TUGAS AKHIR – TL184834

REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT SHAPE MEMORY EFFECT PADUAN Cu-Zn-Al

ADITYA EKA KURNIAWAN
NRP. 02511640000040

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

REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT SHAPE MEMORY EFFECT PADUAN Cu-Zn-Al

ADITYA EKA KURNIAWAN
NRP. 02511640000040

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

REVIEW THE EFFECT OF ADDITION OF ELEMENTS TO THE NATURE OF MICRO STRUCTURE AND SHAPE MEMORY EFFECT OF Cu-Zn-Al

ADITYA EKA KURNIAWAN
NRP. 02511640000040

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

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

(*This page is intentionally left blank*)

REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT SHAPE MEMORY EFFECT PADUAN Cu-Zn-Al

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
ADITYA EKA KURNIAWAN
NRP 02511640000040

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
DEPARTEMEN
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

SURABAYA
Juli 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR TERHADAP STRUKTUR MIRKO DAN SIFAT SHAPE MEMORY EFFECT PADUAN Cu-Zn-Al

Nama : **Aditya Eka Kurniawan**
NRP : **02511640000040**
Departemen : **Teknik Material dan Metalurgi**
Pembimbing I : **Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.**
Pembimbing II : **Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.**

Abstrak

Paduan Shape Memory Alloy (SMA's) sudah dikembangkan selama dua puluh lima tahun terakhir, saat ini paduan alloy berbasis Cu banyak digunakan sebagai alternatif paduan Ni-Ti karena memiliki biaya yang lebih ekonomis. Paduan Cu-Zn-Al memiliki sifat shape memory effext pada rentan komposisi tertentu yaitu 60%-80% Cu, 15%-30% Zn , dan 3%-10% Al dalam berbagai perbandingan. Dalam pembuatan material shape memory alloy diperlukan beberapa proses perlakuan panas antara lain homogenizing, annealing, solution treatment dan terakhir dilakukan artificial aging. Kemudian dilakukan beberapa pengujian yaitu pengujian metalografi, XRD, XRF, DSC, dan SME. Dalam review paper ini dilakukan penambahan unsur untuk mengetahui pengaruh shape memory effect dan struktur mikro paduan. Dari hasil review paper didapatkan adanya penambahan unsur mengakitabatkan perubahanya sturktur mikro dimana pada unsur terjadi pengecilan grain size yang paling optimal pada unsur Gd, unsur Fe dan unsur Ti mengalami pembesaran grain size. Adanya penambahan unsur juga mempengaruhi SME dimana unsur Gd memiliki nilai paling tinggi yaitu 98,6% , pada unsur Fe dan unsur Ti mengalami penurunan nilai SME

Kata Kunci: ***artificial aging, solution treatment, shape memory alloy, shape memory effect***

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

REVIEW THE EFFECT OF ADDITION OF ELEMENTS TO THE NATURE OF MICRO STRUCTURE AND SHAPE MEMORY EFFECT OF Cu-Zn-Al

Student Name : Aditya Eka Kurniawan
NRP : 02511640000040
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Co-Supervisor : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstract

Shape Memory Alloy (SMA) alloys have been developed over the past twenty-five years, currently Cu-based alloys are widely used as an alternative to Ni-Ti alloys because they have a more economical cost. Alloys of Cu-Zn-Al have effext shape memory properties in certain susceptible compositions namely 60% -80% Cu, 15% -30% Zn, and 3% -10% Al in various comparisons. In making shape memory alloy material, several heat treatment processes are needed, including homogenizing, annealing, solution treatment and finally artificial aging. Then a number of tests were conducted, namely metallographic, XRD, XRF, DSC, and SME testing. In this paper review the addition of elements was carried out to determine the effect of shape memory effect and microstructure of the alloy. From the results of a review paper, it was found that there was an addition of elements due to changes in the microstructure, where the element had the most optimal grain size reduction in the Gd element, the Fe element and Ti the element had an enlarged grain size. The addition of elements also affects the SME where Gd elements have the highest value that is 98.6%, the Fe element and the Ti element decreases the SME value

Keywords: ***artificial aging, solution treatment, shape memory alloy, shape memory effect***

(*This page is intentionally left blank*)

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul "**Review Pengaruh Penambahan Unsur Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Shape Memory Effect Paduan Cu-Zn-Al**" untuk memenuhi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

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

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

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

Surabaya, 24 Juli 2020
Penulis

Aditya Eka Kurniawan

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **v**
ABSTRAK ..... **vii**
ABSTRACT ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
DAFTAR ISI ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xv**
DAFTAR TABEL ..... **xvii**
BAB I PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA
2.1 *Shape Memory Alloys* 5
2.1.1 Fenomena Transformasi Fasa pada *Shape Memory Alloys* 6
2.1.2 *Shape Memory Effect* 9
2.2 Paduan Cu-Zn-Al 11
2.3 Diagram Fasa 15
2.3.1 Diagram Fasa Cu-Zn 15
2.3.2 Diagram Fasa Cu-Zn-Al 17
2.4 Unsur Penambahan Paduan Cu-Zn-Al 19
2.4.1 Unsur Gadolinium 19
2.4.2 Unsur Boron 20
2.4.3 Unsur Indium 21
2.4.4 Unsur Ferum 21
2.4.5 Unsur Nikel 22
2.4.6 Unsur Zirkonium 23
2.4.7 Unsur Titanium 24
2.5 Faktor Penambahan Unsur Paduan Cu-Zn-Al 24
2.6 Perlakuan Panas 25

2.6.1 *Homogenizing* 25
2.6.2 *Annealing* 26
2.6.3 *Solution Treatment* 26
2.6.4 Artificial Aging 27
2.7 Metode Pengujian 28
2.7.1 Pengujian Metalografi 28
2.7.2 Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) 30
2.7.3 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) 31
2.7.4 Pengujian Efek *Shape Memory* 33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN
3.1 Diagram Alir 35
3.2 Tabel Bahan dan Metode 36
3.3 Tabel Ruang Lingkup Pembahasan..... 39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN
4.1 Hasil Penambahan Unsur Gadolinium Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al 41
4.2 Hasil Penambahan Unsur Boron Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al 45
4.3 Hasil Penambahan Unsur Indium Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al 47
4.4 Hasil Penambahan Unsur Zirkonium Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al 50
4.5 Hasil Penambahan Unsur Fe Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al..... 51
4.6 Hasil Penambahan Unsur Ti Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al..... 55
4.7 Hasil Penambahan Unsur Ni Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al..... 58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN
5.1 Kesimpulan 61
5.2 Saran 61
DAFTAR PUSTAKA 63
UCAPAN TERIMA KASIH 67
BIODATA PENULIS 69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema pengaruh temperatur terhadap perubahan fasa *shape memory alloys* tanpa pembebanan mekanik 7
Gambar 2.2 Skema *shape memory effect* dari SMA yang menunjukkan perubahan proses *detwinning* dengan adanya pembebanan.....8
Gambar 2.3 Skema *shape memory effect* dari SMA menunjukkan pelepasan beban dan selanjutnya pemanasan kembali menjadi austenit di bawah kondisi tanpa beban 9
Gambar 2.4 Kurva tegangan-regangan-temperatur yang menujukkan *shape memory effect* dari *shape memory alloys*.....10
Gambar 2.5 Alur cahaya pada pengamatan mikroskopis.....30
Gambar 2.6 Prinsip kerja XRD 31
Gambar 2.7 Skematik dari instrumen *power compensation* DSC 32
Gambar 3.1 Diagram Alir.....36
Gambar 4. 1 Hasil Pengujian SEM *as cast* Padauan Cu-Zn-Al-Gd.....41
Gambar 4.2 Struktur Mikro *as cast* Paduan Cu-Zn-Al-Gd 42
Gambar 4.3 Kurva Ukuran Butir dengan Kandungan unsur Gd *as cast* 43
Gambar 4.4 Kurva Ukuran Butir dengan Kandungan unsur Gd setelah dilakukan proses *solution treatment* 44
Gambar 4.5 Kurva Penambahan Unsur Gd dengan Rasio *Shape Memory Effect* 45
Gambar 4.6 Hasil Struktur Mikro Sampel Cu-Zn-Al (a) dan Sampel Cu-Zn-Al-B (b) 46
Gambar 4 7 Hasil Pengujian SEM Pengujian Tarik Sampel Cu-Zn-Al (a) dan Sampel Cu-Zn-Al-B (b).....47

Gambar 4.8 Hasil Struktur Mikro Paduan Cu-Zn-Al-In dengan 0%wt Unsur Indium (a), 0,1%wt Unsur Indium (b), 0.3% Unsur Indium (c) dan 0,5%wt Unsur Indium (d) 48
Gambar 4.9 Hasil Pengjian Paduan Cu-Zn-Al-In dengan 0%wt Unsur Indium (a), 0,1%wt Unsur Indium (b), 0.3% Unsur Indium (c) dan 0,5%wt Unsur Indium (d) 49
Gambar 4.10 Struktur Mikro *as cast* Paduan Cu-Zn-Al (a) dan Paduan Cu-Zn-Al-Zr (b). 51
Gambar 4.11 Hasil Struktur mikro penambahan unsur Fe pada paduan Cu-Zn-Al (a) penambahan 0.05Fe (b) penambahan 0.01Fe 52
Gambar 4.12 Hasil pengujian SEM penambahan unsur Fe pada paduan Cu-Zn-Al (a) penambahan 0wt% Fe (b) penambahan 0.05wt% Fe (b) penambahan 0.01wt% Fe 54
Gambar 4.13 Hasil Pengujian Metalografi Paduan Cu-Zn-Al (a) setelah dilakukan proses *after aging* pada 75°C (b) setelah dilakukan proses *after aging* 250°C (c) setelah dilakukan proses *after aging* 300°C 55
Gambar 4.14 Hasil Pengujian Metalografi Paduan Cu-Zn-Al-Ti (a) setelah dilakukan proses *after aging* pada 75°C (b) setelah dilakukan proses *after aging* 250°C (c) setelah dilakukan proses *after aging* 300°C 56
Gambar 4.15 Hasil pengujian DSC (a) Paduan Cu-Zn-Al dan (b) paduan Cu-Zn-Al-Ti 57
Gambar 4.16 Hasil Struktur Mikro Paduan Cu-Zn-Al dengan (a) Penambahan 0% Unsur Ni, (b) Penambahan 0.4% Unsur Ni (c) Penambahan 0.5% Unsur Ni 59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data masing-masing unsur paduan Cu-Zn-Al.....13
Tabel 2.2 Sifat Cu-Zn-Al *shape memory alloys* 15
Tabel 2.3 Kadar Cu dan Zn pada 5 Jenis Kuningan.....15
Tabel 2.4 Sifat Fisik Unsur Gadolinium.....20
Tabel 2.5 Sifat Fisik dan Kimia Unsur Fe 22
Tabel 2.6 Sifat Fisik Unsur Zirkonium 23
Tabel 3.1 Tabel Bahan dan Metode…… 36
Tabel 3.2 Tabel Ruang Lingkup Pembahasan 39
Tabel 4.1 Hasil Pengujian SME Paduan Cu-Zn-Al-In 49
Tabel4.2 Ketebalan Rata-Rata Fasa Martensit 53
Tabel 4.3 Temperatur Transformasi Paduan A dan B 58
Tabel 4.4 Rata-rata Ukuran Butir Paduan Cu-Zn-Al-Ni *as-cast* .59

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Paduan shape memory (*shape memory alloy*) memiliki kemampuan *recovery* regangan pada saat dipanaskan sehingga dapat kembali kebentuk awal sebelum deformasi. Fenomena ini merupakan hasil dari perubahan fasa kristalin yang dikenal dengan transformasi martensitic thermoelastik. Sifat ingat bentuk ini (*shape memory effect/SME)* dapat digunakan untuk berbagai aplikasi keperti kopeling (penyambung) sistem perpipaan, konektor listrik dan actuator. Penggunaan actuator memberikan alternatif yang menarik untuk menggantikan metode aktuasi konvensional. Aktuator SMA merespon perubahan temperatur dengan perubahan bentuk dengan kata lain dapat merubah energi panas menjadi energi mekanik. Paduan SMA yang paling memungkinkan untuk aplikasi di industry adalah paduan NiTi. Paduan NiTi dapat dideformasi plastis sampai lebih dari 50% regangan, memiliki SME yang stabil dan NiTi dapat merekover bentuk awal (sampai regangan 8%) pada waktu dipanaskan di atas suhu transformasi atau dapat menghasilkan tegangan restorasi yang tinggi sampai 700 Mpa (Mabruri, 2012)

Paduan alloy berbasis Cu banyak digunakan sebagai alternatif paduan Ni-Ti karena memiliki biaya yang lebih ekonomis, serta memiliki konduktifitas listrik dan thermal yang lebih baik. Kini pengaplikasian *Shape Memory Alloy* sudah banyak digunakan salah satu contohnya yaitu sensor dan actuator. *Shape Memory Alloy (SMA,s)* memiliki sifat yang unik dan menarik karena paduan ini memiliki sifat *Shape Memory Effect* dan sifat *Superelasticity*. Paduan *Shape Memory Effect* yang banyak secara komersil yaitu paduan Ni-Ti, paduan ini memiliki sifat *Shape Memory Effect* terbaik namun juga memiliki kekurangan berupa temperatur transformasinya yang kecil, pemrosesan yang sulit dan juga harganya yang sangat mahal seratus kali lipat dibandingkan dengan *Shape memory alloys Cu-based*. Menurut Xu (2008), saat

ini paduan *Shape Memory Alloy* yang banyak digunakan yaitu paduan Cu-Zn-Al, namun paduan ini masih memiliki beberapa kelemahan, antara lain keuletan, stablitas terbentuk martensit dan *intergranular crack* sehingga perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terkait *Shape Memory Effect* terutama pada paduan Cu-Zn-Al. Paduan Cu-Zn-Al memiliki sifat *shape memory effect* pada rentang komposisi tertentu yaitu 60%-80% Cu, 15%-30% Zn , dan 3%-10% Al dalam berbagai perbandingan. Menurut ASM International, 1990. *Shape Memory Alloys* (SMA) adalah material yang memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk dan ukuran semula setelah dideformasi dan diberikan perlakuan temperatur tertentu. Aplikasi dari *shape memory alloys* sendiri cukup beragam dalam berbagai bidang industri, misalnya saja seperti aeronautika, automotif, biomedik maupun sistem mekanik. Proses pembuatan *shape memory alloys* dapat dilakukan melalui dua cara yaitu proses pembentukan dan proses pelatihan. *Shape memory alloys* memiliki struktur kristal austenit dan martensit. Proses pembebanan dilakukan pada saat fasanya *twinned* martensit, kemudian karena adanya pembebanan maka akan terjadi perubahan dimensi tetapi fasanya masih martensit yaitu *detwinned* martensit. Ketika pembebanan dilepaskan, fasanya masih tetap *detwinned* martensit. Proses *Shape Memory Effect* terjadi ketika *detwinned* martensit dipanaskan hingga temperatur austenit, maka fasanya akan berubah ke bentuk semula (Kumar, 2008).

