat digunakan untuk menentukan kapasitas panas dan entalpi dari suatu bahan. Prinsip kerja dari alat DSC ini adalah mengukur kalor yang terserap atau dikeluarkan dari sebuah material selama material tersebut dipanaskan dan didinginkan pada rentang temperatur transformasi. Dalam DSC, sampel dan pembanding juga bergantung pada penambahan suhu secara terus-menerus, namun panas yang ditambahkan baik ke sampel atau ke pembanding dilakukan seperlunya, hal ini untuk mempertahankan agar suhu keduanya selalu sama. Penambahan panas dicatat pada *recorder*, panas ini digunakan untuk mengganti kekurangan atau kelebihan sebagai akibat dari reaksi endoterm atau eksoterm yang terjadi dalam sampel. Data yang diperoleh dari masing-masing teknik tersebut digunakan untuk memplot secara kontinyu dalam bentuk kurva yang dapat disetarakan dengan suatu spektrum yang dikenal dengan sebagai termogram. Perbedaan suhu keduanya terus dideteksi dan dicatat sebagai suatu puncak kurva. Pada reaksi endotermik, suhu sampel lebih rendah daripada suhu referen dan sebaliknya bila suhu sampel lebih tinggi daripada suhu referen, maka terjadi reaksi eksotermik. Puncak endoterm dan eksoterm

muncul saat sampel menyerap atau mengeluarkan energi akibat adanya transformasi. Sehingga, dapat diukur awal, puncak, serta akhir dari perubahan fasa material (Ginting et al., 2005).

## 2.6 Penelitian Sebelumnya

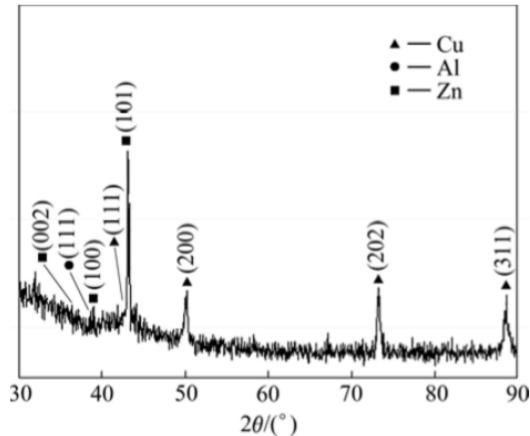
Lidija Gomidzelovic, dkk (2014) melakukan penelitian mengenai sifat-sifat termodinamika, struktur mikro, dan nilai kekerasan pada *Shape Memory Alloy* (SMA) Cu-21 Zn-5 Al dengan beberapa komposisi yang berbeda. Paduan SMA diperoleh dari produksi industri. Komposisi, bentuk dan metode produksi sampel diteliti terdapat pada Tabel 2.4 Analisis mikrostruktur sampel diteliti menggunakan *Light Optical Microscopy* (LOM) dengan mikroskop Reichert MeF2, dan dengan SEM-EDX menggunakan JEOL JSM-6610LV *scanning electron microscope* Oxford instrument X-Max 20 mm<sup>2</sup> SDD *energy-dispersive X-ray spectrometer*. Sebelum analisis metalografi, permukaan sampel dipoles lalu kemudian dietsa dengan larutan FeCl<sub>3</sub> + HCl + H<sub>2</sub>O untuk memperlihatkan struktur paduan yang diteliti. Metode pengujian kekerasan dilakukan dengan standard prosedur pengujian metode Vickers.

**Tabel 2. 4** Komposisi 3 sampel paduan Cu-21 Zn-5 Al  
(Gomidzelovic, 2014)

Sampel	Komposisi (%)			Bentuk (mm)	Metode Produksi
	Cu	Zn	Al		
A1	73	23	4	Wire (d16 )	Pengecoran pada cetakan grafit
A2	71	24,4	4,6	Wire (d20)	<i>Up-cast</i>
A3	75,1	16,6	8,3	Wire (d20)	<i>Up-cast</i>

Pola XRD dari Sampel A1 ditunjukkan pada Gambar 2. 13 Pola difraksi mewakili kisi kristal dari  $\alpha$ -solid *solution* fasa Cu-Zn-

Al dengan FCC (*Centered Cubic Lattice*) dengan kehadiran fasa  $\beta$  didalamnya. Berdasarkan komposisi kimia dari paduan yang diteliti, dapat diperkirakan bahwa paduan terdiri dari dua fasa ( $\alpha$  dan  $\beta$ ), yang didapat dari pola XRD.



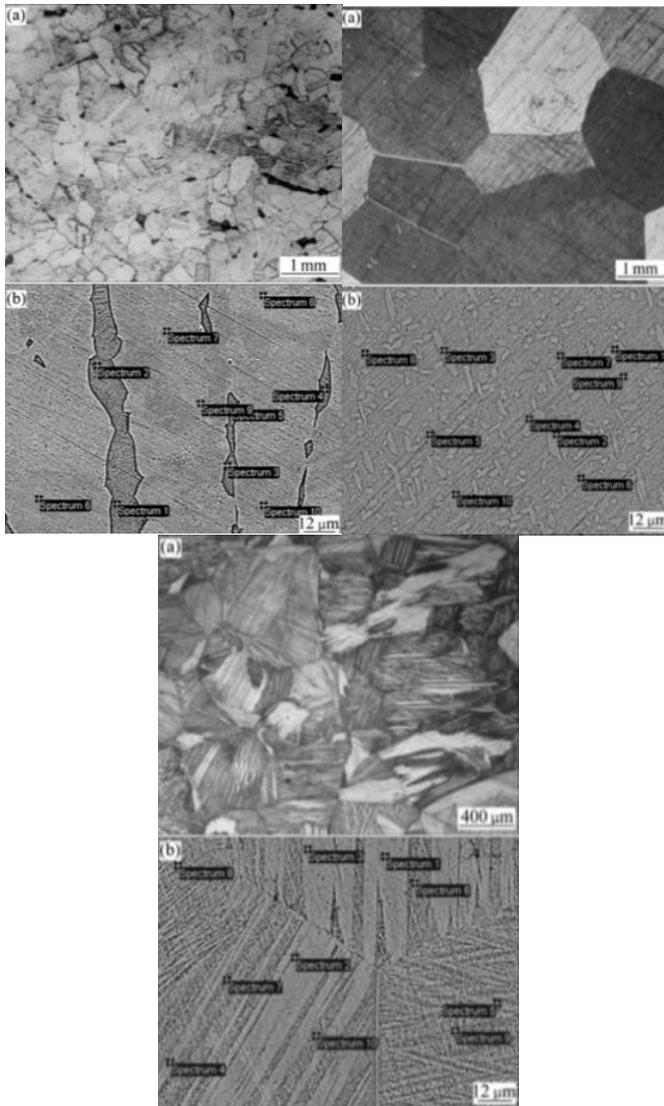
**Gambar 2.14** Pola XRD sampel A1 (Gomidzelovic, 2014)

Hasil pengukuran kekerasan Vickers dari sampel paduan Cu – Al – Zn yang diselidiki ditunjukkan pada Tabel 2.5 Pada tiga sampel diuji, dikalkulasi dan nilai-nilai yang didapat dirata-rata. Nilai kekerasan paduan semakin menurun dengan semakin meningkatnya komposisi paduan.

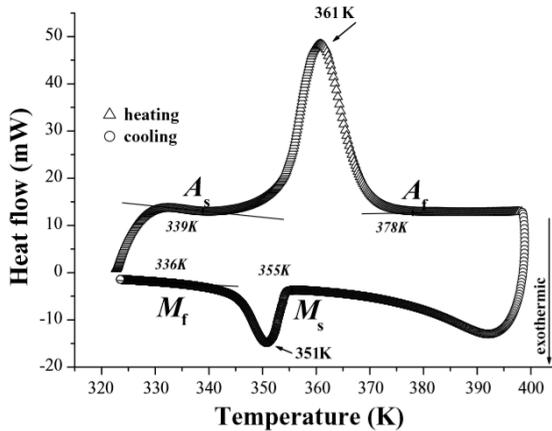
**Tabel 2.5** Nilai kekerasan vickers sampel paduan Cu-21 Zn-5 Al (Gomidzelovic, 2014)

Sampel	HV10			Rata-rata
	1	2	3	
A1	264	254	251	256.3
A2	201	222	240	212
A3	153	159	151	154.3

Analisis mikrostruktur dari hasil menggunakan mikroskop optik cahaya dan SEM-EDX untuk Sampel A1 ditunjukkan oleh Gambar 2.14 Hasil uji metalografi menunjukkan bahwa struktur mikro sampel A1 terdiri dari butir - butir berbentuk poligonal dan bentuk - bentuk yang tidak teratur. Analisis mikrostruktur dari hasil menggunakan mikroskop optik cahaya dan SEM-EDX untuk Sampel A2 ditunjukkan oleh Gambar 2.14 Hasil uji metalografi menunjukkan bahwa struktur mikro sampel A2 terdiri dari butir - butir dengan berukuran besar dan memanjang. Analisis mikrostruktur dari hasil menggunakan mikroskop optik cahaya dan SEM-EDX untuk Sampel A3 ditunjukkan oleh Gambar 2.14 Hasil uji metalografi menunjukkan bahwa struktur mikro sampel A3 terdiri dari butir - butir berukuran besar dan berbentuk poligonal. Pada tampilan SEM menunjukkan pola kristal yang berbeda-beda di setiap butir. Berdasarkan diagram fasa sistem biner Cu - Zn dan Cu - Al, kelarutan dari Al dalam Cu adalah sekitar 18%, dan untuk Zn hingga 30%. Dari pertimbangan tersebut, pada semua sampel yang diselidiki, bahan dasarnya adalah Cu (65% -75% Cu). Maka dari itu Al dan Zn akan larut dalam Cu, menciptakan *solid solution*. Asumsi tersebut telah dikonfirmasi oleh hasil analisis pola XRD dari Sampel A1 (Gambar 2. 14).



**Gambar 2.15** Hasil metalografi dan SEM-EDX dari sampel A1 (kiri), sampel A2 (kanan), dan sampel A3 (bawah) (Gomidzelovic, 2014)



**Gambar 2.16** Pengujian DSC pada paduan Cu-25%Zn-4%Al (Martinez, 2004)

Pada penelitian yang dilakukan oleh O.E. Martinez, dkk (2004) mengenai paduan Cu-21 Zn-5 Al. Paduan tersebut memiliki komposisi berupa Cu - 12,17 Zn - 17,92 Al. Penelitian yang dilakukan berhubungan dengan pendeteksian resonan piezoelectric photoacoustic didemonstrasikan sebagai alat yang sensitif untuk penentuan transisi fasa. Sebuah model disajikan untuk menggambarkan perubahan dalam sinyal yang diharapkan selama transisi fasa ketika deteksi resonansi digunakan. Teknik ini diterapkan untuk mempelajari transformasi tanpa difusi martensit dalam *shape memory alloy* berbasis tembaga. Model memperhitungkan perubahan sinyal yang timbul dari dua sumber. Yang satu berperilaku seperti perubahan efektif dalam kapasitas panas, lalu naik akibat entalpi dari reaksi, dan yang lain dapat digambarkan sebagai perubahan yang efektif dalam koefisien ekspansi termal, dan muncul dari perubahan volume selama transformasi. Dilakukan pula pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dengan hasil pengujian pada Gambar 2. 15. Didapatkan temperatur *Austenite Start* ( $A_s$ ) dan *Austenite Finish* ( $A_f$ ) adalah 339 - 378K (66 – 105°C) dan temperatur *Martensite*