Menurut R.Zengin dan N. Kayal pada tahun 2010 adanya perlakuan *aging* pada *shape memory alloy* berpengaruh pada fasa martensit yang terbentuk pada *shape memory alloy* sehingga menyebabkan pengaruh *shape memory effect* pada paduan Cu-Zn-Al. Pada penelitian yang dilakukan pada perlakuan *aging* dengan temperatur 200°C dengan variasi waktu tahan 1, 4 dan 7 jam didapatkan *shape memory effect* optimal pada waktu tahan 4 jam dimana banyak terbentuk martensit plat dan terjadi penurunan *shape memory effect* pada waktu tahan 7 jam. Kurangnya penelitian terkait bidang Cu-Zn-Al *shape memory alloys* dan melihat masih banyaknya peluang untuk mengembangkan penelitian dibidang

shape memory alloy untuk mendapatkan sifat material Cu-Zn-Al *shape memory alloys* yang optimal, maka dari itu review ini akan membahas tentang pengaruh penambahan unsur terhadap struktur mikro dan *shape memory effect* paduan Cu-Zn-Al.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penembahan unsur terhadap struktur mikro paduan Cu-Zn-Al ?
2. Bagaimana pengaruh penambahan unsur terhadap *shape memory effect* paduan Cu-Zn-Al ?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam review paper ini adalah sebagai berikut:

1. Komposisi Cu-Zn-Al yang digunakan dianggap sama
2. Proses perlakuan panas yang dilakukan dianggap sama
3. Bersifat review bukan eksperimental

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penambahan unsur terhadap struktur mikro paduan Cu-Zn-Al
2. Menganalisis pengaruh penambahan unsur terhadap *shape memory effect* paduan Cu-Zn-Al

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur terhadap sifat *shape memory effect* pada paduan logam Cu-Zn-Al. Dengan adanya penelitian perihal paduan *shape memory alloy* ini, penulis berharap penelitian ini dapat diaplikasikan pada bidang-bidang yang memanfaatkan sifat *shape memory effect*

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Shape Memory Alloys*

Paduan shape memory (*shape memory alloy*) memiliki kemampuan *recovery* regangan pada saat dipanaskan sehingga dapat kembali kebentuk awal sebelum deformasi. Fenomena ini merupakan hasil dari perubahan fasa kristalin yang dikenal dengan transformasi martensitic thermoelastik. Sifat inagat bentuk ini (*shape memory effect/SME)* dapat digunakan untuk berbagai aplikasi seperti kopeling (penyambung) sistem perpipaan, konektor listrik dan actuator. Penggunaan actuator memberikan alternatif yang menarik untuk menggantikan metode aktuasi konvensional. Aktuator SMA merespon perubahan suhu dengan perubahan bentuk dengan kata lain dapat merubah energi panas menjadi energi mekanik. Paduan SMA yang paling memungkinkan untuk aplikasi di industry adalah paduan NiTi. Paduan NiTi dapat dideformasi plastis sampai lebih dari 50% regangan, memiliki SME yang stabil dan Niti dapat merekover bentuk awal (sampai regangan 8%) pada waktu dipanaskan di atas suhu transformasi atau dapat menghasilkan tegangan restorasi yang tinggi sampai 700 Mpa (Mabruri, 2012).

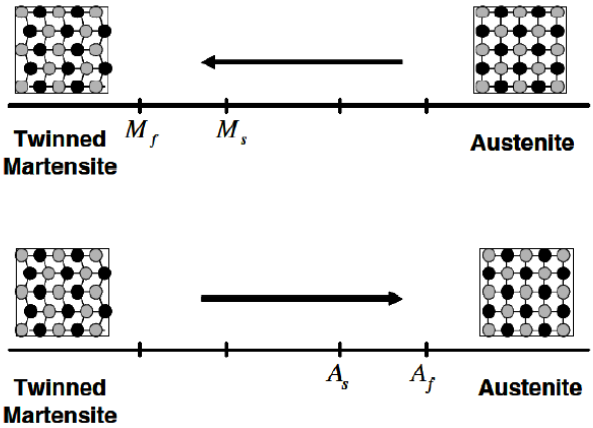
Shape memory alloy (SMA's) merupakan suatu material yang memiliki kemampuan mengingat dan memulihkan bentuk kembali pada bentuk aslinya setelah diperlakukan dengan dipanaskan pada suhu transformasi.Secara umum, material ini dapat terdeformasi plastis pada suhu yang relatif rendah, dan pada suhu yang 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. *Shape Memory Alloys* (SMA's) merupakan suatu material yang memiliki sifat unik, material ini dapat kembali kebentuk semula ketika diberi energi kalor. Biasanya material tersebut mudah mengalami deformasi plastis pada keadaan temperatur ruang, lalu ketika dinaikkan temperatur pada material tersebut maka dapat kembali sesuai dengan bentuk semula seperti sebelum mengalami deformasi (ASM *Handbook* Vol.2,1992).

2.1.1 Fenomena Transformasi Fasa pada *Shape Memory Alloys*

Menurut Kumar pada tahun 2008, Sebuah diagram fasa dapat mengontrol beberapa variable seperti tegangan, konsentrasi, temperatur, konsentrasi, sifat mekanik, dan lain-lain berdasarkan batas-batas yang ditunjukkan pada diagram fasa ekuilibrium. *Shape memory alloy* memiliki salah satu sifat yaitu *shape memory effect* yang dapat diketahui berdasarkan perubahan fasa yang terjadi pada paduannya. Berdasarkan jarak temperatur operasi, *Shape memory alloys* memiliki dua fasa, dimana setiap fasanya memiliki struktur Kristal dan sifat yang berbeda, yaitu pada temperatur tinggi disebut austenite (A) dan pada temperatur rendah disebut martensit (M). Fasa austenit memiliki struktur Kristal *cubic* sedangkan fasa martensit yang umumnya *tetragonal, orthorhombic, atau monoklinik*. Transformasi dari satu struktur menjadi struktur yang lain tidak terjadi melalui proses difusi atom, melainkan terjadi oleh distorsi pergeseran kisi. Transformasi ini dikenal dengan sebutan transformasi martensit. Setiap kristal martensitik memiliki arah orientasi yang berbeda yang biasa disebut dengan *variant*. *Variant* martensitik ini terdiri dari dua: *twinned* martensit (M^t), yang terbentuk oleh kombinasi dari *"self-accommodate" variant* martensitik, dan *detwinned* atau *reoriented* martensit yang merupakan *variant* martensit yang dominan (M^d). Kembalinya transformasi fasa dari austenit (induk fasa) ke martensit (produk fasa) dan sebaliknya, adalah hal yang paling dasar dan sifat unik dari *shape memory alloys.* Skema perubahan

struktur kristal dari *twinned* martensit dan austenit *shape memory alloys* dapat dilihat berdasarkan Gambar 2.1.

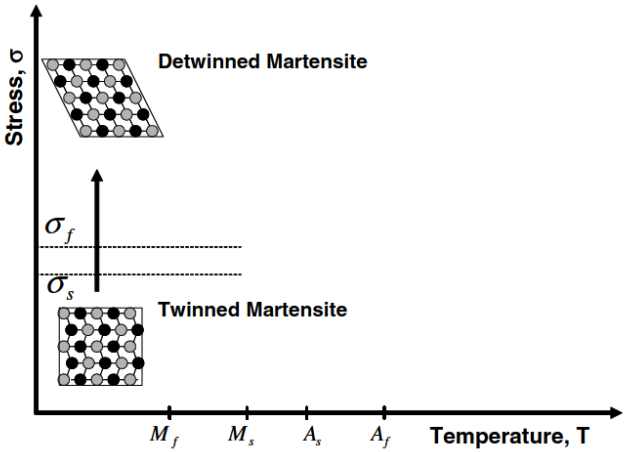


Gambar 2.1 Skema pengaruh temperatur terhadap perubahan fasa *shape memory alloys* tanpa pembebanan mekanik (Kumar, 2008)

Melalui proses pendinginan tanpa diberikan pembebanan, struktur kristal pada *shape memory alloy* akan berubah dari fasa austenit menjadi fasa martensit. Perubahan fasa yang terjadi dari fasa austenit menjadi fasamartensit disebut sebagai *forward transformation*. Namun ketika material dipanaskan dari fasa martensitik, maka struktur kristal pada *shape memory alloy* akan kembali menjadi fasa austenit dan perubahan ini disebut dengan *reverse transformation*, dalam hal ini tidak ada perubahan bentuk yang terjadi.

Pada Gambar 2.1 terdapat empat karakteristik temperatur yang berhubungan dengan perubahan fasa *shape memory alloys*. Transformasi dari austenite menjadi *twinned* martensit dimulai dari temperatur awal pembentukan martensit (M_s) sampai temperatur akhir pembentukan martensit (M_f). Sedangkan untuk transformasi

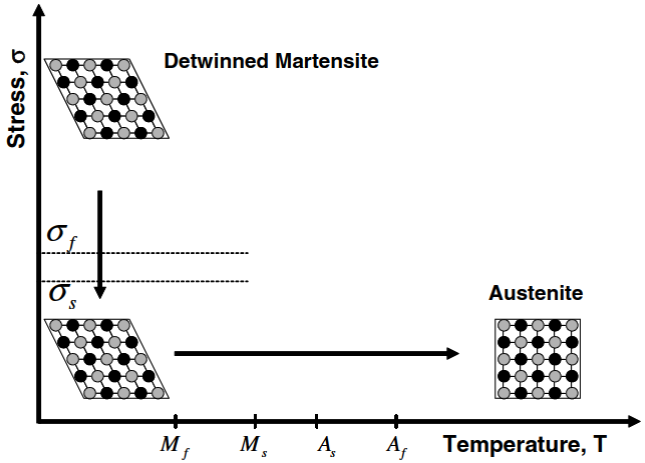
dari *twinned* martensit menjadi austenite dimulai dari temperatur awal pembentukan austenite (A_s) sampai temperatur akhir pembentukan austenite (A_f) (Kumar,2008).



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

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

.



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

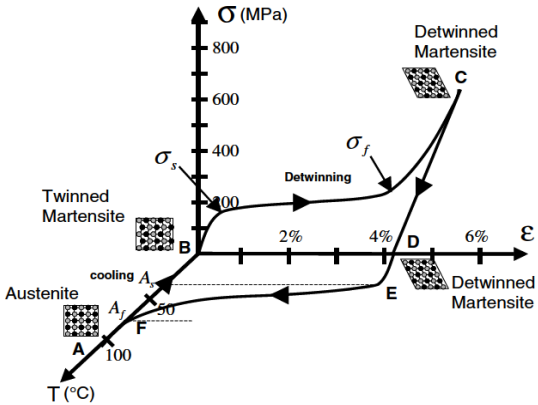
Pada Gambar 2.3, pendinginan kembali ke temperatur di bawah M_f (*forward transformation*) akan menghasilkan *twinned* martensit lagi tanpa adanya perubahan bentuk. Proses yang dijelaskan di atas dikenal sebagai *Shape Memory Effect* (SME). Beban yang diberikan haruslah cukup besar untuk memulai proses *detwinning*. Tegangan minimal yang dibutuhkan untuk menginisiasi proses *detwinning* adalah tegangan awal detwinning atau *detwinning start stress* (σ_s). Kemudian tingkat pembebanan yang besar akan mengakibatkan *detwinning* dari martensit berhasil dimana tingkat tegangan yang sesuai disebut dengan *detwinning fisinih stress* (σ_f) (Kumar, 2008).

2.1.2 *Shape Memory Effect*

Menurut Gouda pada tahun 2014, *One-way shape memory effect* terjadi ketika *Shape memory alloys* berada dalam kondisi dingin (di bawah A_s), logam dapat ditekuk atau diregangkan (diberikan deformasi) dan akan tetap menahan bentuk tersebut

hingga pemanasan di atas temperatur transformasi. Ketika dipanaskan, bentuknya akan berubah kembali ke bentuk aslinya. Namun, ketika logam didinginkan kembali, bentuknya akan tetap pada bentuk ketika dipanaskan sampai logam dideformasi kembali

Shape Memory Effect (SME) merupakan salah satu sifat dari *Shape Memory Alloy* yang terjadi ketika suatu material dideformasi dalam fasa *twinned* martensit dan ketika beban dilepaskan pada saat temperatur di bawah A_s. Selanjutnya ketika dipanaskan diatas A_f, *shape memory alloy* akan kembali kebentuk aslinya dengan berubah menjadi fasa induknya yaitu fasa austenitik. Secara alamiah *Shape Memory Effect* dapat lebih mudah dipahami dengan pembebanan termomekanikal yang dikombinasi dengan tegangan-regangan-temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Gambar 2.4, menunjukkan data eksperimen dari spesimen NiTi yang diuji di bawah pembebanan uniaksial. Tegangan σ merupakan tegangan uniaksial pada spesimen akibat beban yang diterapkan. Sedangkan, regangan ε adalah perubahan panjang dari spesimen sepanjang arah dari beban yang diterapkan sesuai panjang aslinya.



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

Dimulai dari fasa induk (poin A pada Gambar 2.4) pendinginan austenit tanpa tegangan di bawah temperatur transformasi (M_s dan M_f) menghasilkan pembentukan *twinned* martensit (poin B). Ketika *twinned* martensit diberikan tegangan yang melebihi tegangan awal σ_s, proses reorientasi dimulai, dan menghasilkan pertumbuhan dari varian martensit yang searah. Derajat tegangan untuk reorientasi varian jauh lebih rendah dibandingkan dengan tegangan luluh plastis dari martensit. Proses detwinning dikatakan berhasil pada tingkat tegangan σ_f yang dicirikan dengan adanya *plateau* σ-ε diagram yang terdapat pada Gambar 2.4. Kemudian material tersebut bebannya dilepaskan secara elastis dari poin C ke poin D dan tetap dalam keadaan *detwinned* martensit. Saat pemanasan tanpa adanya tegangan, *reverse transformation* mulai ketika temperatur mencapai A_s, pada poin E dan selesai pada temperatur A_f (poin F), dimana hanya terdapat fasa induk austenitik. Tidak adanya regangan plastis permanen pada saat *detwinning*, bentuk asli dari *Shape memory alloys* akan kembali ke bentuk asli (diindikasikan poin A).
Regangan yang kembali akibat transformasi fasa dari detwinned martensit menjadi austenit dinamakan regangan transformasi (ε^t). Selanjutnya pendinginan menuju fasa martensit akan menyebabkan pembentukan kembali fasa *twinned* martensit, sehingga seluruh siklus dari *Shape Memory Effect* bisa terus berulang. Penjelasan fenomenan diatas dapat disebut dengan *one-way shape memory effect*, karena kembalinya bentuk awal akan terjadi hanya ketika pemanasan setelah material menjadi fasa *detwinned* dengan diberikan pembebanan mekanik. (Kumar, 2008)

2.2 Paduan Cu-Zn-Al

Paduan Cu-Zn-Al adalah paduan yang terdiri dari unsur tembaga (Cu), seng (Zn) dan aluminium (Al) dimana tembaga (Cu) adalah salah satu logam pertama yang digunakan oleh manusia dan tembaga tersedia di alam sebagai unsur bebas. Tembaga murni memiliki warna kemerah-merahan muda yang khas, tetapi sifat yang paling menonjol adalah resistivitas listriknya

yang rendah, salah satu yang terendah dari semua elemen. Karena sifat ini dan jumlahnya yang relatif melimpah di alam, tembaga murni komersial banyak digunakan sebagai konduktor listrik, namun harus diperhatikan bahwa konduktivitas tembaga akan berkurang secara signifikan apabila terdapat unsur paduan yang ditambahkan (Groover, 2010).

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

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

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

Unsur	Tembaga	Seng	Aluminium
Simbol	Cu	Zn	Al
Nomor Atom	29	30	13
Spesifik Gravitasi	8.96	7.13	2.7
Struktur Kristal	FCC	HCP	FCC
Temperatur Leleh (^oC)	1083	419	660
Modulus Elastisitas (Mpa)	110,000	90,000	69,000
Ekstraksi Bijih	Kalkopirit ($CuFeS_2$)	Sphalerite (ZnS)	Bauksit
Elemen Paduan	Tembaga, seng, aluminium, silicon, nikel, beryllium	Aluminium, magnesium, tembaga	Tembaga, magnesium, mangan, silicon, seng
Aplikasi	Konduktor listrik dan komponen, pipa ledeng, aplikasi komponen laut, *heat exchanger*	Besi dan baja galavanis, *die casting*, elemen paduan pada kuningan	Kontainer, konduktor elektrik, bagian konstruksi, otomotif, dan aplikasi yang lain yang membutuhkan sifat yang ringan

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

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

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

Sifat	Nilai Sifat
Temperatur Leleh (°C)	950 – 1020
Densitas (g/cm^3)	7.64
Resistivitas (μΩ.cm)	8.5 - 9.7
Konduktivitas Termal (W/m.°C)	120
Kapasitas Panas (J/kg.°C)	400
Ultimate Tensile Strength (MPa)	600
Temperatur Transformasi (°C)	<120
Recoverable Strain (%)	4
Hysteresis (Δ°C)	15 – 25

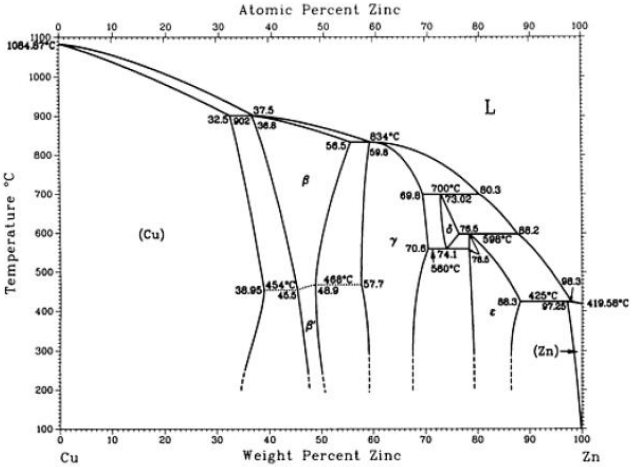
2.3 Diagram Fasa

2.3.1 Diagram Fasa Cu-Zn

Menurut Collini pada tahun 2012, kuningan merupakan paduan logam yang berbasis tembaga dimana terdapat Zn menjadi logam paduan utamanya. Elemen paduan lain yang ditambahkan ke dalam kuningan biasanya bertujuan untuk meningkatkan beberapa sifat sesuai dengan kebutuhan. Paduan Cu-Zn sangat banyak dimanfaakan untuk memenuhi kebutuhan manusia. Kadar tembaga dan seng pada 5 jenis kuningan yang mampu ditempa ditampilkan pada Tabel 2.3 Dibawah ini

Tabel 2.3 Kadar Cu dan Zn pada 5 Jenis Kuningan (ASM Handbook vol.3,1992)

UNS No		Kadar Zn (wt%)	
		Nominal	Range
C23000	*Red Brass, 85%*	15	14,0 – 16,0
C24000	*Low Brass*,80%	20	18,5-21,5
C26000	*Cadtridge Brass*, 70%	30	28,5-31,5



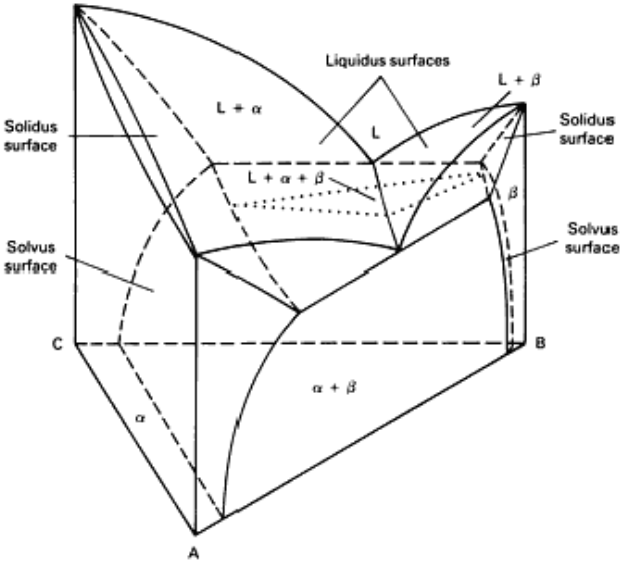
Gambar 2.5 Diagram Fasa Cu-Zn (ASM Handbook Vol.2, 1992)

Dalam diagram Cu-Zn seperti pada Gambar 2.5 terdapat 6 fasa yaitu , $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon\ dan$ dari semua fasa itu yang pentingsecara industry adalah dua yaitu α dan β. α mempunyai stuktur *fcc* dan β mempunyai stuktur *bcc*. Seperti telah diketahui dari diagram fasa, untuk kuningan 70-30, fasa α merupakan fasa yang lunak dan mudah dikerjakan, sedangkan kunigan 60-40 adalah fasa $\alpha + \beta$ yang mempunyai kekuatan tinggi. Paduan dengan kisaran 45% Zn mempunyai kekuatan yang paling tinggi akan tetapi tidak dikerjakan, jadi hanya dipergunakan untuk paduan coran (Collini 2010).

Diagram fasa biner ibarat suatu peta yang mereprentasikan hubungan antara temperatur dan komposisi serta kuantitas dari fasa – fasa pada kondisi ekuilibrium, di mana hal ini berpengaruh terhadap struktur mikro dari sebuah paduan. Kebanyakan struktur mikro terbentuk dari adanya transformasi fasa, dimana hal ini terjadi ketika temperatur berubah (biasanya pada pendinginan). Perubahan temperatur ini memungkinkan adanya perubahan dari fasa satu ke fasa yang lain, muncul atau hilangnya sebuah fasa (D, Callister,2014).

2.3.2 Diagram Fasa Cu-Zn-Al

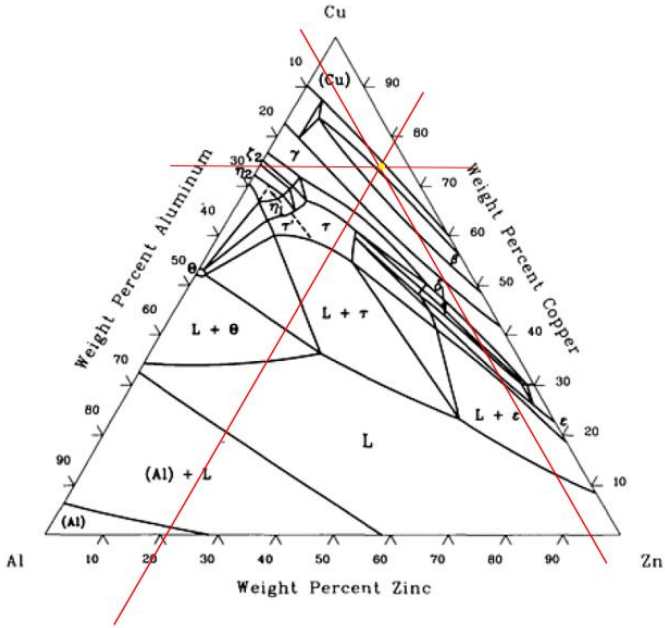
Diagram fasa terner merupakan suatu diagram fasa yang terdiri dari 3 unsur fasa, diagram fasa *ternery* ini lebih rumit dalam cara membaca diagramnya. Ketika suatu unsur ditambahkan ke dalam system diagram fasa *binary*, akan membentuk diagram padat yang memiliki diagram biner pada sisi vertical. Hal tersebut dapat menggambarkan diagram fasa *ternery* dengan tida unsur (ASM Handbook Vol3, 1992). Pada Gambar 2.6. terdapat batas-batas pada area *single phase* (garis cairan, garis padatan dan garis *solvus* pada diagram *binary*). Area satu dan dua fasa menjadi volume dan garis-garis yang terdiri dari tiga fasa menjadi volume. Pada bidang dengan unsur A-B dan B-C merupakan diagram fasa *binery* eutektik dan termauk kedalam diagram fasa *ternery*



Gambar 2.6 Diagram Fasa Ternery (ASM Handbook Vol.3, 1992)

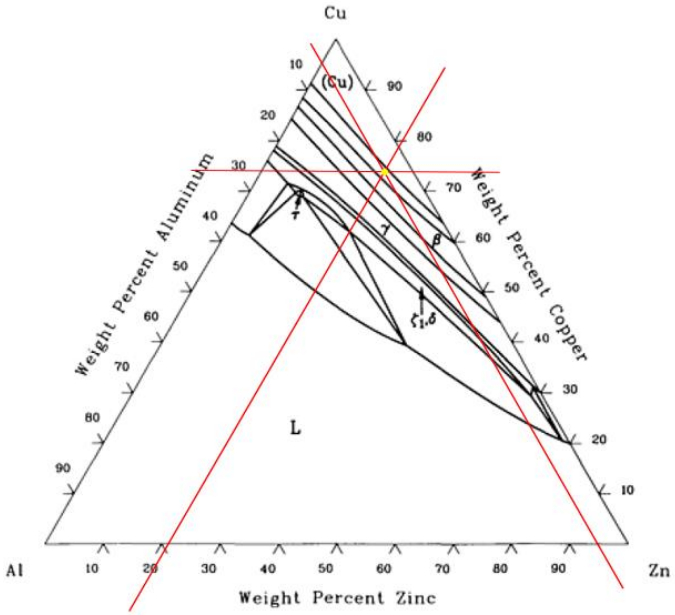
. Diagram fasa *ternery* ditunjukkan melalui gambar tiga dimensi, yang dapat membantu untuk memudahkan memahami hubungan antar diagram. Namun dalam membaca nilai dlaam diagram masih sangat sulit. Untuk mengatasi hal tersebut, terdapat system *ternery* yang menampilkan diagram *binery* meliputi permukaan dan proyeksi dua dimensi dari permukaan liquidus dan solidus dengan bagian horizontal (*isotherms)* dan bagian vertical (*isoplhets*) melalui diagram solid (ASM Handbook Vol.3, 1992).

Pada Gambar 2.7 merupakan diagram fasa terner Cu-Zn-Al pada temperatur 550°C, dimana pada komposisi sekitar 71.2% Cu, 21.8%Zn dan 7%Al berdasarkan garis merah yang berpotongan dapat diketahui bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa α dan β.



Gambar 2.7 Diagram Fasa *Ternery* Cu-Zn-Al pada Temperatur 550°C (ASM Handbook Vol.3, 1992)

Pada Gambar 2.8 di bawah merupakan diagram fasa terner Cu-Zn-Al pada temperatur 700°C, dimana pada komposisi sekitar 71.2% Cu, 21.8%Zn dan 7%Al berdasarkan garis merah yang berpotongan dapat diketahui bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa α dan β.