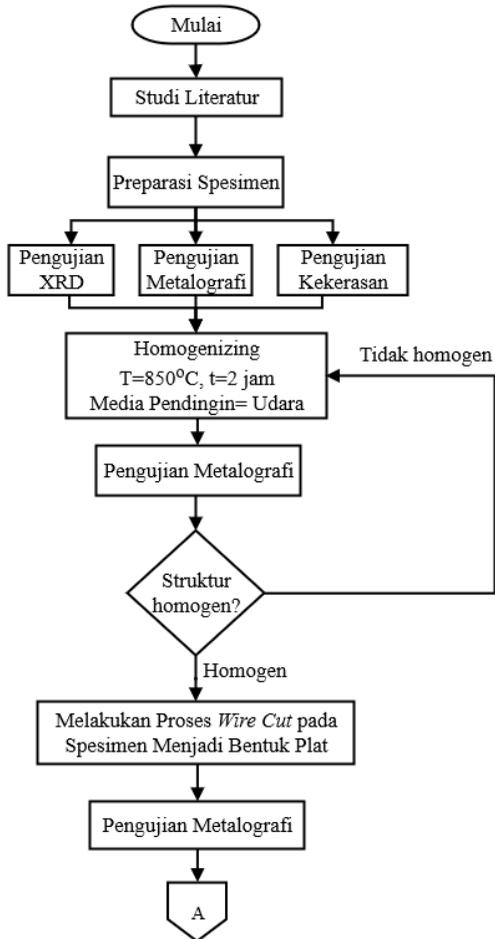
---

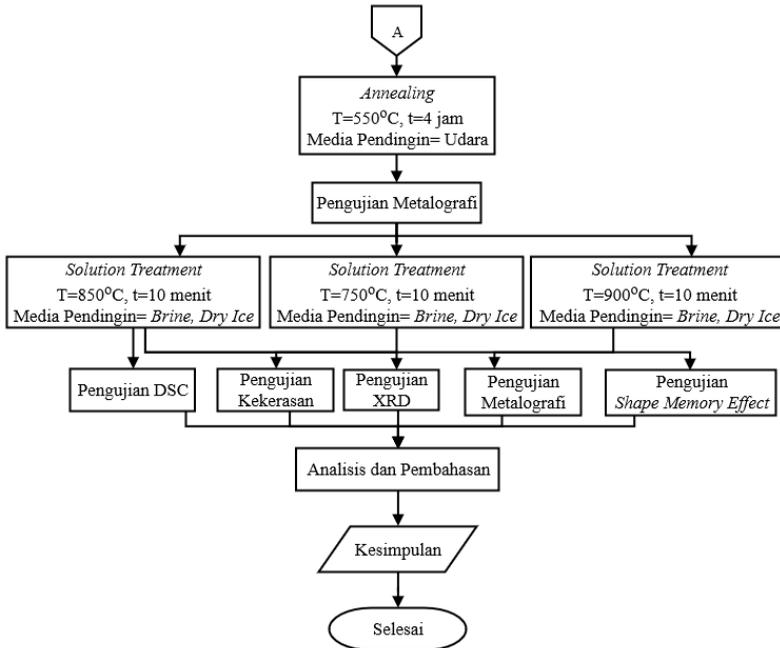
*Start* ( $M_s$ ) dan *Martensite Finish* ( $M_f$ ) adalah 355 – 336 K (82 – 63°C).

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir





**Gambar 3. 1** Diagram alir

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap sesuai dengan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Penelitian dimulai dengan mencari studi literatur sesuai dengan penelitian yang dilakukan. Selanjutnya, melakukan preparasi spesimen berupa Cu -21 Zn -5 Al. Pada spesimen dilakukan uji metalografi dan uji kekerasan. Kemudian, paduan diberikan perlakuan panas *homogenizing* pada temperatur 850°C dengan waktu tahan selama 2 jam dan media pendingin udara. Paduan yang telah dihomogenisasi lalu diuji kekerasan dan metalografi, kemudian dilakukan poses *machining* untuk membentuk paduan menjadi potongan *wire*/kawat dengan diameter  $\pm 1$  mm. Selanjutnya, *wire* diberikan perlakuan panas *annealing* pada temperatur 550°C dengan waktu tahan selama 4 jam dan media pendingin udara.

Paduan yang telah di-*annealing* lalu diuji kekerasan dan metalografi. Setelah itu, logam diberi perlakuan panas kembali dengan metode *Solution treatment* pada temperatur 750, 850, dan 900°C dengan masing-masing waktu tahan selama 10 menit dan 2 variasi media pendingin (*brine solution* dan *dry ice*). Kemudian, pada spesimen dilakukan uji metalografi, uji XRD, uji kekerasan dan uji *Shape memory effect*. Uji DSC dilakukan pada spesimen dengan variabel temperatur *solution treatment* sebesar 850°C dengan media pendingin *dry ice*.

### 3.2 Bahan

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

1. Paduan *Shape memory*

Paduan *Shape memory* yang digunakan adalah paduan Tembaga, Zinc, dan Aluminium dengan komposisi Cu - 21 Zn – 5 Al yang didapat dari hasil pengecoran Ditunjukkan pada Gambar 3.2



**Gambar 3. 2** Logam paduan Cu-21 Zn-5 Al (Dokumentasi Pribadi)

## 2. Bahan Etsa

Bahan etsa yang digunakan pada penelitian ini adalah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Alaneme pada tahun 2018, yaitu:

- a. 5 gram  $\text{FeCl}_3$
- b. 10 ml HCl
- c. 95 ml Etanol

## 3. *Dry ice*

*Dry ice* yang digunakan sebagai media pendingin pada penelitian ini diperoleh dari Toko Dry Jl. Bronggalan.

## 4. *Brine solution*

*Brine solution* digunakan sebagai media pendingin pada penelitian ini. *Brine solution* merupakan  $\text{H}_2\text{O}$  yang ditambahkan larutan NaCl lebih dari 5%. (ASM Metal Handbook Vol. 4). Pada penelitian ini  $\text{H}_2\text{O}$  ditambahkan dengan 10% NaCl untuk membentuk larutan *brine*.

### 3.3 Alat

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

#### 1. Timbangan Digital

Alat ini digunakan untuk menimbang logam sesuai dengan target komposisi.

#### 2. Gelas Ukur

Alat ini digunakan untuk mengukur bahan pembuatan larutan Etsa.

#### 3. Beaker Glass

Alat ini digunakan sebagai wadah untuk mencampur bahan larutan etsa dan pengujian *shape memory effect*.

#### 4. Alat Uji Kekerasan

Alat ini digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* sebelum dan sesudah proses perlakuan panas. Alat yang digunakan adalah *Universal Hardness Tester HBRV 187,5 A* milik Laboratorium Metalurgi Teknik

Material ITS. Pada Gambar 3.3 merupakan gambar alat uji kekerasan.



**Gambar 3.3** Alat uji kekerasan (Dokumentasi Pribadi)

5. Mikroskop Optik (OLYMPUS BX51M-RF)

Merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui struktur mikro pada spesimen Cu<sub>21</sub>Zn-5Al *shape memory alloys* sebelum dan sesudah proses perlakuan panas. Ditunjukkan Gambar 3.4 dibawah ini.



**Gambar 3.4** Mikroskop optik (Dokumentasi Pribadi)

#### 6. Alat *Wire Cut*

Merupakan alat potong, yakni sebuah kawat berbahan dasar Molybdenum yang digunakan untuk preparasi spesimen Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* untuk uji *shape memory effect*. Alat ini merupakan milik PT. ABS, Kampung Logam Ngingas, Sidoarjo.

#### 7. *High Temperatur Furnace*

Alat ini digunakan untuk melakukan proses perlakuan panas dengan memanaskan spesimen Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* hingga temperatur tertentu dan menahannya pada waktu tertentu hingga mendapatkan fasa yang homogen. *High Temperatur Furnace* yang digunakan merupakan milik Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pada Gambar 3.5 merupakan gambar dari *high temperatur furnace*.



**Gambar 3. 5** *High Temperatur Furnace* (Dokumentasi Pribadi)

#### 8. Alat Uji XRD

Alat ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk pada suatu material dengan cara menembakkan sinar X pada material tersebut. Alat uji XRD dengan tipe PAN Analytical XRD yang digunakan merupakan milik Laboratorium

Karakterisasi Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi. Gambar 3.6 Dibawah ini menunjukkan gambar dari alat uji XRD.



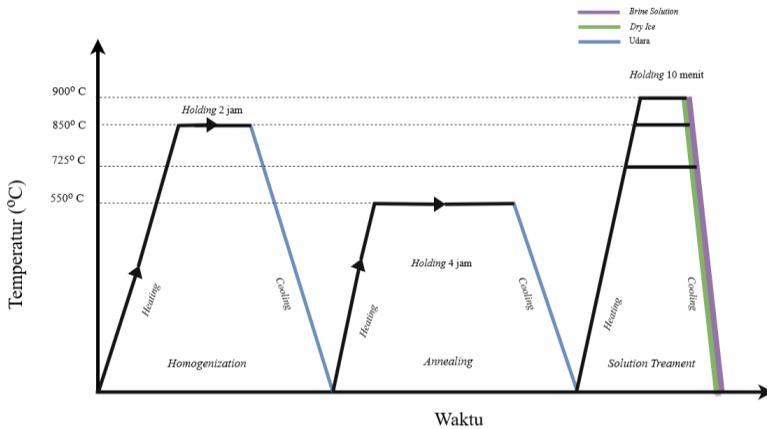
**Gambar 3. 6** Alat uji XRD (Dokumentasi Pribadi)

#### 9. Alat Uji DSC

Alat ini digunakan untuk mengetahui temperatur martensit *start*, martensit *finish*, austenit *start*, serta austenit *finish* dari Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* dengan cara memanaskan paduan yang berfasa martensit dari temperatur kamar hingga temperatur tertentu. Alat akan mendeteksi perubahan kalor secara endotermik maupun eksotermik yang menandakan terjadinya awal dan akhir perubahan fasa pada temperatur tertentu. Alat uji DSC yang digunakan merupakan milik Laboratorium Energi dan Lingkungan LPPM-ITS.

#### 3.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah variasi Temperatur *Solution treatment* dan Media Pendingin dengan menggunakan *brine solution* dan *dry ice* Gambar 3.6 dibawah ini merupakan kurva perlakuan panas pada penelitian ini.



**Gambar 3. 7** Kurva perlakuan panas penelitian

### 3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang berbeda, yaitu:

#### 3.5.1 Prosedur Proses Perlakuan Panas *homogenizing*

1. Menyiapkan spesimen.
2. Menyiapkan *furnace* untuk perlakuan panas.
3. Memasukkan spesimen ke dalam *furnace*, kemudian dipanaskan hingga temperatur 850°C dengan waktu tahan selama 2 jam.
4. Mengeluarkan spesimen dari *furnace* dan melakukan pendinginan dengan media udara.

#### 3.5.2 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Annealing*

1. Menyiapkan spesimen hasil perlakuan panas *homogenizing* dengan media pendingin udara.
2. Menyiapkan *furnace* untuk perlakuan panas.
3. Memasukkan spesimen ke dalam *furnace*, kemudian dipanaskan hingga temperatur 550°C dengan waktu tahan selama 4 jam.

4. Mengeluarkan spesimen dari *furnace* dan melakukan pendinginan dengan media udara.

### 3.5.3 Prosedur Proses Perlakuan Panas *Solution treatment*

1. Menyiapkan spesimen hasil perlakuan panas *Annealing*.
2. Menyiapkan *furnace* untuk perlakuan panas.
3. Memasukkan spesimen ke dalam *furnace*, kemudian dipanaskan hingga temperatur 850°C ditahan selama 10 menit.
4. Mengeluarkan spesimen dari *furnace* dan diquench dengan media pendingin *brine solution*.
5. Mengulangi langkah 1-4 tetapi dengan temperatur yang berbeda yaitu, 750°C, 800°C, dan 900°C ditahan selama 10 menit.
6. Menyiapkan media pendingin *brine solution* dan *dry ice* untuk *quenching* spesimen.

## 3.6 Proses Pengujian

Pada penelitian ini akan dilakukan lima pengujian, yaitu: pengujian SEM untuk mengetahui strukturmikro dari bahan yang diuji, pengujian XRD untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada bahan yang diuji, pengujian kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan bahan, pengujian DSC untuk mengetahui transformasi temperatur pada bahan yang diuji, pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro dari bahan yang diuji, dan pengujian *shape memory effect* untuk mengetahui *shape memory recovery* dari bahan yang diuji.

### 3.6.1 Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kekerasan dari sampel yang diuji. Sebelum diuji spesimen dipreparasi hingga permukaannya halus. Pengujian menggunakan metode Vickers sesuai dengan standar ASTM E92-17.

---

### 3.6.2 Pengujian XRD

Tujuan uji XRD dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada sampel yang diuji. Pengujian dilakukan pada spesimen dengan tebal dan luas permukaan tidak lebih dari 4 mm.

### 3.6.3 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui strukturmikro dari spesimen yang diuji. Prinsip pengujian ini adalah dengan mengamati permukaan spesimen yang sebelumnya sudah dipreparasi, dipolish, dan di etsa dan kemudian diamati dengan menggunakan alat mikroskop optik.

### 3.6.4 Pengujian *Shape Memory Effect*

Pengujian *shape memory effect* ialah untuk mengetahui presentase *recovery* dari spesimen yang telah ditekuk pada derajat tertentu. Spesimen yang diuji berupa *wire* sepanjang 10cm dengan tebal 0.3-3mm.

### 3.6.5 Pengujian DSC

Pengujian DSC ini bertujuan untuk mengetahui  $T_{As}$ ,  $T_{Af}$ ,  $T_{Ms}$ , dan  $T_{Mf}$  dari sampel yang diuji. Pengujian dilakukan pada spesimen dengan tebal 1 mm dan diameter 3 mm.

## 3.7 Rancangan Penelitian

Pada Tabel 3.1, diperlihatkan tentang rencana dari penelitian ini untuk mendapatkan data yang sistematis.