Gambar 2.8 Diagram Fasa *Ternery* Cu-Zn-Al Temperatur 700°C (ASM Handbook Vol.3, 1992)

2.4 Unsur Penambahan Paduan Cu-Zn-Al

2.4.1 Unsur Gadolinium

Menurut Suwargi,dkk pada tahun 2010 Gadolinium merupakan bagian dari unsur tanah jarang (UTJ) yang keberadaannya tersusun dalam kompleks fosfat dan karbonat. Pada perkembangannya teknologi pengolahan mineral, UTJ semakin

dibutuhkan pada industry kesehatan. Gadolimium merupakan unsur tanah jarang (UTJ) yang berwarna putih keperakan, berkilau seperti logam dan mudah ditempa. Pada suhu kamar mengkristal dalam bentuk heksagonal atau membentuk α dengan kerangka tertutup. Pada pemanasan 1234°C, α-gadolinium berubah menjadi bentuk β yang memiliki struktur kubus berpusat badan (Tony,dkk 1998).

Menurut Elsner pada tahun 2010, Gadolinium relatif stabil di udara kering, tapi mudah kusam di udara lembap dan membentuk lapisan oksida yang menempel dengan lemah serta berekasi lambat dengan air dan mudah larut dalam asam encer. Gadolinium memiliki daya tangkap neutron termal tinggi dari semua unsur. Pada Tabel 2.4 dapat dilihat sifat fisik unsur Gadolinium.

Tabel 2.4 Sifat Fisik Unsur Gadolinium (Anker, 2010)

Sifat	Karakteristik
Nomor atom	64
Berat molekul (g/mol)	157,25
Densitas (g/cm^3)	7.90
Titik leleh (^{o}C)	1323
Titik didih (^{o}C)	3250
Konduktivitas termal (Wm^{-1o}K^{-1})	11
Sifat megnetik	Paramagnetik
Kristalografi	Heksagonal

2.4.2 Unsur Boron

Menurut Matoh pada tahun 1997, Boron (B) merupakan salah satu unsur hara mikro yang sangat dibutuhkan oleh tanaman. Boron telah dikenal sejak tahun 1923 sebagai nutrisi mikro yang penting untuk tanaman tingkat tinggi. Boron dalam tanah terutama dalam bentuk asam borat dan diserap oleh tanah dalam bentuk H_3BO_3. Ketersediaan boron dalam tanah berkisar 0,5 sampai 0,2 ppm, tetap hanya 0,5 hingga 2,5% yang tersedia untuk tanaman.

2.4.3 Unsur Indium

Indium merupakan logam putih keperakan yang memiliki nomor atom 49 dan berada dalam subkelompok III-A dari tabel periodik. Indium lebih lunak dari timbal dan sangat lunak dan ulet, sifatnya yang elastis memungkinkan dilakukan deformasi hingga beban yang tinggi. Indium memiliki titik lebur 156,6^{o}C dan titik didih 2080°C, sebagai adiktif indium cenderung mengeras dan memperkuat solder berbasis timah selain itu indium memiliki ketahanan termal hal ini terjadi karena adanya sistem induktor timbal biner. Sifat kimia unsur indium dipengaruhi oleh letaknya dalam kelompok IIIA dalam tabel periodic, sifat – sifat unsur dalam subkelompok ini ditentukan oleh sifat kulit terluar electron yang terdiri dari 2 elektron S dan 1 elektron P.

Indium adalah logam langka yang penting secara toksikologis terkait dengan penggunaanya dalam paduan, solder dan sebagai pengeras. Pada dunia industri elektronik indium digunakan untuk produksi semikonduktor dan sel fotovoltaik, pada bidang kesehatan indium digunakan dalam pengobatan sebagai pemindaian organ dan pengobatan tumor (ASM *Handbook* Vol 2, 1992).

2.4.4 Unsur Ferum

Menurut Apriani pada tahun 2011 Besi atau ferum (Fe) adalah salah satu logam yang paling banyak dijumpai di kerak bumi, unsur Fe berwarna putih keperakan serta memiliki sifat yang ulet dan mudah dibentuk. Besi di alam terdapat dalam bentuk senyawa, misalnya mineral hematite (Fe_2O_3), secara kimia unsur besi merupakan logam yang cukup reaktif, hal ini karena besi dapat bersenyawa dengan unsur-unsur yang lain sehingga di alam besi tidak ada yang berbentuk unsur murni semuanya berbentuk senyawa. Salah satu kegunaan besi adalah campuran untuk membuat paduan logam, misalnya baja, besi tempa, besi tuang, dan lain-lain. Pada Tabel 2.5 dapat dilihat sifat fisik dan sifat kimia dari unsur Fe.

Tabel 2.5 Sifat Fisik dan Kimia Unsur Fe (Apriani, 2011)

Sifat	Karakteristik
Lambang	Fe
Nomor Atom	26
Golongan, Periode	VIII, 4
Penampilan	Metalik, mengkilap
Massa Atom	55,854 g/mol
Konfigurasi Elektron	[Ar] $3d^6\ 4s^2$
Fasa	Padat
Massa Jenis	7,86 g/cm^3
Titik Lebur	1811°K
Titik Didih	3134°K
Kapasitas Kalor	(25°C) 25,10 j/molK

2.4.5 Unsur Nikel

Nikel adalah logam putih seperti perak yang bersifat keras dan anti karat. Logam ini membantu dalam proses pengubahan beberapa logam olahan dalam bentuk larutan yang menghasilkan energi panas. Selain itu Ni juga berperan penting dalam beberapa proses pengendapan logam keras dalam bentuk paduan logam (*alloy*) seperti *stainlestel* yang mengandung 18% Ni dan 8% Cr dan *Nikhrome* yang mengandung 80% Ni dan 20% Cr Nikel terletak dalam tabel periodic yang memiliki symbol Ni dengan nomor atom 28 merupakan unsur logam transisi dengan nomor massa 58,71 terletak dalam golongan VIII periode 4 dengan konfigurasi electron [Ar] $3d^8\ 4s^2$. Pada umumnya tingkat oksidasi dari Ni adalah +2, Ni pada tingkat oksida +3 hanya sedikit dikenal. Hidrat ion Ni^{2+} berwarna hijau dan garam Ni^{2+} umunya berwarna hijau dan biru.

Nikel terbentuk dari batuan yang berkomposisi kimia basa atau dikenal juga sebagai batuan periodit. Berdasarkan teori tektonik empang, daerah yang banyak batuan periodit terutama di zona tumbukan lempeng benua dan samudera. Melalui proses pelapukan, batuan ultrabasa mengurai dalam bentuk mineral yang terlarut (koloid) seperti magnesium, besi, nikel, kobalt, silikat dan magnesium oksida dan tidak terlarut (residu) seperti besi,

aluminium, mangan, sebagian nikel, sebagian kobalt, berbagai oksida dan senyawa nikel-kobalt (Sudrajat, 1999).

2.4.6 Unsur Zirkonium

Zirkonium merupakan unsur yang mengandung unsur besi, kalsium, sodium dan mangan, unsur zirkonium termasuk dalam golongan IV B pada sistem periodic yang mempunyai struktur Kristal berbentuk Heksagonal Pejal (HCP) dan mempunyai penampang makroskopis yang kecil dengan keuletan yang tinggi. Unsur ini dapat mengalami transformasi fasa dan Heksagonal Tumpukan Padat (HTP) menjadi kubus pusat ruang pada temperatur sekitar 870°C (Schmuck, 1992).

Menurut Kwela pada tahun 2006 Zirkonium adalah elemen logam yang berkilau, keras , dan *ductile*. Penampilan Zirkonium menyerupai *stainless steel*, zirkonium memiliki temperatur leleh yang tinggi yaitu sekitar 1800°C serta memiliki sifat yang keras dan memiliki ketahanan korosi yang baik. Unsur zirkonium memiliki bilangan koordinasi maksimal 8 serta massa atom relatifnya 91,22.sma. Pada Tabel 2.6 dapat dilihat sifat fisik unsur Zirkonium

Tabel 2.6 Sifat Fisik Unsur Zirkonium (Ardiansyah, 2011)

Sifat	Karakteristik
Radius Atom	1,6 Å
Volume Atom	14,1 cm^3/mol
Massa Atom Relatif	91,224 sma
Titik Didih	4682 K
Massa Jenis	6,51 gr/cm^3
Konduktivitas Listrik	2,3 x $10^6 \Omega^{-1} cm^{-1}$
Elektronegativitas	1,33
Konfigurasi Elektron	[Kr] $4d^2 5s^2$
Formasi Entalphi	21 kj/mol
Konduktifitas Panas	22,7 $Wm^{-1}K^{-1}$
Potensial Ionisasi	6,84 V

2.4.7 Unsur Titanium

Titanium adalah unsur terbanyak ke sembian di kerak bumi dan terdistribusi secara luas. Afinitasnya yang besar terhadap oksigen dan unsur lain menyebabkan titanium tidak terdapat dalam logam statis di alam, tetapi dalam bentuk mineral yang stabil. Bentuk umum mineral titanium adalah *ilmenite* dan rutile dalam bentuk titanium oksida. Secara umum ada dua bentuk titanium, yang pertama adalah dalam bentuk titanium murni (cpTi). Titanium murni adalah logam putih, sifat densitas rendah, kekuatan tinggi dan daya tahan terhadap korosi sangat baik. Bentuk kedua adalah *alloy titanium*-6%aluminium-4%vanadium. *Alloy* ini mempunyai kekuatan yang lebih besar dari titanium murni. *Alloy* ini diaplikasikan dalam industry pesawat terbang karena memiliki densitas yang rendah, kekuatan tarik yang besar (500MPa) dan tahan terhadap temperatur tinggi (Noort Van, 2002).

2.5 Faktor Penambahan Unsur Paduan Cu-Zn-Al

Pada paduan SMA berbasis Cu terdapat dua paduan biner utama yaitu paduan Cu-Al dan paduan Cu-Zn, di mana kedua paduan biner ini memiliki fungsi shape memory dalam fasa β. Penambahan unsur kedalam paduan biner / ternary bertujuan untuk mengontrol temperatur transformasi dalam jangkauan tertentu dalam memenuhi persyaratan aplikasi , yaitu T = 100 – 370ºC, dari hal ini dapat diketahui bahwa temperatur transformasi sangat berpengaruh dari unsur paduan. Penambahan unsur pada paduan Cu-Zn-Al seperti unsur Co,Zr,B, dan Ti sebaiknya memiliki ukuran butir antara 50 – 100 nm.

Penambahan unsur pada paduan Cu-Zn-Al berpengaruh terhadap temperatur tranformasinya dan sifat mekaniknya, selain itu terdapat beberapa alasan mengapa dilakukan penambahan unsur pada paduan Cu-Zn-Al , antara lain untuk menghaluskan butir, membatasi stabilisasi martensit, menyesuaikan fasa dalam diagram fasa, menjaga temperatur transformasi, dan meningkatkan kemampuan kerja dalam paduan, hal ini dikarenakan ukuran butir yang besar terbentuk selama proses solidifikasi dan untuk

meningkatkan kemampuan dari shape memory effect (Najah Saffa, 2018).

2.6 Perlakuan Panas

Perlakuan panas merupakan proses pemanasan atau pendinginan yang waktu perlakuannya telah diatur pada suatu material dengan komposisi tertentu agar mendapatkan sifat yang diinginkan pada material tersebut. Proses perlakuan panas yang biasa diterapkan untuk tembaga dan paduan tembaga yaitu, *homogenizing, annealing, stresps releaving, solution treatment, precipitation (age) hardening, quenching* (Avner, 1964).

Perlakuan panas merupakan pemrosesann 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-Zn-Al. (ASM *Handbook* Vol 4, 1992)

2.6.1 *Homogenizing*

Homogenizing adalah suatu proses perlakuan dalam temperatur tinggi dalam waktu yang relatif lama yang berfungsi untuk mengurangi bahan kimia atau pemisahan metalurgi, umumnya dikenal sebagai coring. Homogenisasi diaplikasikan pada paduan tembaga untuk meningkatkan keuletan panas dan dingin dari pengecoran billets untuk proses *milling. Homogenizing* paling sering diperlukan pada paduan yang memiliki rentang titik beku yang tinggi, seperti fosfor tembaga, tembaga nikel, dan silika tembaga. Karakteristik dari laju pendinginan yang tinggi adalah distribusi elemen-elemen paduan yang tidak merata di bagian dalam struktur mikro. Perbedaan-perbedaan ini meningkat dengan laju pendinginan yang lebih tinggi dan perbedaan yang lebih besar dalam komposisi antara lelehan dan fasa padat pada awal kristalisasi. Waktu dan temperatur yang dibutuhkan dalam proses homogenisasi bervariasi tergantung pada paduan, ukuran butir dan

tingkat homogenisasi yang diinginkan. Waktu tahan yang digunakan bermacam-macam dari 3 jam hingga 10 jam, sedangkan temperatur yang digunakan umumnya diatas temperatur annealing hingga 50ºC (90ºF) dari temparatur solidus (ASM *handbook* Vol 4, 1992)

2.6.2 *Annealing*

Annealing adalah proses perlakuan panas yang diharapkan bisa melunakkan serta meningkatkan keuletan dan ketangguhan dari metal atau paduan. Annealing diaplikasikan pada produk tempa selama atau setelah proses miling dan proses pengecoran. Prosesnya meliputi pemanasan, waktu tahan dan laju pendinginan (ASM *handbook* Vol 4, 1992)

Benda kerja dengan perlakuan *cold work* sering dilakukan proses annealing untuk mengurangi tegangan sisa dan meningkatkan keuletan dan ketangguhan benda kerja. Proses tersebut bisa terjadi karena adanya proses *recrystallization* secara sebagian atau seluruhnya. Jika proses annealing mengembalikan seluruh ukuran butirnya menjadi semula maka proses *recrystallization* terbentuk. Setelah proses annealing, logam akan membentuk struktur geometri baru namun stuktur butir dan sifat mekaniknya sama seperti sebelum dilakukan *cold work*. Kondisi tersebut cenderung terjadi proses *recrystallization* pada temperatur yang tinggi, waktu tahan yang lama, dan laju pendinginan yang rendah. Jika proses annealing mengembalikan sebagian ukuran butir menjadi semula merupakan proses recovery anneal. (Grover, 2010)

2.6.3 *Solution Treatment*

Solution treatment merupakan perlakuan panas dengan memanaskan paduan hingga diatas garis solvus pada diagram fasa logam paduan. Perlakuan 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. *Solution treatment* adalah suatu proses perlakuan panas yang umum

dilakukan pada logam seperti baja paduan aluminium, *supperalloy* berbasis nikel, paduan titanium dan beberapa paduan berbasis tembaga. Tujuan dari *solution treatment* adalah untuk melarutkan fasa atau presipitat dan mendapatkan fasa tunggal. Pada Gambar 2. Merupakan contoh proses *solution treatment* dapat digambarkan dengan skema *solution treatment* pada paduan A-B, pada diagram fasa diambil titik 10% B dimana pada titik tersebut memiliki fasa $\propto + \theta$ pada temperatur kamar. Untuk mendapatkan fasa tunggal $\propto + \theta$ maka paduan dipanaskan hingga mencapai temperatur T_0 Karena jika paduan dipanaskan hanya mencapai temperatur T_1, fasanya masih $\propto + \theta$ semakin naik temperatur maka fasa θ akan terlarut dalam fasa $\propto$. Ketika dilakukan pendinginan secara tepat, fasa θ terhambat untuk keluar sehingga pada temperatur kamar tetap terbentuk fasa $\propto$ (ASM Handbook Vol.4, 1992).