**Tabel 3. 1** Rancangan Penelitian

Komposisi	Variabel Temper atur <i>Solution treatme nt</i>	Media Pendingin	Nama Spesimen	Metode Pengujian				
				Uji Metalografi	Uji XRD	Uji Kekerasan	Uji DSC	Uji Efek <i>Shape memory alloy</i>
Cu - 21 Zn - 5 Al	-	-	AC	✓	✓	✓	-	-
	-	Udara	H850	✓	-	-	-	-
	-	-	AM	✓	-	-	-	-
	-	Udara	A550	✓	-	-	-	-
	750°C	<i>Brine</i>	750-BC	✓	✓	✓	-	✓
		<i>Dry ice</i>	750-DC	✓	✓	✓	-	✓
	850°C	<i>Brine</i>	850-BC	✓	✓	✓	-	✓
		<i>Dry ice</i>	850-DC	✓	✓	✓	✓	✓
	900°C	<i>Brine</i>	900-BC	✓	✓	✓	-	✓
		<i>Dry ice</i>	900-DC	✓	✓	✓	-	✓

Keterangan:

AC (*As cast*)

H850 (Homogenisasi Temperatur 850°C)

AM (*After Machining*)

A550 (*Annealing* Temperatur 550°C)

BC (*Brine Cooling*)

DC (*Dry ice Cooling*)

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

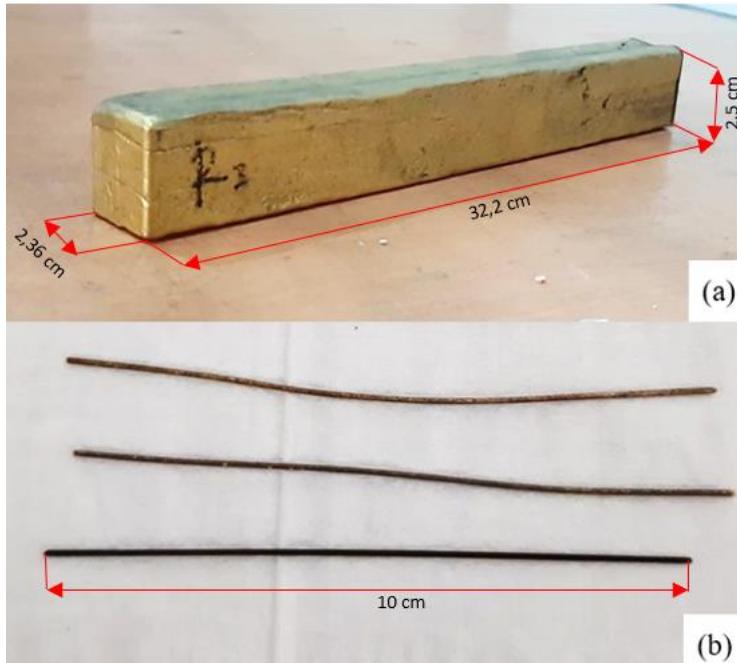
### 4.1 Logam Paduan dan Hasil Proses *Machining* Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys*

Sebelum spesimen paduan diberi perlakuan panas, pada Spesimen dilakukan pengujian komposisi dengan menggunakan uji *X-Ray Fluorescence* (XRF) menggunakan alat uji PANalytical MiniPal4 XRF. Pada Tabel 4.1 menunjukkan tabel komposisi Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* berdasarkan standar, dan logam paduan. Kemudian didapatkan komposisi logam paduan yaitu, Cu-21 Zn-5 Al.

**Tabel 4.1** Tabel komposisi standar dan paduan Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys*

Keterangan	Komposisi		
	Cu(%)	Zn(%)	Al (%)
<i>ASM Handbook Volume 2 Chapter: Shape Memory Alloy</i>	<i>Balance</i>	10 - 35	4 - 10
Hasil	<i>Balance</i>	21	5

Paduan Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* yang telah dilakukan proses *machining* dengan dimensi sesuai standar ASTM F2082-01 dan paduan Cu-21 Zn-5 Al yang belum dilakukan proses *machining* dapat dilihat pada Gambar 4.1.

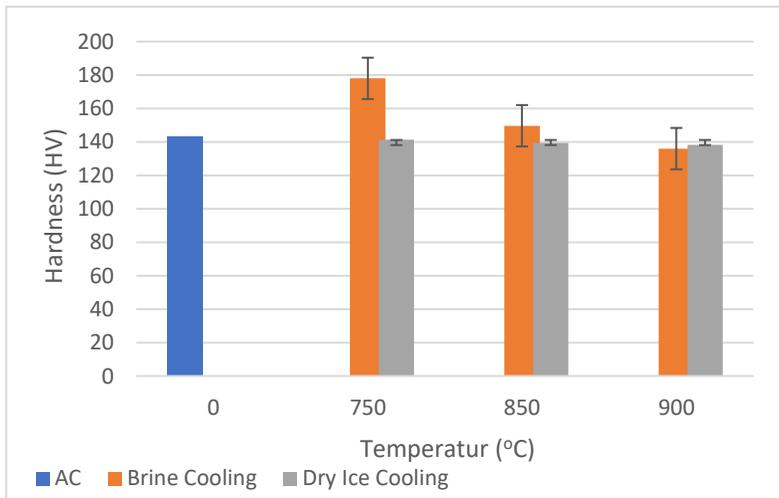


**Gambar 4.1** Spesimen Cu-Zn- Al *shape memory alloys* (a) Sebelum proses *machining* ; (b) Setelah proses *machining*.

Pada Gambar 4.1 merupakan paduan Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* sebelum dan sesudah proses *machining*. Pada Gambar 4.1 (a), paduan Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* berbentuk balok dengan ukuran panjang, lebar, dan tinggi sebesar 32,2 cm, 2,36 cm, dan 2,5 cm. Paduan berwarna kuning seperti warna *brass* atau kuningan pada umumnya. Kemudian dilakukan proses *machining* pada paduan menggunakan alat *wire cut* CNC. Hasil proses *machining* memiliki bentuk kawat/*wire* dengan diameter dan panjang sebesar 1 mm dan 10 cm. Hasil proses *machining* ini dilakukan untuk membentuk spesimen uji efek *shape memory* yang sesuai dengan standar ASTM F-2082.

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

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui ketahanan paduan Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* terhadap indentasi dan goresan dengan metode Vickers. Alat yang digunakan pada pengujian ini adalah *Universal Hardness Tester HBRV 187,5 A*. Sebelum di uji, spesimen dilakukan perlakuan panas *homogenizing, annealing* dan *solution treatment* dengan variabel media pendingin berupa *brine solution* dan *dry ice*. Setelah itu, spesimen di preparasi permukaannya hingga halus dan dipolish agar titik yang diuji terlihat jelas. Beban yang diberikan pada spesimen paduan sebesar 30 kgf dengan waktu indentasi selama 10 detik. Setiap spesimen paduan dilakukan pengujian pada 3 titik yang berbeda. Nilai hasil uji kekerasan pada tiap spesimen, dapat dilihat pada Gambar 4.2



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

Dari hasil pengujian kekerasan pada Gambar 4.2 Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* menunjukkan bahwa kekerasan pada

spesimen AC adalah  $134.33 \pm 2.89$  HV, spesimen 750-BC adalah  $178 \pm 1$  HV, spesimen 750-DC adalah  $141.3 \pm 1.154$  HV, spesimen 850-BC adalah  $149.67 \pm 1.52$  HV, spesimen 850-DC adalah  $139.3 \pm 1.15$  HV, spesimen 900-BC adalah  $136 \pm 0$  HV, dan spesimen 900-DC adalah  $138.3 \pm 1$  HV. Nilai kekerasan pada Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* berdasarkan Gambar 4.2 menunjukkan bahwa kekerasan setelah diberikan perlakuan panas *solution treatment* dan quenched mengalami penurunan dengan kekerasan yang paling kecil terjadi pada spesimen AC dan kekerasan paling besar adalah spesimen 750-BC.

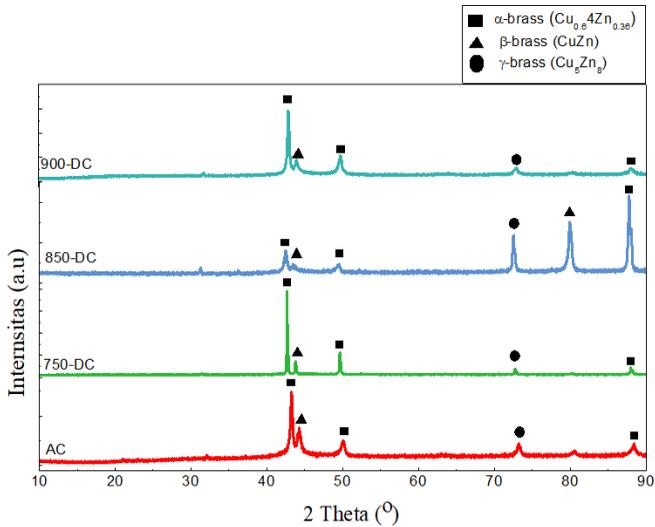
Menurut Sadayappan (2004), sifat keras pada Cu-Zn-Al *shape memory alloys* berasal dari adanya fasa  $\beta$ , karena fasa memiliki sifat yang keras dan rapuh pada paduan Cu-Zn. Unsur Al dapat meningkatkan fasa  $\beta$  dan nilai kekerasan. Dengan perlakuan pendinginan cepat, akan terbentuk fasa martensit. Semakin cepat laju pendinginan, maka fasa martensit yang terbentuk akan semakin cepat dan banyak. Pada baja, sifat martensit adalah keras. Namun, pada *shape memory alloys*, sifat martensit adalah lunak, menurut ASM *Handbook Volume 9*. Adapun menurut Asanovic tahun 2007, fasa  $\alpha$  lebih lunak daripada fasa  $\beta$ . Dapat disimpulkan bahwa struktur mikro dengan presentase fasa  $\alpha$  yang lebih banyak akan membuat nilai kekerasan semakin kecil. Hal tersebut sesuai dengan hasil uji metalografi dimana spesimen dengan luas area fasa  $\alpha$  lebih banyak memiliki nilai kekerasan yang rendah seperti pada spesimen AC. Selain jenis fasa yang mempengaruhi terdapat pula bentuk butir yang mempengaruhi nilai kekerasan, menurut Newey tahun 1990, mikro struktur dengan butir yang lebih halus memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi daripada mikro struktur dengan butir yang lebih kasar. Hal tersebut menyebabkan mengapa nilai kekerasan spesimen 750-BC memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi dan semakin tinggi temperatur *solution treatment* semakin rendah pula nilai kekerasannya.

Dari pengujian kekerasan dapat diketahui bahwa peningkatan nilai kekerasa mempengaruhi kekuatan luluh yang semakin meningkat pula. Kedua hal tersebut juga mempengaruhi

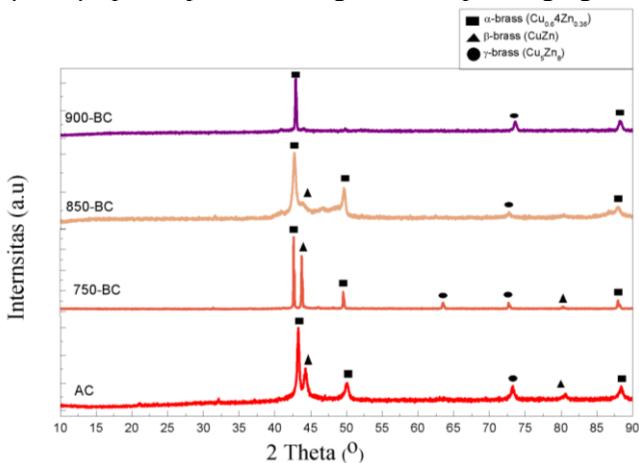
nilai modulus resilien dimana semakin meningkatnya kekuatan luluh, maka energi yang diserap saat mengalami deformasi elastis semakin besar. Dari hasil pengujian kekerasan dapat diketahui spesimen dengan nilai kekerasan yang paling tinggi, spesimen 750-BC, memiliki sifat yang lebih sulit mengalami deformasi plastis dibandingkan variabel lainnya.

#### **4.3 Hasil Pengujian XRD Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys***

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui transformasi fasa apa saja yang terdapat dalam spesimen Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* sebelum dan setelah melalui proses perlakuan panas dengan variasi media pendingin. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan dengan menggunakan alat uji PAN Analytical XRD. Departemen Teknik Material FTI-ITS. Hasil dari pengujian, kemudian dianalisa dengan menggunakan *software High Score Plus-Marven* PAN Analytical untuk membandingkan *peak* yang terbentuk dengan data standar ICDD (*International Centre for Diffraction Data*) sesuai fasa tersebut. Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 memperlihatkan pola grafik XRD dari masing-masing spesimen Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys*.