2.6.4 Artificial Aging

Menurut Prayitno dan Azhary pada tahun 2019 *artificil aging* merupakan suatu proses pemanasan kembali larutan padat jenuh ke suatu temperatur di bawah garis *solvus* dan dibiarkan pada temperatur tersebut selama jangka waktu tertentu. *Artificial aging* merupakan salah satu metode peningkatan kekuatan paduan. Penguatan dan pengerasan logam paduan pada proses *artificial aging* bisa ditingkatkan dengan pembentukan penyebaran partikel-partikel dari fasa kedalam matrik fasa utama. Hal ini dilakukan dengan perlakuan panas sehingga partikel-partikel kecil dari fasa yang baru akan membentuk *precipitasi* endapan / menggumpal.

Proses *artificial aging* berlangsung pada temperatur antara 100°C – 200°C dan dengan lamanya waktu 1 – 24 jam. Pada tahap *artificial aging* dapat dilakukan beberapa variasi perlakuan yang dapat mempengaruhi hasil *age hardening*. Salah satu variasi tersebut adalah variasi temperatur *artificial aging*. Temperatur *artificial aging* dapat ditetapkan pada temperatur saat pengkristalan paduan, di atas temperatur pengkristalan atau di atas temperatur pengkristalan logam (Schulz, Kurt, 2000).

2.7 Metode Pengujian

2.7.1 Pengujian Metalografi

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

a. *Sampling Position* (proses pengambilan sampel)

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

b. *Cutting* (pemotongan sampel)

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

c. *Mounting*

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

d. Grinding

Grinding merupakan salah satu tahap preparasi spesimen dimana dalam proses ini dilakukan pengampelasan. Permukaan spesimen hasil dari proses sebelumnya, pasti memiliki permukaan yang tidak rata, terkorosi, terdapat gesekan bahkan porositas. Untuk meratakan dan menghilangkan itu semua maka dilakukan *grinding* (pengampelasan). Pengampelasan dilakukan dengan ampelas yang ukurannya berbeda-beda yaitu ukuran kertas ampelasnya dinyatakan dengan mesh. Pengampelasan dilakukan mulai dari nomor mesh yang rendah (kasar) hingga yang tinggi (halus). Pada saat proses pengampelasan, dilakukan dengan memberikan *coolants* air. Air berfungsi untuk memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul yang dapat merubah struktur mikro sampel dan memperpanjang masa pemakaian kertas amplas. Dengan pengampelasan dapat meratakan dan menghaluskan permukaan sampel dengan cara menggosokkan sampel pada kertas abrasif / amplas.

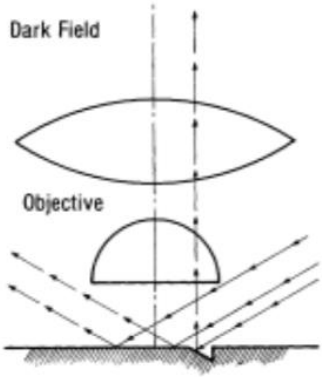
e. Polishing

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

f. Observasi mikroskopis

Obeservasi mikroskopis dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik untuk mengetahui struktur mikro spesimen yang telah dipreparasi. Untuk prinsip alur

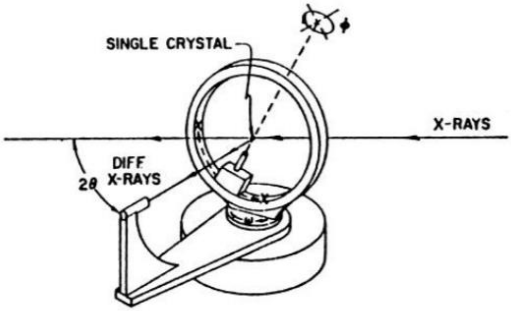
cahaya pada pengamatan mikroskopis dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7 Alur cahaya pada pengamatan mikroskopis (Kauffman, 2003)

2.7.2 Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Teknik difraksi sinar-x dapat digunakan untuk analisis kualitatif karena setiap unsur atau senyawa mempunyai pola difraksi tertentu. Dengan demikian, jika pola difraksi unsur atau senyawa diketahui maka unsur atau senyawa tersebut dapat diidentifikasi. Pada Gambar 2.8 merupakan prinsip kerja pada pengujian XRD adalah ketika suatu material dikenai sinar-x, maka intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan adanya penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar-x yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-x yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi (Kaufmann, 2003).



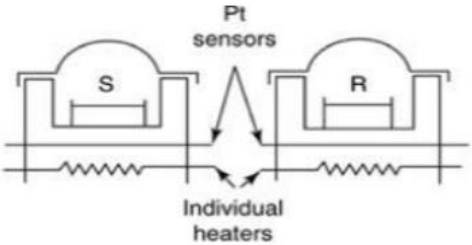
Gambar 2.8 Prinsip kerja XRD (Kaufmann, 2003)

Bentuk keluaran dari difraktometer dapat berupa data analog atau digital. Rekaman data analog berupa grafik garis-garis yang terekam per menit sinkron, dengan detektor dalam sudut 2θ per menit, sehingga sumbu-x setara dengan sudut 2θ. Sedangkan rekaman digital menginformasikan intensitas sinar-x terhadap jumlah intensitas cahaya per detik. Pola difraktogram yang dihasilkan berupa deretan puncak-puncak difraksi dengan intensitas relatif bervariasi sepanjang nilai 2θ tertentu. Besarnya intensitas relatif dari deretan puncak-puncak tersebut bergantung pada jumlah atom atau ion yang ada, dan distribusinya di dalam sel satuan material tersebut. Pola difraksi setiap padatan kristalin sangat khas, yang bergantung pada kisi kristal, unit parameter dan panjang gelombang sinar-x yang digunakan. Dengan demikian, sangat kecil kemungkinan dihasilkan pola difraksi yang sama untuk suatu padatan kristalin yang berbeda (Warren, 1969).

2.7.3 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Pada dasarnya ada dua macam metode *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) yaitu *power compensation Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dan *Heat flux mode*. Menurut Mark (2005), konsep pengoperasian *Power Compensation Differential Scanning Calorimetry* (DSC) didasarkan pada menjaga suhu pada R dan S yang sama (R dan S nama sampel pada Gambar 2.7).

Skema dari *Power Compensation Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dapat dilihat pada Gambar 2.9. Hal ini dicapai dengan menempatkan sensor temperatur ke dalam penghubung rangkaian. Setiap perubahan temperatur baik sampel atau referensi segera diimbangi dengan jumlah yang setara dengan aliran yang diperlukan untuk mendorong pemanas untuk menjaga pada temperatur yang sama. Dengan demikian, integral dari input daya selama transisi atau perubahan kapasitas panas adalah sama dengan perbedaan energi (ΔH) yang dipasok ke sampel atau referensi selama waktu tertentu. Hal ini akan menjadi endotermik atau eksotermik tergantung pada saat perjalanan ke sampel atau panci referensi, masing masing. Puncak yang menunjuk kebawah dinamakan eksotermik dan puncak yang menunjuk ke atas dinamakan endotermik.



Gambar 2.9 Skematik dari instrumen *power compensation* DSC (Mark, 2005)

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

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

2.7.4 Pengujian Efek *Shape Memory*

Pengujian Efek *Shape Memory* ini dilakukan berdasarkan standar ASTM F2082-01. Metode dilakukan dengan pendinginan spesimen uji ke fasa nominal sehingga fasa sepenuhnya martensit, kemudian mendeformasi spesimen, dan memanaskan spesimen ke fasa austenitik sepenuhnya. Pengujian *SME* dilakukan untuk mengetahui persentase *recovery* dari paduan *shape memory* yang telah dideformasi. Bentuk spesimen untuk pengujian *SME* 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, lalu dipanaskan hingga terjadi *recovery shape*. Untuk mengetahui persentase *recovery* atau efek *shape memory* dapat dihitung dengan Persamaan 2.1 di bawah ini: (ASTM F2082-01)

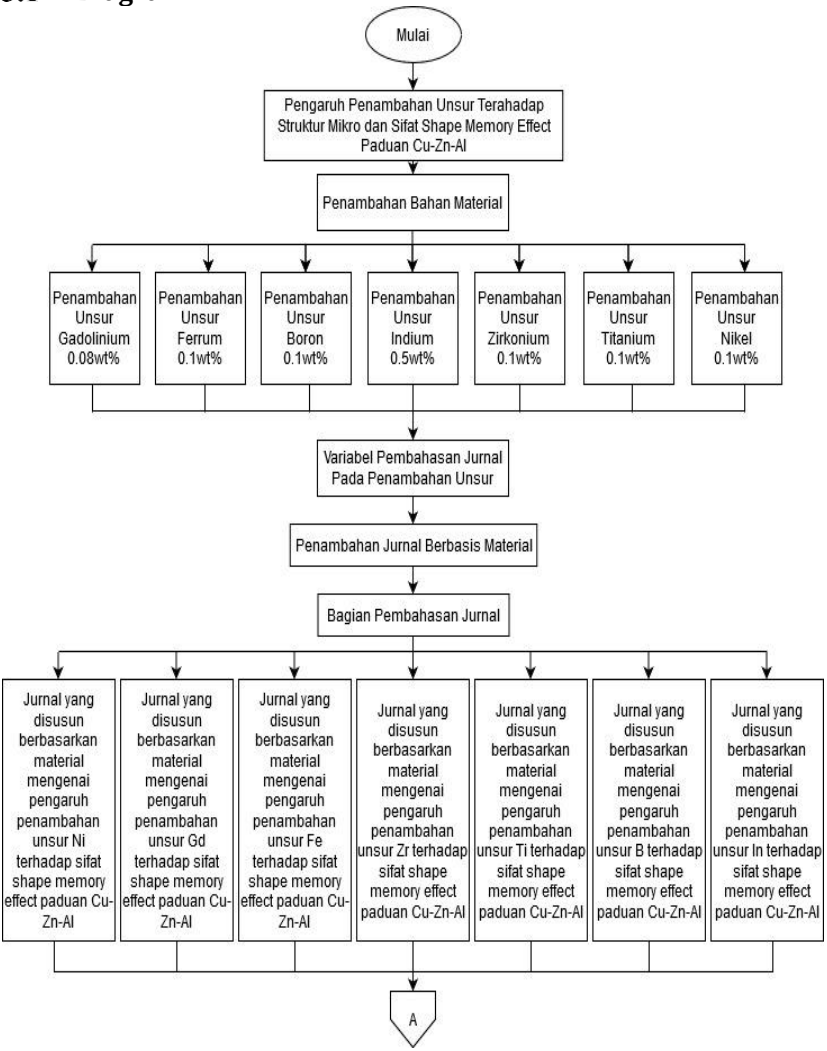
$$SME = \frac{\theta o - \theta t}{\theta o} \; x \; 100\% \qquad (2.1)$$

Dimana:
θ_0 = Sudut awal
θ_t = Sudut akhir setelah pemanasan

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir

3.2 Tabel Bahan dan Metode

Tabel 3.1 Tabel Bahan dan Metode

Unsur	Topik / Fokusan	Metode	Variabel	Referensi
Gd	Pengaruh Penambahan Unsur Gd terhadap Struktur Mikro dan *Shape Memory Effect* Paduan Cu-Zn-Al	1.Menggunakan komposisi Cu-26Zn-4Al 2. *Solution Treatment* 820ºC selama 10 menit 3. *Quenching* pada media oli 120ºC selama 5 menit	Penambahan unsur Gd : 1. 0 %wt 2. 0.04 %wt 3. 0.08 % wt 4. 0.12 % wt 5. 0.16 % wt 6. 2 % wt	Wen Xu Jia, 2007
B	Pengaruh Penambahan Unsur Boron dan *Aging* terhadap Sifat	1.Menggunakan komposisi Cu-14Zn-8.5Al 2. *Solution Treatment* pada	Penambahan unsur Boron: 1. 0 %wt 2. 0.1 %wt	G Young Kim, 1987

	Mekanik dan Temperatur Martensit Paduan Cu-Zn-Al	850°C selama 30 menit 3. *Quenching* pada temperatur ruang 4. *Aging* pada 250°C, 300°C dan 350°C		
In	Pengaruh dari Indium pada *Shape Memory Alloy* Cu-Zn-Al	1.Menggunakan komposisi Cu-20.5Zn-8.5Al 2. *Quenching* pada temperatur ruang	Penambahan unsur Indium: 1. 0%wt 2. 0.1%wt 3. 0.3%wt 4. 0.5%wt	Chanmuang, dkk, 2018
Zr	Pengaruh Penambahan Unsur Zr Pada Paduan Cu-Zn-Al Terhadap Struktur Kristal, Kekerasan, dan Struktur Mikro	1.Menggunakan komposisi Cu-24.8Zn-2.7Al 2. *Solution Treatment* Pada media air	Penamban unsur Zirkonium: 1. 0 %wt 2. 0.1 %wt	Adjiantoro Bintang, 2000
Fe-B	Karakterisasi Fasa dan Sifat Mekanik *Shape Memory Alloy* Cu-Zn-Al	1.Menggunakan komposisi Cu-17.9Zn-6.1Al 2.*Homogenizing* pada 800°C selama 4 jam 3. *Annealing* pada 450°C selama 1 jam	Penambahan Unsur : 1. 0.05 %wt B 2. 0.1 %wt B 3. 0,05 %wt Fe 4. 0.1 %wt Fe	Kanayo Alaneme Kenneth, dkk, 2017

Ti	Degradasi Sifat *Shape Memory Effect* Penambahan Unsur Ti pada Paduan Cu-Zn-Al	4. *Final Anneal* pada 400ºC selama 2 jam 1.Menggunakan komposisi 2. *Solution Treatment* pada 825ºC selama 30 menit 3. *Quenching* media es 4. *Aging* selama 2 jam pada 50ºC – 300ºC	Penamban unsur Titanium: 1. 0 %wt 2. 0.1 %wt	Bhuniya, A.K, dkk, 2004
Ni	Pengaruh Paduan Berbasis Cu Terhadap Pembentukan Fasa Martensit *Shape Memory Alloy*	1.Menggunakan komposisi 2.*Homogenizing* pada 200ºC selama 2 jam 3. *Solution Treatment* pada 920ºC selama 2 jam 4. *Quenching* pada temperature ruang dan media es	Penambanbahn unsur Nikel: 1. 4 %wt Ni 2. 5 %wt Ni	Dasgupta Rupa, dkk, 2014

3.3 Tabel Ruang Lingkup Pembahasan

Tabel 3.2 Tabel Ruang Lingkup Pembahasan

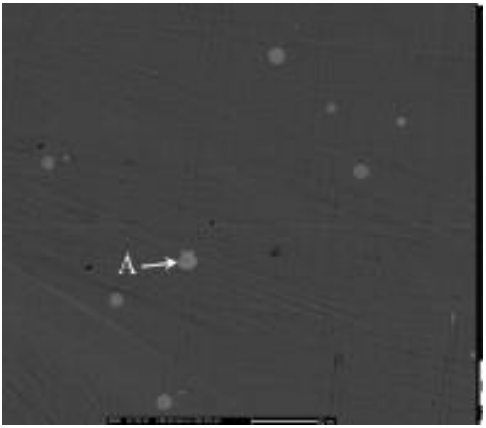
Unsur	Pengujian				Referensi
	Metalografi	DSC	SEM	SME	
Gd	√	√	√	√	Wen Xu Jia, 2007
B	√	-	√	-	G Young Kim, 1987
In	√	-	√	√	Chanmuang, dkk, 2018
Zr	√	-	-	-	Adjiantoro Bintang, 2000
Fe	√	-	√	-	Kanayo Alaneme Kenneth, dkk, 2017
Ti	√	√	-	-	Bhuniya, A.K, dkk, 2004
Ni	√	-	√	-	Dasgupta Rupa, dkk, 2014

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penambahan Unsur Gadolinium Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al

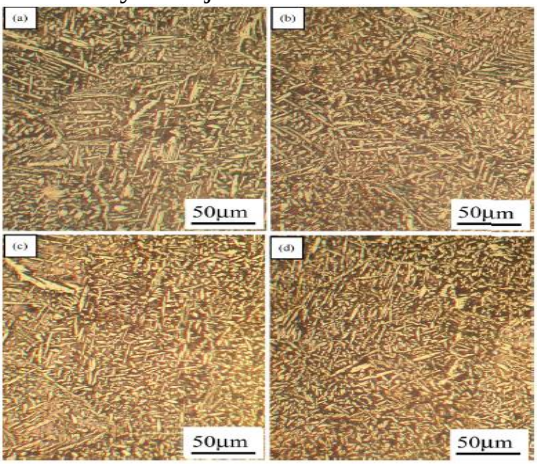
Gadolinium (Gd) merupakan salah satu logam tanah jarang, dimana logam tanah jarang dapat diekstrak dari mineral salah satunya mineral monasit. Logam Gd biasanya digunakan sebagai bahan dasar *contrast agent* dalam dunia kesehatan (Hendrati Diana,dkk, 2018). Pada penelitian ini menggunakan komposisi Cu-26Zn-4Al (wt%) yang divariasikan dengan penambahan unsur Gd sebanyak 0, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16 dan 0.2% wt. Paduan Cu-Zn-Al-Gd yang sudah divariabelkan kemudian dilakukan proses pengecoran, setelah berbentuk *as cast* dilakukan proses *solution treatment* pada temperatur 820°C selama 10 menit dan dilakukan *quenching* pada media oil pada temperatur 120°C selama 5 menit dilanjutkan dengan pendinginan pada media air pada temperature ruang, dengan komposisi yang sama dilakukan juga dengan *solution treatment* pada temperatur 880°C selama 5 jam dan dilakukan proses *quenching* pada media air.



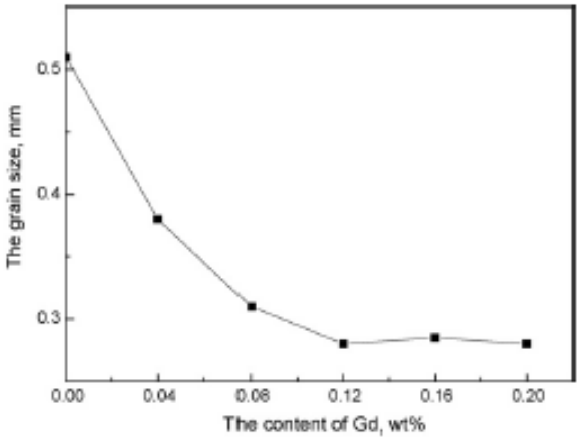
Gambar 4. 1 Hasil Pengujian SEM *as cast* Padauan Cu-Zn-Al-Gd (Wen Xu Jia, 2007)

Paduan Cu-Zn-Al-Gd yang sudah dilakukan proses pengecoran dilakukan pengujian SEM untuk mengetahui morfologinya. Pada Gambar 4.1 merupakan hasil pengujian SEM *as cast* paduan Cu-Zn-Al-Gd dimana dapat dilihat pada *as cast* membentuk prisipitat Gd yang membrntuk bulatan yang ditunjukkan pada titik A yang terletak di sepanjang batas butir. Prisipitat yang berada di sepanjAng batas butir disebabkan radius atomic unsur Gd lebih besar dari pada unsur Cu, Zn dan Al sehingga sulit untuk larut didalam matrix (Wen Xu Jia, 2007).

Penambahan Gd pada paduan Cu-Zn-Al mempengaruhi sturuktur mikro *as cast*, dimana saat dilakukan metalografi dapat dilihat adanya perubahan struktur mikro. *As cast* dilakukan proses etsa menggunakan campuran 5 gram $FeCl_3$ + 50 ml HCl + 100 ml aquades, kemudian dilakukan pengamatan dengan menggunakan mikroskop optik untuk diamati stuktur mikro yang terbentuk. Pada Gambar 4.2 dapat dilihat hasil stukruktur mikro *as cast* Cu-Zn-Al-Gd dengan semakin banyak jumlah unsur Gd yang ditambahkan menyebabkan butirnya menjadi semakin halus.

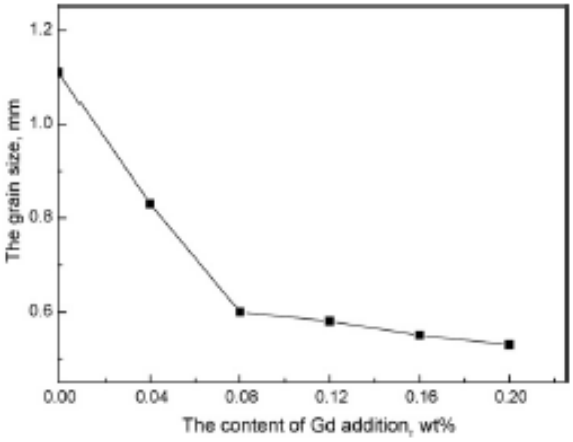


Gambar 4.2 Struktur Mikro *as cast* Paduan Cu-Zn-Al-Gd (a) penambahan 0%wt Gd (b) penambahan 0.04%wt Gd (c) penambahan 0.08%wt Gd (d) penambahan 0.12% Gd (Wen Xu Jia, 2007)



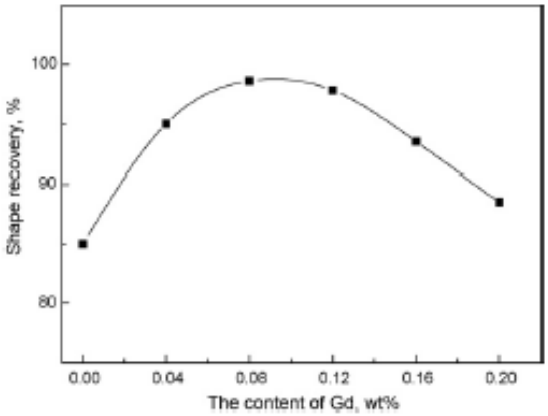
Gambar 4.3 Kurva Ukuran Butir dengan Kandungan unsur Gd *as cast* (Wen Xu Jia, 2007)

Pada gambar 4.3 dapat dilihat kurva hubungan antara ukuran butir dengan kandungan unsur Gd % wt dalam bentuk *as cast*, dimana dari grafik tersebut dapat dilihat pada saat 0.0wt% Gd didapatkan ukuran grain size sebesar 0.5 mm dan saat semakin banyak jumlah unsur Gd yang ditambahkan menyebabkan ukuran butirnya semakin kecil namun saat diberikan penambahan unsur lebih dari 0.12 wt% grafik tidak berubah secara signifikan. Pada Gambar 4.4 dapat dilihat juga kurva hubungan antara ukuran butir dengan kandungan unsur Gd %wt yang sudah dilakukan *solution treatment* pada temperatur 800°C dimana didapatkan grafik yang tidak jauh berbeda dengan grafik *as cast* yaitu pada saat 0.0wt% GD didapatkan grain size sebesar 1.1 mm dan semakin ditambahkan unsur Gd mengakibatkan ukuran butirnya menjadi semakin mengecil namun saat ditambahkan pada 1.2% atau lebih unsur Gd tidak terjadi perubahan yang signifikan pada ukuran butir paduan Cu-Zn-Al-Gd. Hal ini membuktikan bahwa penambahan unsur Gd memiliki peranan penting dalam memperlambat pertumbuhan butir selama proses pemanasan (Wen Xu Jia, 2007).



Gambar 4.4 Kurva Ukuran Butir dengan Kandungan unsur Gd setelah dilakukan proses *solution treatment* (Wen Xu Jia, 2007)

Shape Memory Effect dipengaruhi oleh adanya dislokasi pada sturktur mikro paduan Cu-Zn-Al-Gd. Gimana saat dilihat dari pengujian SEM terdapat presipitat Gd yang juga menyebabkan adanya dislokasi dan peningkatan kekerasan. Pada gambar 4.5 dapat dilihat kurva hubungan antara jumlah penambahan unsur Gd dengan rasio *shape memory effect*, dimana saat tidak ditambahkan unsur Gd rasio *shape memory effect* nya hanya 70% sedangkan saat dilakukan penambahan unsur pada 0.08wt% dan 0.12wt% cu-zn-al-gd memiliki rasio *shape memory effect* tertinggi yaitu 98.6%, namun saat melebihi 0.12%wt terjadi penurunan rasio *shape memory effect* .Sehingga dapat disimpulkan adanya penambahan unsur Gd pada jumlah tertentu dapat meningkatkan rasio *shape memory alloy*, hal ini bisa terjadi karena saat unsur Gd ditambahkan pada paduan Cu-Zn-Al , unsur Gd mudah bereaksi dengan pengotor sehingga mengurangi unsur pengotor di batas butir dan membentuk presipitat. Adanya presipitat inilah yang menyebabkan pembentukan martensit meningkat sehingga *shape memory effect* nya juga meningkat.

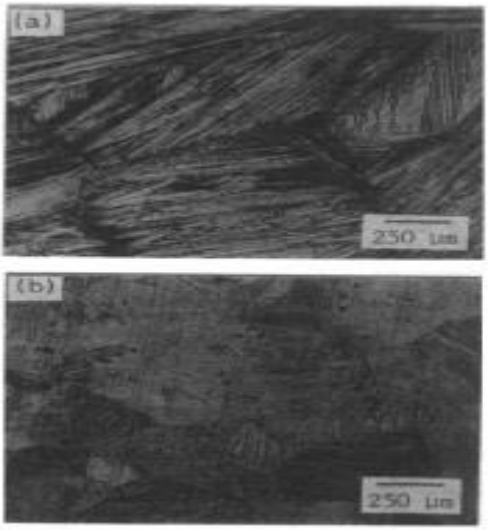


Gambar 4.5 Kurva Penambahan Unsur Gd dengan Rasio *Shape Memory Effect* (Wen Xu Jia, 2007)

4.2 Hasil Penambahan Unsur Boron Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al

Shape memory alloy berbasis Cu lebih menarik dibandingankan paduan *shape memory alloy* Ni-Ti karena paduan berbasis cu memiliki harga yang relative murah dan relatif mudah dalam pemprosesannya. Pada penelitian ini menggunakan dua sampel, dimana sampel pertama memiliki komposisi Cu-14Zn-8.5 Al dan sampel kedua memiliki komposisi Cu-14Zn-8.5Al-0.1B, kemudian dilakukan proses pengecoran. Setelah dilakukan proses pengecoran selanjutnya *as cast* dilakukan proses *solution treatment* dengan temperatur 850ºC selama 0,5 jam dan dilanjutkan dilakukan *quenching* pada temperatur ruang kemudian dilanjutkan dengan proses *aging* dengan temperatur 250ºC, 300ºC, 350ºC dengan variasi *holding time.*

Paduan Cu-Zn-Al yang sudah dilakukan penambahan unsur boron dilakukan pengujian metalografi untuk mengetahui perbedaan struktur mikro antara sampel yang tanpa ditambahkan dengan boron dan sampel kedua yang ditambahkan dengan boron pada Gambar 4.6 dapat dilihat hasil struktur mikro antara sampel pertama dengan sampel kedua.