**Gambar 4. 3** Grafik Hasil Pengujian XRD Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* pada spesimen dengan media pendinginan *dry ice*



**Gambar 4. 4** Grafik Hasil Pengujian XRD Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* pada spesimen dengan media pendinginan *brine*

Analisis pola pengujian XRD dilakukan dengan menggunakan *software Origin*. Hasil pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 terlihat spesimen *As cast* (AC), *peak* yang terbentuk untuk fasa  $\alpha$ -brass ( $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ ) terletak pada posisi  $2\theta$   $42,325^\circ$  pada bidang (1,1,1), posisi  $2\theta$   $49,275^\circ$  pada bidang (2,0,0) dan posisi  $2\theta$   $87,454^\circ$  pada bidang (3,1,1). Hal ini sesuai dengan kode refrensi 00-050-1333. Fasa  $\alpha$ -brass ( $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ ) ini memiliki struktur kristal kubik. Hal ini sesuai dengan kode refrensi 00-050-1333. Fasa  $\alpha$ -brass ( $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ ) juga muncul pada semua spesimen hasil variasi media pendingin. Intensitas fasa  $\alpha$ -brass ( $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ ) memiliki *peak* intensitas yang paling tinggi pada spesimen 750-BC dan 750-DC.

Selain fasa  $\alpha$ -brass, juga terbentuk fasa  $\beta$ -brass dan  $\gamma$ -brass. Untuk fasa  $\beta$ -brass (CuZn) terletak pada posisi  $2\theta$   $42,612^\circ$  pada bidang (1,1,1) dan posisi  $2\theta$   $78,306^\circ$  pada bidang (3,0,0). Hal ini sesuai dengan kode refrensi 00-002-1231. Fasa  $\beta$ -brass (CuZn) ini memiliki struktur kristal kubik. Fasa  $\beta$ -brass (CuZn) juga muncul pada semua spesimen hasil media pendingin. Hal ini sesuai dengan kode refrensi 00-006-0657. Fasa  $\beta$ -brass (CuZn) juga muncul pada semua spesimen hasil variasi media pendingin. Intensitas fasa  $\beta$ -brass (CuZn) memiliki *peak* intensitas yang paling tinggi pada spesimen 750-BC.

Dan untuk fasa  $\gamma$ -brass ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) terletak pada posisi  $2\theta$   $74,119^\circ$  pada bidang (4,4,4). Fasa  $\gamma$ -brass ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) ini memiliki struktur kristal kubik. Hal ini sesuai dengan kode refrensi 01-078-2831. Fasa  $\gamma$ -brass ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) juga muncul pada semua spesimen hasil media pendingin. Intensitas fasa ini, pada spesimen AC maupun dengan semua spesimen variabel media pendingin memiliki intensitas yang relatif rendah. Dan jika dibandingkan dengan fasa  $\alpha$ -brass dan  $\beta$ -brass, memiliki intensitas yang paling rendah dan sangat kecil.

Dari fasa yang muncul pada pengujian XRD, menunjukkan kesesuaian dengan diagram ternary Cu-Zn-Al yang dijelaskan pada penelitian yang dilakukan oleh Asanovic tahun 2007 yang menyebutkan bahwa dengan adanya fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  bila diberi

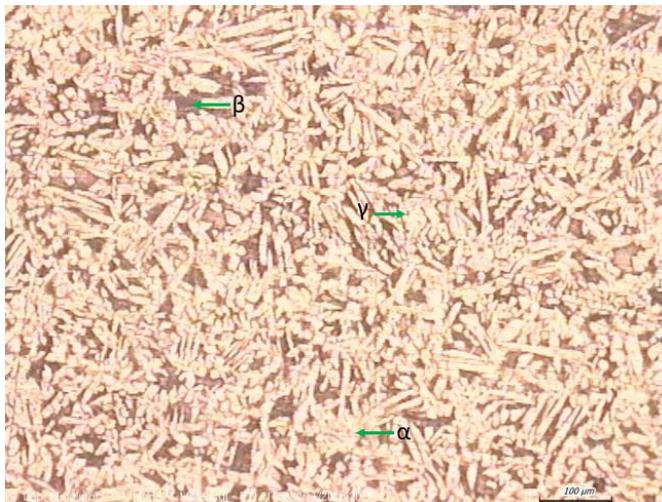
perlakuan panas pada temperatur tertentu lalu kemudian didinginkan dengan cepat, maka fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  akan bertransformasi menjadi fasa  $\beta'$  atau martensit. Transformasi yang terjadi berupa terlarutnya fasa  $\alpha$  ke dalam fasa  $\beta$ . Sehingga menyebabkan peningkatan fasa  $\beta$  dan penurunan fasa  $\alpha$ . Hal tersebut terbukti pada spesimen AC dan spesimen Cu-21 Zn-5 Al dengan media pendingin *dry ice* memiliki fasa  $\alpha$  lebih dominan dibanding dengan fasa  $\beta$  yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Namun sebaliknya, pada spesimen Cu-21 Zn-5 Al dengan media pendingin *brine solution* memiliki fasa  $\beta$  lebih dominan dibanding dengan fasa  $\alpha$ .

#### **4.4 Hasil Pengujian Metalografi Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys***

Pengamatan struktur mikro paduan Cu-21 Zn-5 Al yang telah diberi perlakuan panas dilakukan dengan pengujian metalografi sesuai ASTM E-407. Pengujian metalografi telah dilakukan dengan preparasi permukaan spesimen (*grinding* dan *polishing*) lalu pengetsaan (*etching*) dengan metode *immerse* menggunakan larutan etsa khusus Cu-Zn dengan bahan 5 gram  $\text{FeCl}_3$ , 100 ml etanol, dan 10 ml HCl selama 10 detik. Spesimen kemudian diobservasi menggunakan mikroskop optik milik OLYMPUS BX51M-RF. Pada pengamatan mikrostruktur pada spesimen paduan Cu-21 Zn-5 Al didapatkan terbentuknya 4 fasa yaitu  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$  (martensit) dan  $\gamma$ . Dari pengamatan yang telah dilakukan dapat dianalisis perbandingan jumlah fasa tersebut menggunakan FIJI.app pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 2** Hasil Analisis Perbandingan Jumlah Fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  dan  $\beta'$  Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys*

Spesimen	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\beta'$
AC	67.15	31.93	0.92	-
H850	64.13	31.44	1.25	-
AM	66.29	5.42	0.81	27.04
A550	65.91	6.97	2.12	25
750-BC	38.10	30.67	2.31	28.92
750-DC	52.09	26.42	1.03	20.46
850-BC	24.29	19.09	0.6	61.02
850-DC	54.66	13.68	0.72	30.94
900-BC	33.54	14.96	1.08	50.42
900-DC	51.34	12.02	1.02	35.62



**Gambar 4. 5** Hasil Pengujian Metalografi Spesimen AC Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* Perbesaran 100x

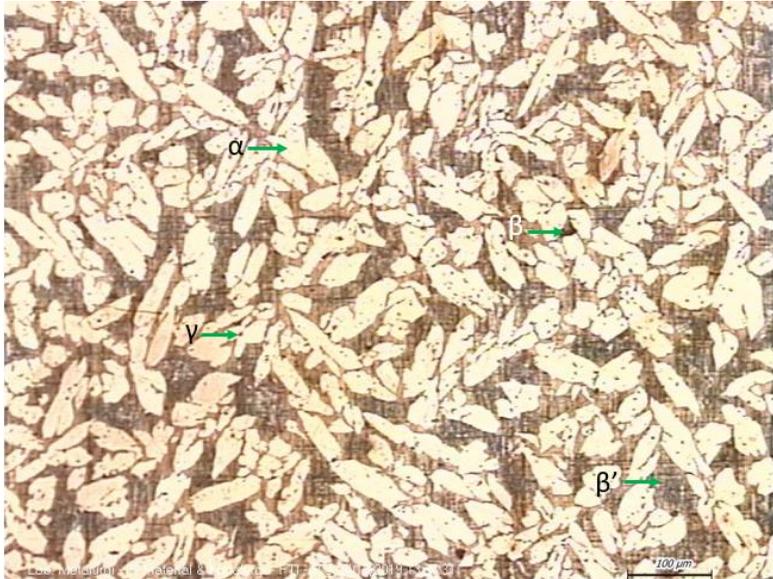
Pada Gambar 4.5 merupakan hasil pengujian Metalografi pada spesimen AC Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* dengan perbesaran 100x. Dari hasil pengamatan secara keseluruhan terbentuk 3 fasa, yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  yang sesuai dengan diagram fasa terner Cu-21 Zn-5 Al. Fasa  $\alpha$  berwarna terang, fasa  $\beta$  berwarna gelap akibat terkorosi karena proses etsa, dan fasa  $\gamma$  berbentuk seperti titik hitam menurut ASM Metal *Handbook volume 9* tahun 2004. Dengan munculnya fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  dapat diindikasikan adanya efek *shape memory*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Asanovic tahun 2007 yang menyebutkan bahwa bahwa adanya fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  dapat mengindikasikan adanya efek *shape memory* pada spesimen *shape memory alloys* karena munculnya fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  bila diberi perlakuan panas pada temperatur tertentu lalu kemudian didinginkan dengan cepat, maka fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  akan bertransformasi menjadi fasa  $\beta'$  atau martensit. Dari segi perbandingan jumlah fasa  $\alpha$  dan pada struktur mikro, terlihat fasa  $\alpha$  lebih dominan dibanding fasa lainnya. Hal ini dibuktikan dengan analisis menggunakan FIJI.App pada Tabel 4.3 dimana fasa  $\alpha$  memiliki 67.15%, fasa  $\beta$  memiliki 31.93%, dan fasa  $\gamma$  memiliki 0.92%.



**Gambar 4. 6** Hasil Pengujian Metalografi Spesimen H850 Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* Perbesaran 100x

Pada Gambar 4.6 merupakan hasil pengujian Metalografi pada spesimen H850 Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* dengan perbesaran 100x. Spesimen H850 merupakan paduan Cu-21 Zn-5 Al yang telah dilakukan proses homogenisasi pada temperatur 850°C selama 2 jam lalu didinginkan dengan media udara. Menurut ASM Volemu 4 1992, homogenisasi adalah proses perlakuan panas pada logam dengan temperature 700 – 1000°C dan didinginkan secara lambat yang berfungsi untuk membuat struktur mikro menjadi lebih homogen dan kasar. Dari hasil pengamatan secara keseluruhan butir yang terbentuk lebih besar atau struktur mikro yang lebih kasar daripada spesimen AC. Fasa yang terbentuk masih sama seperti spesimen AC, yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  yang sesuai dengan diagram fasa terner Cu-21 Zn-5 Al. Fasa  $\alpha$  berwarna terang, fasa  $\beta$  berwarna gelap akibat terkorosi karena proses *etching*, dan fasa  $\gamma$  berbentuk seperti titik hitam menurut ASM Metal *Handbook Volume 9* tahun 2004. Dari segi perbandingan jumlah fasa  $\alpha$  dan

pada struktur mikro, terlihat fasa  $\alpha$  lebih dominan dibanding fasa. Hal ini dibuktikan dengan analisis menggunakan FIJI.App pada Tabel 4.3 dimana fasa  $\alpha$  memiliki 64.13%, fasa  $\beta$  memiliki 31.44%, dan fasa  $\gamma$  memiliki 1.25%.



**Gambar 4. 7** Hasil Pengujian Metalografi Spesimen AM Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* Perbesaran 100x.