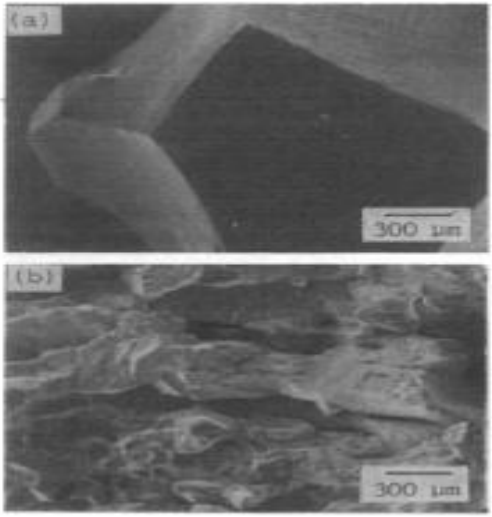


Gambar 4.6 Hasil Struktur Mikro Sampel Cu-Zn-Al (a) dan Sampel Cu-Zn-Al-B (b) (G Young Kim, 1987)

Pada Gambar 4.6 diatas dapat dilihat hasil dari sttuktur mikro paduan Cu-Zn-Al dan paduan Cu-Zn-Al-B, dimana ditunjukkan secara signifikan terjadi pengecilan ukuran butir, disertai dengan halusnya struktur martensit, rata-rata ukuran butir paduan Cu-Zn-Al kurang lebih 2mm sedangan paduan Cu-Zn-Al-B memiliki ukuran butir 400µm , sehingga dengan adanya penambahan unsur boron menghasilkan kurang lebih 80% pengecilan ukuran butir sehingga jumlah martensit meningkat yang mengakibatkan semakin banyak terjadi dislokasi dan *shape memory effect*nya meningkat.(G Young Kim, 1987).

Pengujian SEM yang dilakukan pada peneitian menggunakan data dari pengujian tarik dari sampel pertama dan sampel kedua, Pada Gambar 4.7 dapat dilihat dari hasil pengujian SEM, dimana pada paduan Cu-Zn-Al dari hasil pengujian tarik didapatkan ukuran butir yang kasar , sedangkan pada paduan Cu-Zn-Al-B didapatkan hasil ukuran butir yang lebih halus, sehingga

dengan penambahan unsur boron saat dilakukan proses solution treatment dalam menghambat pertumbuhan butir sehingga butirnya menjadi lebih halus.



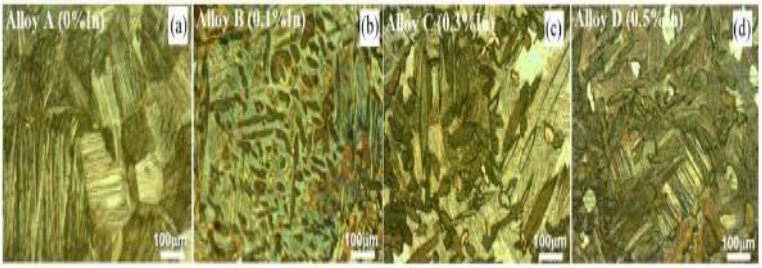
Gambar 4 7 Hasil Pengujian SEM Pengujian Tarik Sampel Cu-Zn-Al (a) dan Sampel Cu-Zn-Al-B (b) (G Young Kim, 1987)

4.3 Hasil Penambahan Unsur Indium Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al

Shape memory alloy (SMA) merupakan *smart materials* yang memiliki kemampuan ingat bentuk, dimana saat diberi *bending* dan dilakukan proses pemanasan atau pendinginan bisa kembali kedalam bentuk semulanya, sifat ini yang sering disebut dengan *shape memory effect.*Pada penelitian ini *shape memory alloy* yang digunakan menggunakan paduan Cu-Zn-Al namun diberikan variabel berupa penambahan unsur indium. Indium yang ditambahkan pada paduan ini berupa 0.1wt% hingga 0.5wt%. Paduan Cu-Zn-Al-In dilakukan proses pengecoran dengan menggunakan metode *lost wax casting* dengan temperatur 1100°C

kemudian dilakuka proses *quenching* dengan media air pada temperatur ruang.

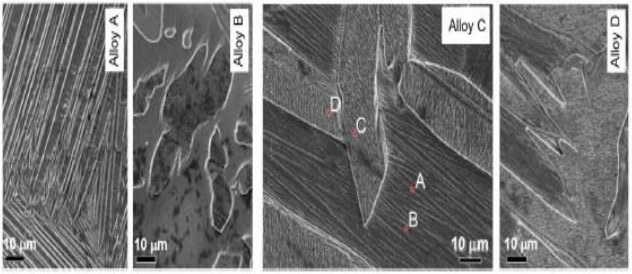
Pada penelitian ini dilakukan pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk, dimana *as cast* yang sudah diberikan perlakukan panas dilanjutkan dengan proses etsa menggunakan larutan asam asam H_2SO_4 dengan rasio 1 :1 dengan aquades. Pada gambar 4.8 dapat dilihat struktur mikro dari paduan Cu-Zn-Al-In dengan berbagi macam penambahan unsur indium, dimana dari pengujian metalografi dari semua sampel ditemukan adanya fase martensit yang berbentuk seperti jarum, namun pada setiap penambahan unsur indium menyebabkan butir lebih memanjang. Pada paduan Cu-Zn-Al didapatkan martensit yang berbentuk seperti jarum dan arahnya bervariasi, sedangkan saat diberikan penambahan unsur indium ukurannya menjadi memanjang dimana ukurannya menjadi bertambah sehingga bisa meningkatkan dislokasi yang terjadi dan *shape memory effect*nya meningkat (Chanmuang, dkk, 2018).



Gambar 4.8 Hasil Struktur Mikro Paduan Cu-Zn-Al-In dengan 0%wt Unsur Indium (a), 0,1%wt Unsur Indium (b), 0.3% Unsur Indium (c) dan 0,5%wt Unsur Indium (d) (Chanmuang, dkk, 2018)

Pada Gambar 4.9 merupakan hasil dari pengujian SEM paduan Cu-Zn-Al-In, dimana pada gambar tersebut menunjukkan struktur seperti jarum dari fasa martensit β' dimana setiap penambahan unsur indium pada paduan Cu-Zn-Al mengakibatkan meningkatnya jumlah fasa β yang terbentuk. Terdapat juga fasa

martensit yang berbentuk seperti plat, adanya fasa martensit yang berbentuk plat ini mengacu pada sturktur martensit 2H / twinned martensit (Chanmuang, dkk, 2018).



Gambar 4.9 Hasil Pengjian Paduan Cu-Zn-Al-In dengan 0%wt Unsur Indium (a), 0,1%wt Unsur Indium (b), 0.3% Unsur Indium (c) dan 0,5%wt Unsur Indium (d) (Chanmuang, dkk, 2018)

Shape memory effect (SME) pada paduan Cu-Zn-Al-In dapat diketahui seberapa besar *recovery*nya dengan dilakukan bending standart ASTM F2082-01

$$\eta = \frac{\phi - \theta}{\emptyset} \text{ x } 100\% \quad , \qquad (4.1)$$

Sampel dibending pada sudut awal (Ø) dan kemudian dipanaskan menggunakan pemanas pada temperature 700°C untuk kembali ke bentuk semula, kemudian dilihat sudut *recovery*nya (θ) dan dapat diketahui *shape memory effect*nya Pada Tabel 4.1 didapatkan hasil SME paduan Cu-Zn-Al-In.

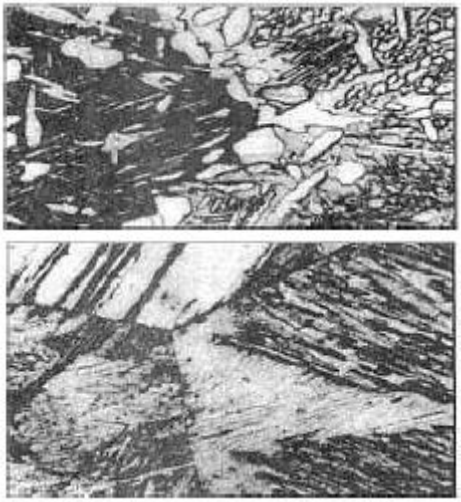
Tabel 4.1 Hasil Pengujian SME Paduan Cu-Zn-Al-In (Chanmuang, dkk, 2018)

Alloy	Komposisi Paduan (wt%)				Nilai SME
	Cu	Zn	Al	In	
A	*bal.*	20.8	5.8	0.0	67%
B	*bal.*	20.8	5.8	0.1	67%
C	*bal.*	20.8	5.8	0.3	56%
D	*bal.*	20.8	5.8	0.5	67%

Dari hasil diatas dapat dilihat pertambahan unsur indium pada 0.3wt% indium terjadi penurunan nilai SME , hal ini bisa terjadi karena pada saat ditambahkan 0.3% In terjadi berubahan variasi fasa martensit sehingga terjadi perubahan ukuran butir fasa martensit sehingga menurunnya nilai *shape memory effect* (Chanmuang, dkk, 2018).

4.4 Hasil Penambahan Unsur Zirkonium Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al

Paduan *shape memory* adalah paduan yang mempunyai sifat pemulihan regangan dan tegangan apabila dipanaskan atau didiginkan. Sifat ini disebabkan karena terjadi transformasi fasa induk dan fasa *martensit* yang *reversible.* Pemulihan regangan dapat terjadi pada satu arah (*one way shape memory effect*) dan dua arah (*two way shape memory effect*). Pada penelitian ini menggunakan paduan Cu-Zn-Al yang ditambahkan unsur zirconium, dimana setelah dilakukan proses pengecoran dilanjutkan dengan proses *solution treatment* dengan temperature 875°C dan dilakukan *quenching* dengan media air. Untuk mengetahui struktur mikronya dilanjutkan dengan proses etsa dengan larutan $K_2Cr_2O_7$ 1 gram + H_2SO_4 4 ml + HCl 2 tetes + aquades 50ml. Penambahan unsur zirkonium mengakibatkan adanya perubahan struktur mikro Pada Gambar 4.10 menunjukkan hasil struktur mikro *as cast* paduan Cu-Zn-Al dan hasil mikro struktur *as cast* paduan Cu-Zn-Al-Zr , dimana menunjukkan dari penambahan unsur Zr pada paduan Cu-Zn-Al mengakibatkan ukuran butirnya menjadi kecil. Hal ini menunjukkan dengan penambahan unsur Zr dapat memperlambat pertumbuhan butir sehingga laju pengintian lebih besar dari pada laju pertumbuhan butir, adanya pengecilan ukuran butir mengakibatkan meningkatnya dislokasi pada struktur mikro paduan Cu-Zn-Al-Zr sehingga meningkatkan *shape memory Effect*nya (Adjiantoro Bintang, 2000).

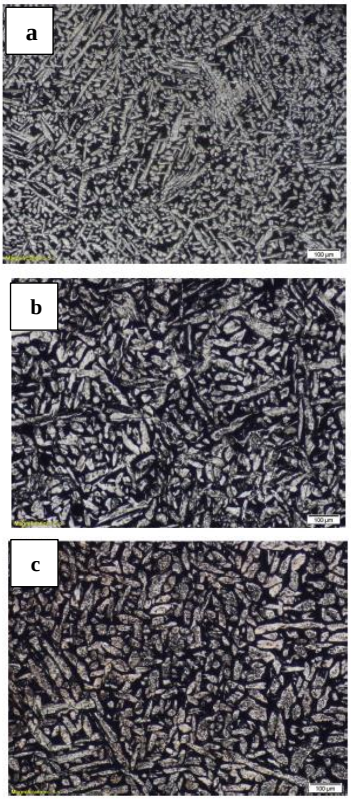


Gambar 4.10 Struktur Mikro *as cast* Paduan Cu-Zn-Al (a) dan Paduan Cu-Zn-Al-Zr (b).(Adjiantoro Bintang, 2000)

4.5 Hasil Penambahan Unsur Fe Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al

Pada penelitian ini paduan Cu-Zn-Al ditambahkan unsur berupa Fe, dimana masing-masing sampel dilakukan proses pengecoran, setelah proses pengecoran selesai *as cast* dilakukan proses *homogenizing* dengan temperatur 800°C selama 4 jam dan dilakukan proses *quenching* dengan media udara, kemudia dilanjutkan dengan proseso *annealing* pada temperatur 450°C selama 1 jam dan didinginkan di udara untuk menghilangkan *internal stress* dilanjutkan dengan *final anneal* pada temperatur 400°C selama 2 jam dan dilakukan *quenching* dengan media air pada temperatur ruang.

Penambahan unsur Fe pada paduan Cu-Zn-Al akan mempengaruhi struktur mikro yang terbentuk, metalografi ini menggunakan proses etsa dengan 5 gram $FeCl_3$ + 10 ml HCl + 95 ml Etanol dan dilakukan Swab selama 10-20 detik.