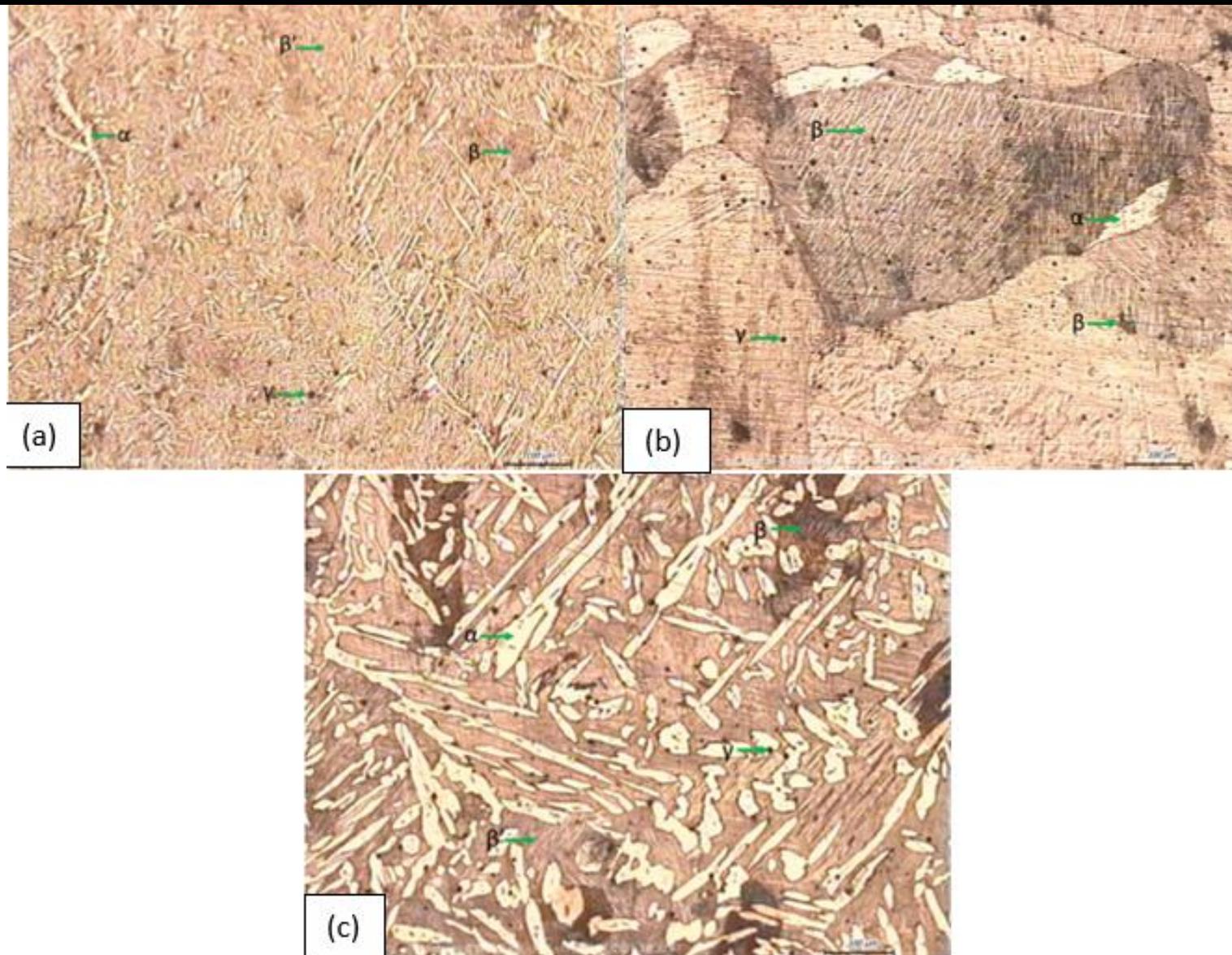
Pada Gambar 4.7 merupakan hasil pengujian Metalografi pada spesimen AM Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* dengan perbesaran 100x. Spesimen AM merupakan spesimen H850 yang telah dilakukan proses *machining* menggunakan *wire cut* CNC. Menurut Chockalingam 2016, metode proses *machining wire cut* CNC dilakukan menggunakan sebuah kawat elektroda (*electrode wire*) panas yang bergerak menembus benda kerja. Di antara kawat dan benda kerja terdapat air yang terdeionisasi yang akan menyebabkan air menjadi air murni yang berfungsi sebagai insulator dan *coolant*. Dari hasil pengamatan secara keseluruhan

masih terbentuk 3 fasa seperti spesimen AC dan H850 yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ . Fasa  $\alpha$  berwarna terang, fasa  $\beta$  berwarna gelap akibat terkorosi karena proses *etching*, dan fasa  $\gamma$  berbentuk seperti titik hitam menurut ASM Metal *Handbook volume 9* tahun 2004. Selain itu, terbentuk pula fasa martensit atau fasa  $\beta'$ . Fasa  $\beta'$  berbentuk seperti jarum-jarum tajam kecil atau disebut lamellar martensit seperti yang terdapat pada ASM Metal *Handbook volume 9* tahun 2004. Menurut Gialanella 2001, terbentuknya fasa martensit diakibatkan transformasi dari fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  oleh pendinginan cepat. Proses pendingin cepat tersebut terjadi saat air *coolant* mengenai spesimen AM setelah dipotong oleh kawat bertemperatur tinggi. Dari segi perbandingan jumlah fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$ , dan  $\gamma$  pada struktur mikro, terlihat fasa  $\alpha$  lebih dominan dibanding fasa lainnya. Hal ini dibuktikan dengan analisis menggunakan FIJI.App pada Tabel 4.3 dimana fasa  $\alpha$  memiliki 66.29%, fasa  $\beta$  memiliki 5.42%, fasa  $\beta'$  memiliki 27.04% dan fasa  $\gamma$  memiliki 0.81%.

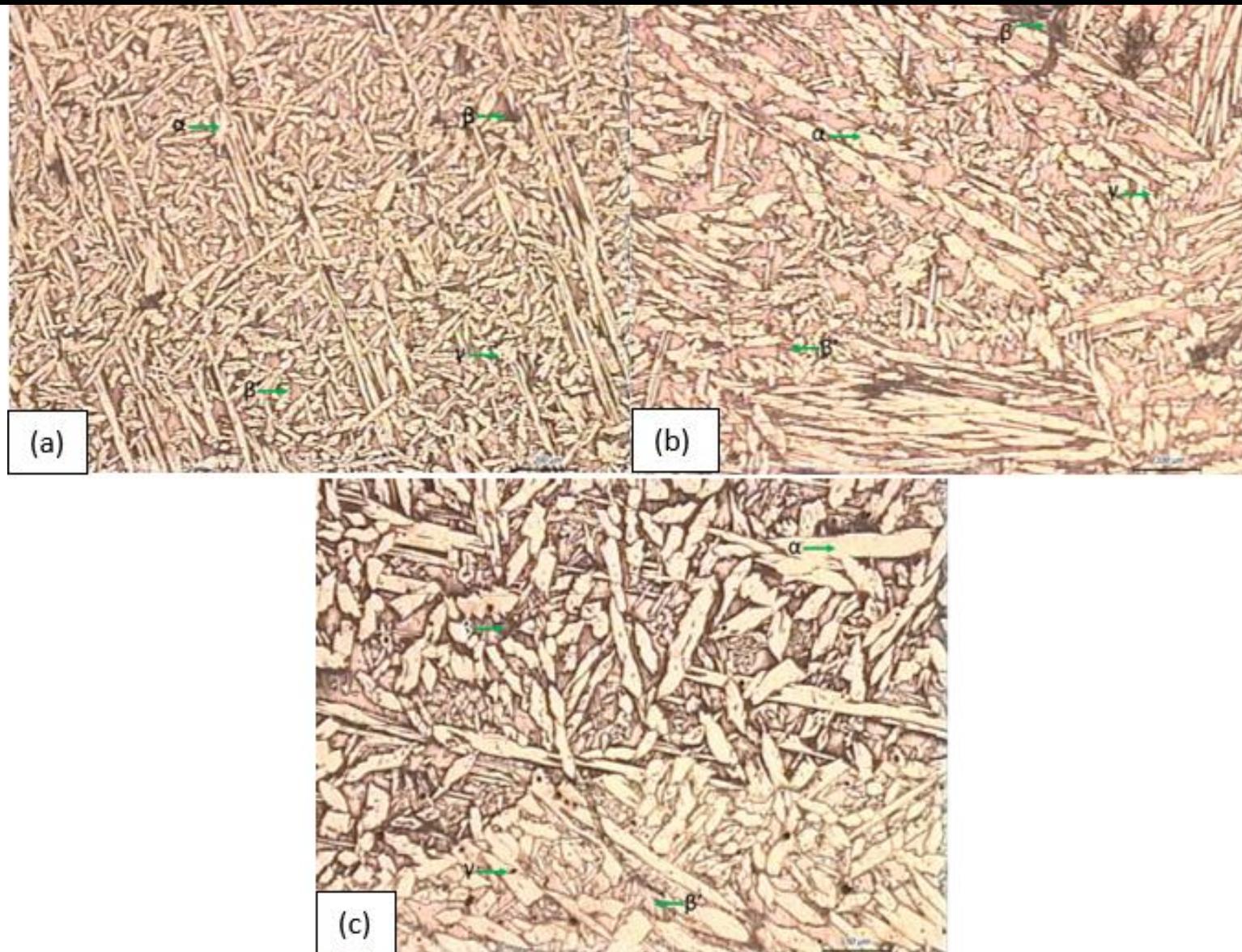


**Gambar 4. 8** Hasil Pengujian Metalografi Spesimen A550 Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* Perbesaran 100x

Pada Gambar 4.8 merupakan hasil pengujian Metalografi pada spesimen A550 Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* dengan perbesaran 100x. Spesimen H850 merupakan paduan Cu-21 Zn-5 Al yang telah dilakukan proses *annealing* pada temperatur 550°C selama 4 jam lalu didinginkan dengan media udara. Menurut ASM *Metal Handbook Volume 4 1992*, proses *annealing* merupakan perlakuan panas dengan memanaskan sampai temperatur tertentu, kemudian menahannya pada temperatur tersebut, dan didinginkan dengan lambat yang berfungsi untuk melunakkan dan memperhalus atau memperkasar bentuk butir. Dari hasil pengamatan secara keseluruhan butir yang terbentuk lebih besar atau struktur mikro yang lebih kasar daripada spesimen AM dan luas fasa  $\alpha$  lebih besar sehingga menjadikan specimen menjadi lebih lunak. Fasa yang terbentuk masih sama seperti spesimen AM, yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$ , dan  $\gamma$ . Fasa  $\alpha$  berwarna terang, fasa  $\beta$  berwarna gelap akibat terkorosi karena proses *etching*, fasa  $\beta'$  seperti jarum-jarum tajam kecil atau disebut lamellar martensit, dan fasa  $\gamma$  berbentuk seperti titik hitam menurut ASM *Metal Handbook* tahun 2004. Dari segi perbandingan jumlah fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  pada struktur mikro, terlihat fasa  $\alpha$  lebih dominan dibanding fasa lainnya. Hal ini dibuktikan dengan analisis menggunakan FIJI.App pada Tabel 4.3 dimana fasa  $\alpha$  memiliki 65.91%, fasa  $\beta$  memiliki 6.97%, fasa  $\beta'$  memiliki 25%, dan fasa  $\gamma$  memiliki 2.12%.



**Gambar 4. 9** Hasil Pengujian Metalografi Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* Perbesaran 100x pada Spesimen: (a) 750-BC; (b) 850-BC; dan (c) 900-BC.



**Gambar 4. 10** Hasil Pengujian Metalografi Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys* Perbesaran 100x pada Spesimen: (a) 750-DC; (b) 850-DC; dan (c) 900-DC.

Gambar 4.9 merupakan hasil pengujian Metalografi Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x pada spesimen 750-BC, 850-BC, dan 900-BC. Spesimen tersebut merupakan Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* yang telah diberi perlakuan *solution treatment* pada beberapa temperatur dengan holding time selama 10 menit dan media pendingin *brine solution*. Menurut ASM Vol. 4 1992, proses *solution treatment* adalah proses perlakuan panas yang bertujuan untuk melarutkan sebuah fasa atau presipitat dan mendapatkan sebuah fasa tunggal. Dari fasa tunggal yang dihasilkan pada spesimen kemudian didinginkan dengan cepat agar didapatkan fasa martensit. Pada keempat spesimen tersebut ditemukan 4 fasa yang terbentuk, yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$ , dan  $\gamma$ . Fasa  $\alpha$  berwarna terang, fasa  $\beta$  berwarna gelap akibat terkorosi karena proses etching, fasa  $\beta'$  seperti jarum-jarum tajam kecil atau disebut lamellar martensit, dan fasa  $\gamma$  berbentuk seperti titik hitam menurut ASM *Metal Handbook Volume 9* tahun 2004. Dari segi perbandingan jumlah fasa-fasa tersebut, spesimen 850-BC memiliki fasa  $\beta'$  lebih dominan dibanding fasa dan spesimen lainnya. Hal tersebut sesuai dengan hasil analisis FIJI.app pada Tabel 4.3. Terlihat pula, dari hasil pengamatan secara keseluruhan butir yang terbentuk pada spesiemn 750-BC memiliki struktur mikro yang lebih halus dari pada spesimen lainnya. Menurut penelitian Babouri 2018, semakin tinggi temperatur perlakuan panas pada paduan berbasis tembaga maka butir yang terbentuk akan semakin besar atau kasar.

Pada Gambar 4.10 merupakan hasil pengujian Metalografi Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* dengan perbesaran 100x pada spesimen 750-DC, 850-DC, dan 900-DC. Spesimen tersebut merupakan Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* yang telah diberi perlakuan *solution treatment* pada beberapa temperatur dengan holding time selama 10 menit dan media pendingin *dry ice*. Menurut ASM *Metal Handbook Volume 4* 1992, proses *solution treatment* adalah proses perlakuan panas yang bertujuan untuk melarutkan sebuah fasa atau presipitat dan mendapatkan sebuah fasa tunggal. Dari fasa tunggal yang dihasilkan pada spesimen

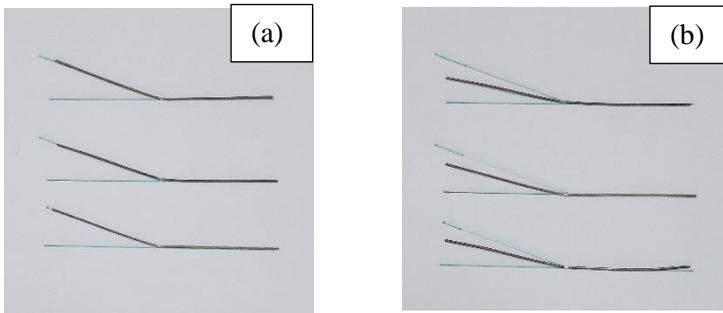
kemudian didinginkan dengan cepat agar didapatkan fasa martensit. Pada keempat spesimen tersebut ditemukan 4 fasa yang terbentuk, yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$ , dan  $\gamma$ . Fasa  $\alpha$  berwarna terang, fasa  $\beta$  berwarna gelap akibat terkorosi karena proses etching, fasa  $\beta'$  seperti jarum-jarum tajam kecil atau disebut lamellar martensit, dan fasa  $\gamma$  berbentuk seperti titik hitam menurut ASM *Metal Handbook Volume 9* tahun 2004. Dari segi perbandingan jumlah fasa-fasa tersebut, ditemukan bahwa fasa  $\beta'$  tiap spesimen memiliki kadar yang hampir sama. Hal tersebut sesuai dengan hasil analisis FIJI.app pada Tabel 4.2. Terlihat pula, dari hasil pengamatan secara keseluruhan butir yang terbentuk pada spesiemn 750-DC memiliki struktur mikro yang lebih halus dari pada spesimen lainnya. Menurut penelitian Babouri tahun 2018, semakin tinggi temperatur perlakuan panas pada paduan berbasis tembaga maka butir yang terbentuk akan semakin besar atau kasar.

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

Pengujian efek *shape memory* dilakukan untuk mengetahui prsentase *recovery* pada spesimen Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys* yang telah terdeformasi. Bentuk spesimen untuk pengujian ini berupa wire dengan ketebalan diameter 1 mm dan panjang 10 cm sesuai dengan standar ASTM F2082. Sebelum di uji, spesimen dilakukan perlakuan panas *homogenizing* pada temperatur 850°C dengan waktu tahan 2 jam, *annealing* pada temperatur 500°C dengan waktu tahan 4 jam, dan *solution treatment* pada beberapa temperatur yaitu 750°C, 850°C, dan 900°C dengan waktu tahan 10 menit serta didinginkan dengan variabel media pendingin yang berbeda (*brine solution* dan *dry ice*). Setelah itu, spesimen ditekuk sebesar 20° dan dipanaskan hingga terjadi *recovery shape*. Gambar 4.11 menunjukkan hasil sebelum dan sesudah terjadi *recovery shape* pada spesimen Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys*. Pengujian dilakukan dengan 3 spesimen tiap variabel media pendinginnya. Tabel 4.4 dibawah ini menunjukkan hasil pengujian efek *shape memory* pada Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys*.

**Tabel 4. 3** Hasil Pengujian Efek *Shape memory* pada Cu-21 Zn5 Al *Shape memory Alloys*

Spesimen	No.	Sudut Awal	Sudut Akhir	Selisih Sudut	<i>Recovery Shape (%)</i>
750-BC	1	20°	16°	4°	13,33%
	2	20°	18°	2°	
	3	20°	18	2	
750-DC	1	20°	18°	2°	10%
	2	20°	18°	2°	
	3	20°	18	2	
850-BC	1	20°	10°	10°	36,67%
	2	20°	13°	7°	
	3	20°	15	5	
850-DC	1	20°	15°	5°	16,67%
	2	20°	18°	2°	
	3	20°	17	3	
900-BC	1	20°	16°	4°	21,67%
	2	20°	15°	5°	
	3	20°	16	4	
900-DC	1	20°	17°	3°	13,33%
	2	20°	17°	3°	
	3	20°	18	2	



**Gambar 4. 11** Spesimen Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory Alloys* Sebelum *Recovery Shape* (a) dan Sesudah *Recovery Shape* (b).

Menurut Kumar (2008), mekanisme efek *shape memory* terjadi karena transformasi fasa yang *reversible* antara fasa austenit dan martensit. Pada spesimen diberikan perlakuan panas *solution treatment* untuk membentuk fasa austenit, dan didinginkan secara cepat untuk membentuk fasa martensit yang berbentuk *twinned* (Gialanella, 2001). Spesimen dideformasi dengan cara dibengkokkan dengan sudut awal  $20^\circ$  untuk mengubah fasa martensit yang berbentuk *twinned* tadi menjadi martensit berbentuk *detwinned*. Hal ini digambarkan pada Gambar 4. 11 (a). Selanjutnya spesimen dipanaskan untuk membentuk fasa austenit kembali dari martensit dan *recovery shape* akan terjadi dengan perubahan sudut pada sudut akhir. Hal ini digambarkan pada Gambar 4.11 (b).

Pada Tabel 4.3 menunjukkan hasil efek *shape memory* pada masing-masing variasi temperatur *solution treatment* dan media pendingin. *Recovery shape* dengan nilai terbesar dimiliki oleh spesimen dengan media pendingin *brine solution* pada temperatur *solution treatment* secara berurutan dari besar ke kecil ialah  $850^\circ\text{C}$  (36,67%),  $900^\circ\text{C}$  (21,67%), dan  $750^\circ\text{C}$  (13,33%). *Recovery shape* dengan nilai terkecil dimiliki oleh spesimen dengan media pendingin *dry ice* pada temperatur *solution treatment* secara berurutan dari besar ke kecil ialah  $850^\circ\text{C}$  (16,67%),  $900^\circ\text{C}$

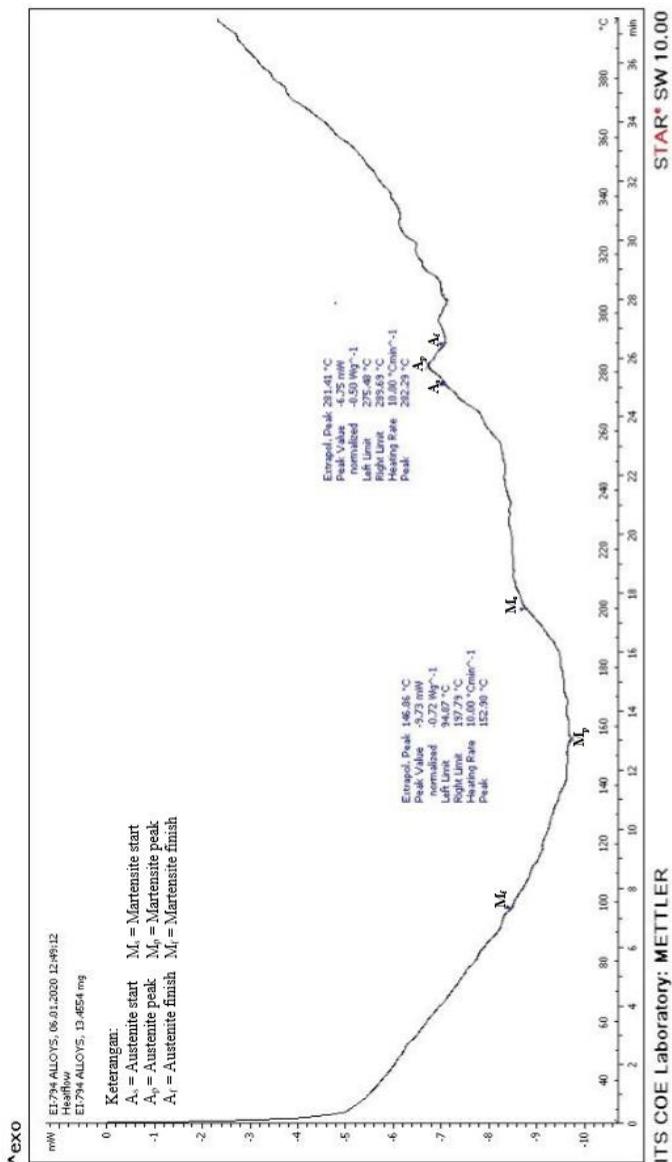
(13,33%), dan 750 ° C (10%). Menurut penelitian Panjaitan tahun 2016, semakin banyak martensit yang terbentuk pada suatu paduan, maka semakin besar efek *shape memory* yang didapat. Hal tersebut terbukti oleh banyaknya martensit pada spesimen dengan media pendingin *brine solution* seperti 850-BC dan terbukti dari hasil uji metalografi pada Lampiran yang memiliki nilai efek *shape memory* yang paling tinggi.

#### 4.6 Hasil Pengujian DSC Cu-21 Zn-5 Al *Shape memory alloys*

Pengujian DSC dilakukan untuk mengetahui suatu transformasi temperatur dari spesimen Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys*. Pengujian ini menggunakan alat Mettler Toledo *Differential Scanning Calorimeter* (DSC) milik Laboratorium Energi dan Lingkungan LPPM-ITS. Sebelum proses pengujian, spesimen *wire* dipreparasi dengan dipotong sepanjang  $\pm 5$  mm. Kemudian di lakukan *solution treatment* pada temperatur 850°C dengan waktu tahan 10 menit dan didinginkan dengan *brine solution*. Pada proses pengujian, kecepatan pemanasan yang digunakan adalah 10°C/menit dan menggunakan range temperatur antara 30° - 300° C. Gambar 4. dibawah ini menunjukkan grafik hasil pengujian DSC Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys*.

**Tabel 4. 4** Temperatur Transformasi Cu-21 Zn-5 Al *Shape Memory Alloy*

Spesimen	A <sub>s</sub> (°C)	A <sub>p</sub> (°C)	A <sub>r</sub> (°C)	M <sub>s</sub> (°C)	M <sub>p</sub> (°C)	M <sub>r</sub> (°C)
Cu-21 Zn-5 Al	275,48	282,29	289,69	197,97	152,9	94,87



**Gambar 4. 12** Grafik Hasil Pengujian DSC Cu-21 Zn-5 Al Shape memory alloys

Dari hasil pengujian DSC yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 menunjukkan ada 2 *peak* yang terbentuk pada grafik. *Peak* pertama yang berada di sebelah kiri terjadi karena reaksi eksotermis dan *peak* kedua yang berada di sebelah kanan terjadi karena reaksi endotermik. Terbentuknya kedua *peak* tersebut sesuai dengan prinsip kerja DSC berdasarkan ASTM E2253 untuk menganalisis reaksi eksotermik dari suatu sampel. Menurut penelitian Alminah pada tahun 2012, terjadinya reaksi eksotermis dan endotermis akibat reaksi yang menyerap energi dan melepas energi. Pada Cu-21 Zn-5 Al, reaksi tersebut berupa perubahan fasa dari martensit ke austenit dan sebaliknya. Pada *peak* eksotermis terjadi penurunan *heat flow* sebesar -9,73 mW. Selain itu terdapat *range* transformasi temperatur pada *peak* tersebut dengan batas kiri adalah  $T = 94,87^{\circ}\text{C}$ , puncak *peak* temperatur adalah  $T = 152,9^{\circ}\text{C}$  batas kanan adalah  $T = 197,97^{\circ}\text{C}$ . Temperatur tersebut disebut juga sebagai transformasi temperatur martensit, dengan martensit *start* ( $M_s$ ) adalah  $197,97^{\circ}\text{C}$ , *peak* martensit ( $M_p$ ) adalah  $152,9^{\circ}\text{C}$  dan martensit *finish* ( $M_f$ ) adalah  $94,87^{\circ}\text{C}$ . Pada *peak* endotermis terjadi peningkatan *heat flow* sebesar -6,75 mW. Terdapat juga *range* transformasi temperatur pada *peak* tersebut dan dikatakan sebagai transformasi temperatur austenit. Dengan batas *peak* kanan disebut austenit *start* ( $A_s$ ) adalah  $275,48^{\circ}\text{C}$ , puncak *peak* disebut *peak* austenit ( $A_p$ ) adalah  $282,29^{\circ}\text{C}$  dan batas *peak* kiri disebut austenit *finish* ( $A_f$ ) adalah  $289,69^{\circ}\text{C}$ .

Tabel 4.5 merupakan tabel transformasi temperatur Cu-21 Zn-5 Al *shape memory alloys*. Dari Tabel 4.5 menunjukkan bahwa martensit terbentuk pada *range* temperatur  $49,37^{\circ}\text{C} - 39,41^{\circ}\text{C}$  dimana hasil ini sesuai dengan pengujian metalografi yang menunjukkan terbentuknya martensit setelah dilakukan *solution treatment* dan *quenched* dengan media *brine solution* dan *dry ice*. Hasil pengujian DSC pada Gambar 4.11 ini juga sesuai dengan ASTM F 2005-00 yang menunjukkan grafik standar pengujian DSC untuk *shape memory alloy* memiliki 2 *peak* transformasi temperatur. Selain itu, pada penelitian Stosic pada tahun 2010 menunjukkan grafik DSC memiliki 2 *peak* (eksotermis dan

---

endotermis) dengan batas temperatur yang dimiliki. Kemudian dijadikan sebagai temperatur transformasi martensit ( $M_s$  dan  $M_f$ ) dan temperatur transformasi austenit ( $A_s$  dan  $A_f$ ).

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Pengaruh variasi temperatur *solution treatment* dan media pendingin pada proses perlakuan panas terhadap *shape memory effect* pada paduan logam Cu-Zn-Al *shape memory alloys* memberikan nilai *recovery shape* yang bervariasi tergantung dengan banyaknya martensit yang terbentuk. Semakin banyak martensit maka, semakin besar pula nilai *recovery shape*. Nilai *recovery shape* terbaik terdapat pada spesimen pada *solution treatment* temperatur 850°C dengan media pendingin *brine solution* sebesar 36,67%.
2. Pengaruh variasi temperatur *solution treatment* dan media pendingin terhadap struktur mikro pada proses perlakuan Cu-Zn-Al *shape memory alloys* menghasilkan adanya 3 fasa yang terbentuk pada semua variasi, yaitu fasa  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ . Selain ketiga fasa tersebut, terbentuk pula fasa martensit atau  $\beta'$  akibat pengaruh temperatur dan media pendingin. Fasa martensit yang terbentuk paling banyak pada *solution treatment* temperatur 850°C dengan media pendingin *brine solution*.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah:

1. Memakai *furnace* yang temperaturnya dapat stabil pada temperatur penelitian pada saat proses perlakuan panas.
2. Menyegerakan melakukan pengujian setelah di lakukan proses pemanasan untuk meminimalisir terjadinya eror.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- \_\_\_ . 1990. **ASM Handbook Volume 2 : Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. ASM *International Handbook* Committee.
- \_\_\_ . 1991. **ASM Handbook Volume 4 : Heat Treating**. ASM *International Handbook* Committee.
- \_\_\_ . 1992. **ASM Handbook Volume 3 : Metallography and Microstructures**. ASM *International Handbook* Committee.
- \_\_\_ . 2004. **ASM Handbook Volume 9 : Alloy Phase Diagrams**. ASM *International Handbook* Committee.
- Alian, H. 2013. Kajian Eksperimental Pengaruh Paduan Timah AKI (10%, 15%, 20%, 25%) Pada Coran Tembaga Pipa AC (AI Conditioner) Berkas Terhadap Sifat Mekanik. *Jurnal Rekayasa Mesin Universitas Sriwijaya*, vol. 13, no. 1, 2013, pp. 35-53.
- Asanovic, V., Delijic, K. 2007. The Mechanical Behavior And Shape Memory Recovery of Cu-Zn-Al Alloys. **Metlurgija: Journal of Metallurgy**.13.
- Avner, Sidney H. 1974. **Introduction to Physical Metallurgy**. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Babouri, Laidi, Belmokre, K., Kabir, A., Abdelouas, A., Khettabi, R., El Mendili, Y. 2018. Microstructure and crystallographic properties of Cu<sub>77</sub>Zn<sub>21</sub> alloy under the effect of heat treatment. **Materials at High Temperatures**, 36:2, 165-172,
- Balfas, Aminah. 2012. **Analisis Termal Bionanokomposit Filler Serat Kulit Rotan**. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Callister, William. 2013. **Material Science and Engineering An Introduction 9th Edition**. New York : JohnWiley & Sons, Inc.
- 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., 1987. **Mechanical Metallurgy, 3rd Ed.**, McGraw-Hill Book Co.
- Ginting, A. B., Sutri, I., & Jan, S. (2005). Penentuan parameter uji dan ketidakpastian pengukuran kapasitas panas pada differential scanning calorimeter. **Jurnal Teknologi Bahan Nuklir**, 1(1), 1-57.
- Gomidzelovic, Lidija, E. Pozega, A. Kostov, N. Vukovic, V. Krstic, D. Zivkovic, L. Balanovic. 2015. Thermodynamics and Characterization of *Shape memory Cu-21 Zn-5 Al Alloys*. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** **25:2630 – 2636.**
- Groover, M. 2010. **Fundamental Of Modern Manufacture 4th Edition.** USA : JohnWiley & Sons, Inc.
- Jamaludin, Agus dan Darma Adiantor. 2012. Analisis Kerusakan X-Ray Fluoresence (XRF). **Pusat Penelitian dan Pengembangan Ilmu Pengetahuan No. 09 – 10: 19-28**
- Juliaptini, Devinta. 2010. **Analisis Sifat Mekanik Dan Metalografi Baja Karbon Rendah Untuk Aplikasi Tabung Gas 3 Kg.** Jakarta : Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah
- Kumar, P.K. dan D.C. Lagoudas. 2008. **Shape memory alloys : Modeling and Engineering Applications.** Springer : US.
- Kunjam, Chockalingam. 2016. **Optimization in CNC Wire Cut EDM.** India: Thiagarajar Collageof Engineering.
- Lovey, F.C., Cesari, E. 1990. On the Microstructural Characteristics of Non-equilibrium  $\gamma$  Precipitates in Cu-Zn-Al Alloys. **Materials Science and Engineering: A, Volume 129, Issue 1: 127-133,**
- Lobo, Paulo Silvia, J. Almeida, L. Guerreiro. 2015. Shape Memory Alloys Behaviour: A Review. **Procedia Engineering, 114:776-783.**
-

- 
- Martinez, O.E., Cesa, Y., Mingolo, N., Romero, R. 2005. Photoacoustic Detection Of Phase Transitions With A Resonant Piezoelectric Scheme With Extreme Sensitivity To Small Volume Changes. **Applied Physics B: Lasers and Optics. 80:** 365-371.
- Newey, C., Weaver, G. 1990. **Materials Principles and Practice. Butterworth-Heinemann:** Britania Raya.
- Sadayappan, M. 2004. **Grain Refinement of Permanent Mold Cast Copper Base Alloys.** USA: Materials Technology Laboratory
- 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
- Suherman, Wahid. 2003. **Ilmu Logam I.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Thelning, Karl-Erik. 1984. **Steel and Its Heat Treatment.** Delhi: Replika Press Pvt Ltd.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN

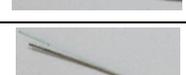
### 1. Komposisi Logam Cu-Zn-Al *Shape Memory Alloy*

<b>EI – 711</b>		
Suhu : 24,9 C.		
Kelembaban : 49%.		
Berat : 25,4806 gram		
<b>Metode:</b>		
1. Tanpa Standar		
2. Filter Al		
3. Medium Udara		
4. Waktu 60		
5. Energi 30 KV		
<b><u>Hasil</u></b>		
Compound	Conc	Unit
Cu	71.05	0%
Zn	21	0%
Al	5	0%
Co	0.009	0%
Ni	0.17	0%
Nb	0.1	0%
Pb	2	0%
Ca	0.2	0%
Fe	0.36	0%

## 2. Perhitungan Uji Kekerasan

Paduan	Titik	<i>Hardness</i> (HV)	Rata-Rata <i>Hardness</i> $\pm$ Standar Deviasi (HV)
AC	1	136	134.33 $\pm$ 2.89
	2	136	
	3	131	
750-BC	1	179	178 $\pm$ 1
	2	178	
	3	177	
750-DC	1	142	141.3 $\pm$ 1.154
	2	142	
	3	140	
850-BC	1	151	149.67 $\pm$ 1.52
	2	150	
	3	148	
850-DC	1	140	139.3 $\pm$ 1.15
	2	140	
	3	138	
900-BC	1	136	136 $\pm$ 0
	2	136	
	3	136	
900-DC	1	141	138.3 $\pm$ 1
	2	140	
	3	139	

3. Perhitungan Uji Efek *Shape Memory*

Temperatur Annealing (°C)	Media Pendingin	Sudut Awal		Sudut Akhir		Selisih Sudut (°)	Rata-rata <i>Recovery</i> (%)
		Gambar	$\theta$ (°)	Gambar	$\theta$ (°)		
750	<i>Brine</i>		20		16	4	13,33%
			20		18	2	
			20		18	2	
	<i>Dry Ice</i>		20		18	2	10%
			20		18	2	
			20		18	2	
850	<i>Brine</i>		20		10	10	36,67%
			20		13	7	
			20		15	5	
	<i>Dry Ice</i>		20		15	5	16,67%
			20		18	2	
			20		17	3	

900	<i>Brine</i>		20		16	4	21,67%
			20		15	5	
			20		16	4	
	<i>Dry Ice</i>		20		17	3	13,33%
			20		17	3	
			20		18	2	

4. PDF Card kode 00-050-1333  $\alpha$ -brass

**Name and formula**

Reference code:	00-050-1333
Compound name:	Copper Zinc
Common name:	$\alpha$ -brass
Empirical formula:	$Cu_{0,64}Zn_{0,36}$
Chemical formula:	$Cu_{0,64}Zn_{0,36}$

**Crystallographic parameters**

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225
a (Å):	3.6961
b (Å):	3.6961
c (Å):	3.6961
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Calculated density (g/cm <sup>3</sup> ):	8.44
Measured density (g/cm <sup>3</sup> ):	8.43
Volume of cell (10 <sup>6</sup> pm <sup>3</sup> ):	50.49
Z:	4.00
RIR:	-

**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

5. PDF Card kode 00-006-0657  $\beta$ -brass**Name and formula**

Reference code:	00-006-0657
Compound name:	Copper Zinc
Empirical formula:	CuZn
Chemical formula:	CuZn

**Crystallographic parameters**

Crystal system:	Cubic
a (Å):	3.6500
b (Å):	3.6500
c (Å):	3.6500
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Volume of cell (10 <sup>6</sup> pm <sup>3</sup> ):	48.63
RIR:	-

**Peak list**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.12000	42.612	100.0
2	2	0	0	1.83000	49.787	60.0
3				1.30000	72.675	80.0
4	3	0	0	1.22000	78.306	30.0
5	3	1	1	1.10000	88.898	100.0
6				1.06000	93.221	60.0

## 6. PDF Card kode 01-078-2831 $\gamma$ -brass

### Name and formula

Reference code:	01-078-2831
Compound name:	Copper Zinc
Empirical formula:	$\text{Cu}_5\text{Zn}_8$
Chemical formula:	$\text{Cu}_5\text{Zn}_8$

### Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	I-43m
Space group number:	217
a (Å):	8.8560
b (Å):	8.8560
c (Å):	8.8560
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Volume of cell ( $10^6 \text{ pm}^3$ ):	694.56
Z:	4.00
RIR:	7.07

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	0	6.26210	14.132	0.5
2	2	0	0	4.42800	20.036	0.1
3	2	1	1	3.61540	24.604	0.7
4	2	2	0	3.13110	28.484	0.4
5	3	1	0	2.80050	31.931	0.1
6	2	2	2	2.55650	35.073	6.8
7	3	2	1	2.36690	37.985	5.4
8	4	0	0	2.21400	40.721	0.1
9	3	3	0	2.08740	43.311	100.0
10	4	2	0	1.98030	45.782	1.1
11	3	3	2	1.88810	48.156	5.1
12	4	2	2	1.80770	50.443	2.5
13	5	1	0	1.73680	52.657	3.0
14	5	2	1	1.61690	56.902	1.4
15	4	4	0	1.56550	58.950	0.3
16	5	3	0	1.51880	60.952	0.4
17	6	0	0	1.47600	62.917	6.7
18	6	1	1	1.43660	64.850	1.3

---



---

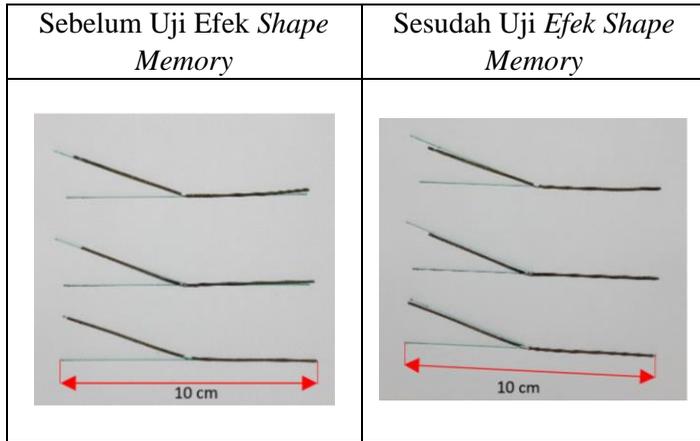
19	6	2	0	1.40030	66.747	0.1
20	5	4	1	1.36650	68.625	0.2
21	6	2	2	1.33510	70.474	0.2
22	6	3	1	1.30580	72.301	2.5
23	4	4	4	1.27820	74.119	3.3
24	5	5	0	1.25240	75.912	2.1
25	6	4	0	1.22810	77.692	0.6
26	6	3	3	1.20520	79.456	11.2
27	6	4	2	1.18340	81.222	0.7
28	7	3	0	1.16280	82.974	0.2
29	7	3	2	1.12470	86.455	1.2
30	8	0	0	1.10700	88.189	0.1
31	7	4	1	1.09010	89.923	4.9
32	8	2	0	1.07400	91.652	0.6
33	6	5	3	1.05850	93.393	0.4
34	6	6	0	1.04370	95.131	1.7
35	8	3	1	1.02950	96.874	0.4
36	6	6	2	1.01580	98.632	0.8
37	7	5	2	1.00270	100.390	0.5
38	8	4	0	0.99010	102.156	0.1
39	9	1	0	0.97800	103.929	0.5
40	8	4	2	0.96630	105.720	0.1
41	9	2	1	0.95500	107.530	0.3
42	6	6	4	0.94410	109.355	0.1
43	9	3	0	0.93350	111.212	0.9
44	9	3	2	0.91340	114.987	0.2
45	8	4	4	0.90390	116.903	0.1
46	8	5	3	0.89460	118.871	1.7
47	10	0	0	0.88560	120.872	0.3
48	10	1	1	0.87690	122.908	0.9
49	8	6	2	0.86840	125.006	0.4
50	9	4	3	0.86020	127.143	0.2
51	10	2	2	0.85220	129.350	0.8
52	9	5	2	0.84440	131.635	0.5
53	7	7	4	0.82940	136.480	2.4
54	10	4	0	0.82230	139.030	0.1
55	9	6	1	0.81530	141.750	0.4
56	10	4	2	0.80840	144.679	0.8
57	9	5	4	0.80180	147.773	0.3

---

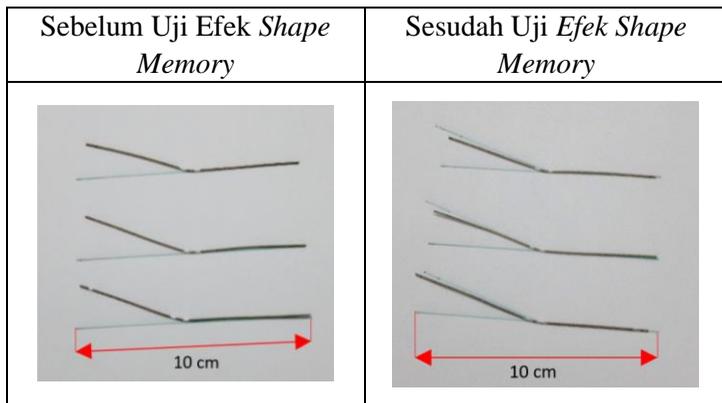


---

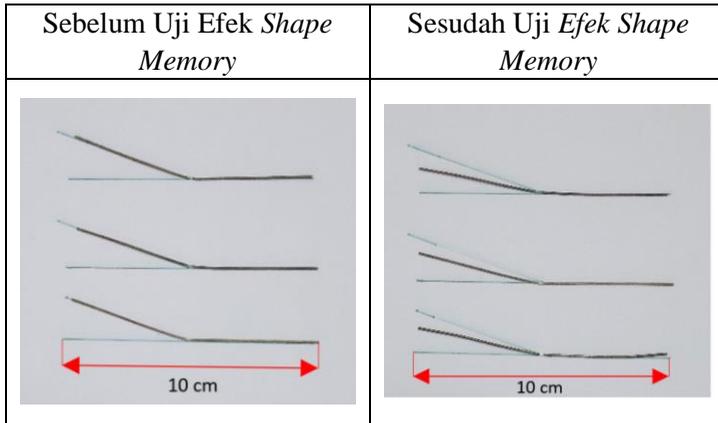
7. Hasil Pengujian Efek *Shape Memory* Spesimen 750-BC  
Cu21 Zn-5 Al *shape memory alloys* Sebelum dan Sesudah



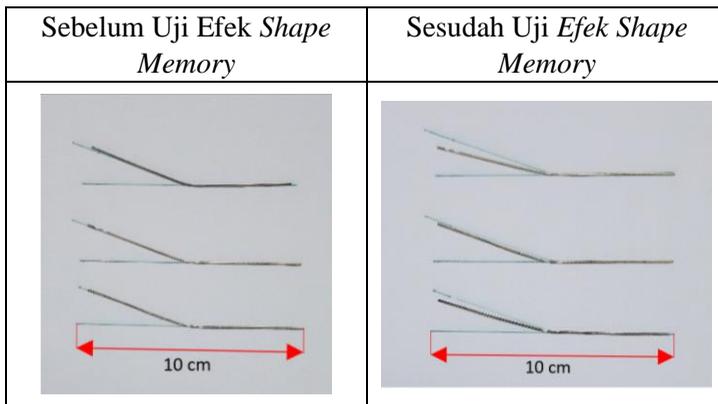
8. Hasil Pengujian Efek *Shape Memory* Spesimen 750-DC  
Cu21 Zn-5 Al *shape memory alloys* Sebelum dan Sesudah



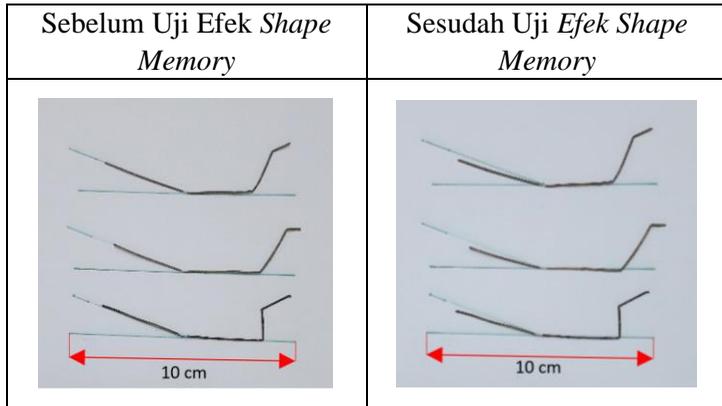
9. Hasil Pengujian Efek *Shape Memory* Spesimen 800-BC  
Cu<sub>21</sub> Zn-5 Al *shape memory alloys* Sebelum dan Sesudah



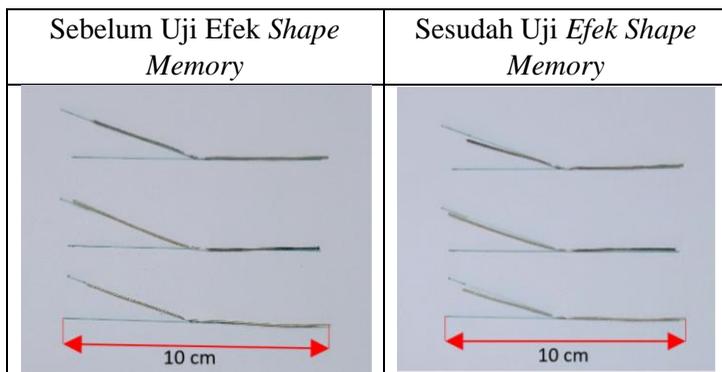
10. Hasil Pengujian Efek *Shape Memory* Spesimen 800-DC  
Cu<sub>21</sub> Zn-5 Al *shape memory alloys* Sebelum dan Sesudah



11. Hasil Pengujian Efek *Shape Memory* Spesimen 900-BC  
Cu21 Zn-5 Al *shape memory alloys* Sebelum dan Sesudah



12. Hasil Pengujian Efek *Shape Memory* Spesimen 900-DC  
Cu21 Zn-5 Al *shape memory alloys* Sebelum dan Sesudah



---

### 13. Perhitungan Yield Strength

- AC
$$YS = 1/3 HV (0.1)^{m-2}$$
$$YS = 1/3 (134.3) (0.1)^{2.5-2}$$
$$YS = 14.156 \text{ kgf/mm}^2$$
- 750-BC
$$YS = 1/3 HV (0.1)^{m-2}$$
$$YS = 1/3 (178) (0.1)^{2.5-2}$$
$$YS = 18.762 \text{ kgf/mm}^2$$
- 750-DC
$$YS = 1/3 HV (0.1)^{m-2}$$
$$YS = 1/3 (138.3) (0.1)^{2.5-2}$$
$$YS = \text{in kgf/mm}^2$$
- 850-BC
$$YS = 1/3 HV (0.1)^{m-2}$$
$$YS = 1/3 (149.67) (0.1)^{2.5-2}$$
$$YS = 15.769 \text{ kgf/mm}^2$$
- 850-DC
$$YS = 1/3 HV (0.1)^{m-2}$$
$$YS = 1/3 (139.3) (0.1)^{2.5-2}$$
$$YS = 14.683 \text{ kgf/mm}^2$$
- 900-BC
$$YS = 1/3 HV (0.1)^{m-2}$$
$$YS = 1/3 (136) (0.1)^{2.5-2}$$
$$YS = 14.335 \text{ kgf/mm}^2$$
- 900-DC
$$YS = 1/3 HV (0.1)^{m-2}$$
$$YS = 1/3 (141.3) (0.1)^{2.5-2}$$
$$YS = 14.894 \text{ kgf/mm}^2$$

## 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. Luckyta dan Arfan selaku partner TA yang selalu berjuang bersama-sama, membantu, berbagi ilmu, memberikan dukungan dan menjadi teman dikala senang maupun susah dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.
2. Kaiju dan Noni selaku kucing peliharaan penulis yang selalu membantu menghibur dan memberi dukungan kepada penulis.
3. Sahabat dekat saya: Nurul, Laras, Elvira, Hardina, Tetty, Lilla, Tanti, Maya, dan Anggi yang selalu menghibur tiap harinya pada saat jenuh dan tempat untuk berbagi dalam banyak hal selama di Surabaya.
4. Mas Abrar dan Mas Garias selaku kakak tingkat yang selalu membimbing penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
5. Eka Kurniawan, Muhandis Haras, dan Nabil selaku penghuni Lab Metal yang terbaik, menjadi tempat keluh kesah serta selalu saling membantu dan bekerja sama dalam mengerjakan penelitian tugas akhir.
6. Keluarga besar ciwi MT18 yang tidak henti-hentinya memberikan dukungan terhadap penulis.
7. Keluarga besar MT18 yang tidak henti-hentinya memberikan keceriaan, menjadi tempat yang nyaman selama kuliah, dan mengukir banyak cerita.
8. Teman-teman Unit Kerja Khusus dan Silver Parade VI yang selalu menjadi tempat keluh kesah, berbagi tawa dan duka selama tahun ketiga.
9. MT16, MT17, MT19, dan MT20 yang banyak memberikan pengalaman, pembelajaran, dan kenangan yang berharga selama penulis berkuliah.

---

10. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semua yang membutuhkan

Surabaya, 24 Januari 2020

Penulis

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kediri 10 November 1996, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dari SD Kaliasin IV Srabaya tahun 2002 - 2008. Dilanjutkan di SMP Negeri 1 Surabaya tahun 2008 - 2011. Selanjutnya dilanjutkan di SMA Negeri 5 Surabaya tahun 2011 - 2014. Selama menempuh SMA, penulis pernah menjadi Ketua Divisi Layouting Ekstrakurikuler Jurnalis dan menjadi Anggota Penusun Majalah Sekolah. Lalu penulis melanjutkan pendidikan ke perguruan tinggi negeri yaitu di Departemen Teknik Material FTI-ITS. Selama menempuh perkuliahan penulis juga tercatat aktif di acara departemen maupun institusi. Penulis pernah menjadi panitia di acara yg diadakan fakultas maupun institusi seperti menjadi panitia acara pelatihan LKMM TD XX dan Siver Parade VI. Penulis juga pernah menjadi Staff Ahli Unit Kerja Khusus HMMT FTI-ITS 2018/2019. Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ periode 2 Januari – 30 Januari 2019 dan memiliki topik selama kerja praktek dengan judul “Analisis Metode IMr pada Pipa Transmisi Minyak di PT Pertamina Hulu Energi ONWJ”. Tugas akhir yang diambil penulis yaitu dalam bidang Perlakuan Panas dengan judul “Pengaruh Variasi Temperatur *Solution treatment* dan Media Pendinginan pada Proses *Heat Treatment* Cu-Zn-Al *Shape memory alloy* terhadap Efek *Shape memory* dan Struktur Mikro”.