Gambar 4.11 Hasil Struktur mikro penambahan unsur Fe pada paduan Cu-Zn-Al (a) penambahan 0%wt Fe (b) penambahan 0.05%wt Fe (c) Penambahan 0.1%wt Fe (Kanayo Alaneme Kenneth, dkk, 2017)

Pada Gambar 4.11 menunjukkan hasil penambahan unsur Fe pada paduan Cu-Zn-Al, dimana pada Gambar 4.11(a) menunjukkan hasil struktur mikro penambahan 0%wt Fe pada unsur Cu-Zn-Al sedangkan pada Gambar 4.11(b) menunjukkan hasil penambahan 0.05%wt Fe dan pada Gambar 4.11(c)

menunjukkan hasil penambahan 0.1%wt Fe pada Gambar4.11 dapat dilihat penambahan unsur Fe menyebabkan ukuran butir fasa martensit membesar sedangakan pada Penambahan unsur Fe 0.05%wt dan 0.1%wt pada paduan Cu-Zn-Al tidak menunjukkan hasil yang signifikan terkait pertumbuhan butir, hal ini menyebabkan dengan penambahan unsur Fe mengakibatkan penurunan *shape memory effect*, hal ini bisa terjadi karena fasa martensit mengalami pembesaran ukruan butir sehingga mengurangi dislokasi yang terdapat pada paduan Cu-Zn-Al. dengan penambahan unsur Fe 0.05%wt dan 0.1%wt tidak mengalami perubahan struktur mikro yang signifikan sehingga tidak mempengaruhi *shape memory effect* (Kanayo Alaneme Kenneth, dkk, 2017).

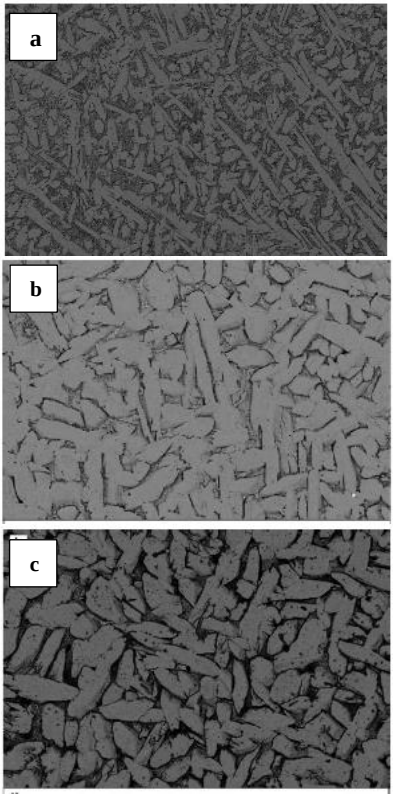
Pada Tabel 4.2 menunjukkan ketebalan rata-rata fasa martensit pada paduan Cu-Zn-Al-Fe, dimana dapat dilihat terjadinya perumbuhan fasa martensit yang signifikan dari 13 ± 0.17 µm menjadi 29 ± 0.22 µm pada penambahan 0.05wt% Fe dan 28 ± 0.10 µm pada penambahan 0.1wt% Fe

Tabel 4.2 Ketebalan Rata-Rata Fasa Martensit (Kanayo Alaneme Kenneth, dkk, 2017)

Paduan	Ketebelan rata-rata fasa Martensit (µm)
Cu-Zn-Al	13 ± 0.17
Cu-Zn-Al-0.05Fe	29 ± 0.22
Cu-Zn-Al-0.01Fe	28 ± 0.10

Pada Gambar 4.12 merupakan hasil dari pengujian SEM paduan Cu-Zn-Al-Fe, pada gambar4.12(a) merupakan hasil dari pengujian SEM paduan Cu-Zn-Al dimana pada bagian yang berwarna hitam merupakan fasa martensit dengan berbentuk seperti jarum, pada gambar 4.12(b) merupakan hasil pengujian SEM dengan penambahan 0.05 Fe dimana terjadi pembesaran ukuran butir martensit , begitu juga pada gambar 4.12(c)

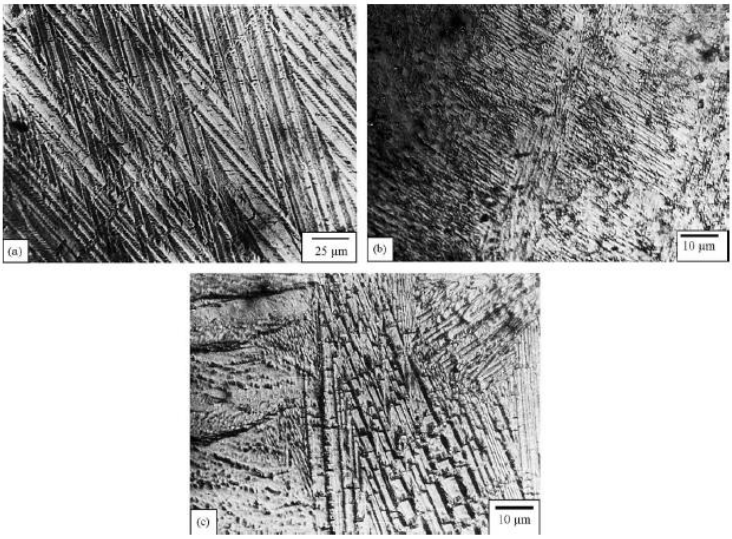
penambahan unsur Fe juga mengakibatkan bertumbuhnya ukuran butir martensit. Sehinnga dengan penambahan unsur Fe mengakibatkan ukuran butir martensit menjadi lebih besar menyebabkan berkurangnya dislokasi yang terbentuk sehingga menurunkan sifat *shape memory effect.*



Gambar 4.12 Hasil pengujian SEM penambahan unsur Fe pada paduan Cu-Zn-Al (a) penambahan 0wt% Fe (b) penambahan 0.05wt% Fe (b) penambahan 0.1wt% Fe (Kanayo Alaneme Kenneth, dkk, 2017)

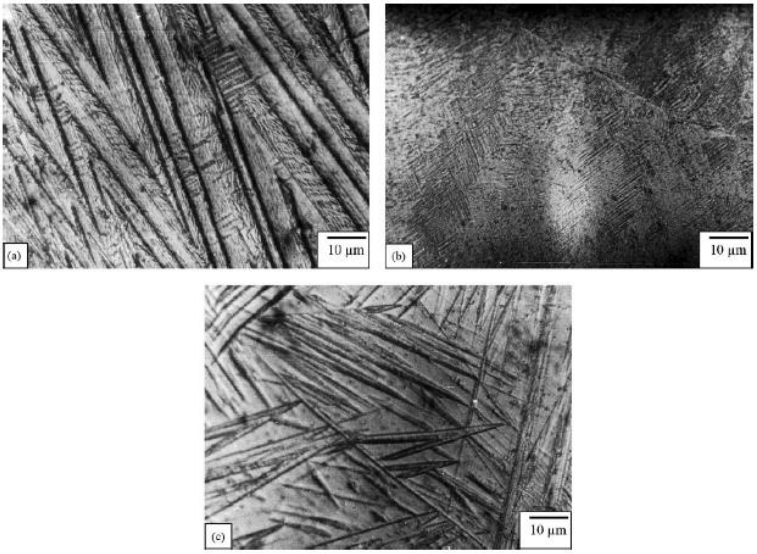
4.6 Hasil Penambahan Unsur Ti Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al

Shape memory alloy (SMA) merupakan paudan yang dapat kembali kebentuk semula ketika dipanaskan diatas temperatur tertentu. Karakteristik utama yang yang menyebabkan adanya sifat *shape memory alloy* adalah terjadinya tranformasi fasa martensit menjadi fasa austenite. Pada penelitian ini paduan Cu-Zn-Al ditambahkahkan unsur Ti 0.1% wt, dimana paduan setelah dilakukan proses pengecoran dilanjutkan dengan proses *solution treatment* dengan temperatur 825ºC selama 30 menit dan dilakukan *quencing* dengan media air es. Kemudian sampel dilakukan proses *aging* selama 2 jam dengan perbedaan temperatur antara 50ºC hingga 300ºC.



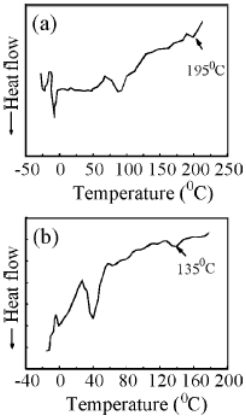
Gambar 4.13 Hasil Pengujian Metalografi Paduan Cu-Zn-Al (a) setelah dilakukan proses *after aging* pada 75ºC (b) setelah dilakukan proses *after aging* 250ºC (c) setelah dilakukan proses *after aging* 300ºC (Bhuniya, A.K, dkk, 2004)

Pada Gambar 4.13(a)-(c) merupakan hasil dari pengujian metalografi paduan Cu-Zn-Al yang telah dilakukan proses *aging* dengan variasi temperatur selama 2 jam, Pada Gambar 4.13.a menunjukkan struktur mikro fasa martensit pada temperatur 75°C yang menunjukkan sedikit terjadi dislokasi dan hanya satu variasi arah martensit. Pada Gambar 4.13.b dilakukan proses *aging* dan ditunjukkan hasil fasa martensit yang terbentuk semakin banyak dan dengan variasi arah yang lebih banyak. Pada Gambar 4.13.c terjadi penurunan jumlah dislokasi fasa martensit, hal ini terjadi karena terjadi proses *over aging* sehingga presipitatnya hilang dan dislokasi menurun.



Gambar 4.14 Hasil Pengujian Metalografi Paduan Cu-Zn-Al-Ti (a) setelah dilakukan proses *after aging* pada 75°C (b) setelah dilakukan proses *after aging* 250°C (c) setelah dilakukan proses *after aging* 300°C (Bhuniya, A.K, dkk, 2004)

Pada Gambar 4.14(a)-(c) menunjukkan hasil struktur mikro paduan Cu-Zn-Al-Ti, Pada Gambar 4.14.a menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan paduan Cu-Zn-Al dimana terdapat fasa martensit dengan satu variasi arah. Pada Gambar 4.14.b terjadi peningkatan jumlah fasa martensit yang terbentuk dengan bertambah juga variasi fasa martensit yang terbentuk, sedangkan Pada Gambar 4.14.c menunjukkan terbentuknya martensit, namun penambahan unsur Ti mengakibatkan penurunan jumlah dislokasi yang terbentuk sehingga dengan penambahan unsur Ti mengakibatkan penurunan *shape memory effect*. Dengan perbedaan hasil struktur ini menunjukkan adanya penambahan unsur Ti pada paduan Cu-Zn-Al dapat mempengaruhi jumlah dislokasi yang terbentuk sehingga mempengaruhi sifat *shape memory effect* yang terbentuk (Bhuniya, A.K, dkk, 2004).



Gambar 4.15 Hasil pengujian DSC (a) Paduan Cu-Zn-Al dan (b) paduan Cu-Zn-Al-Ti (Bhuniya, A.K, dkk, 2004)

Pengujian DSC juga dilakukan pada paduan Cu-Zn-Al dan paduan Cu-Zn-Al-Ti, Pada Gambar 4.15(a)-(b) dapat dilihat temperatur transformasi dari paduan Cu-Zn-Al dan Paduan Cu-Zn-Al , dimana dapat dilihat terjadi pengurangan temperatur

transformasi dikarenakan range komposisi yang berbeda pada kedua paduan. Pada Tabel 4.3 dapat dilihat perbandingan temperatur transformasi antara paduan awal dan paduan yang sudah ditambahkan unsur Ti.

Tabel 4.3 Temperatur Transformasi Paduan A dan B (Bhuniya, A.K, dkk, 2004)

Alloy	A_s	A_f	T_p
A	65	122	77
B	10	41	23

Pada Tabel 4.3 menunjukkan perbandingan antara alloy A dan alloy B secara jelas menunjukkan adanya penurunan stabilitas fasa martensit pada sampel B dari pada sampel A. Hal ini bisa terjadi karena range komposisi yang terjadi pada sampel B. Pada Tabel 4.3 menunjukkan perbedaan A_s dan A_f alloy A lebih besar daripada alloy B sehingga martensit lebih cepat pertumbuhannya pada alloy B. Adanya Ti dapat mengurangi kecepatan pertumbuhan butir, hal ini mengarah pada penurunan Ms Temperatur sehingga stabilitas martensit pada alloy B mengalami penurunan.

4.7 Hasil Penambahan Unsur Ni Terhadap *Shape Memory Effect* Pada Paduan Cu-Zn-Al

Pada penelitian ini Paduan Cu-Zn-Al ditambahkan unsut Ni, dimana besarnya unsur Ni yang ditambahkan yaitu 4 %wt Ni dan 5% wt Ni. Kemudian dilakukan proses pengecoran, *as cast* yang terbentuk selanjutnya dilakukan proses *homogenizing* dengan temperatur 200ºC selama 2 jam di dalam *furnace* dan didinginkan dengan media udara di dalam *furnace*. Selanjutnya dilakukan proses *solution treatment* dengan temperatur 920ºC selama 2 jam dan dilakukan proses *quenching* dengan media air es dengan temperatur ruang.

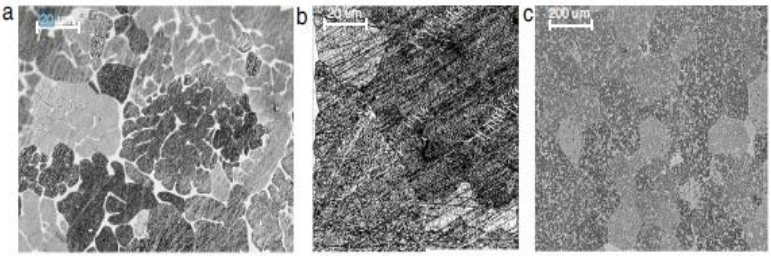
Pada Tabel 4.4 merupakan hasil dari rata-rata ukuran butir paduan setelah ditambahkan unsur Ni *as-cast*, dari tabel 4.4 dapat

dilihat setelah ditambahkan unsur Ni ukuran butir yang terbentuk menjadi lebih besar pada panambahan 4wt% Ni rata-rata ukuran butirnya 100-120 µm dan pada penambahan 5wt% Ni rata-rata ukuran butirnya menjadi 160-200 µm

Tabel 4.4 Rata-rata Ukuran Butir Paduan Cu-Zn-Al-Ni *as-cast* (Dasgupta, dkk, 2014)

Paduan	Rata-rata ukuran butir (µm)
Cu-Zn-Al	60-70
Cu-Zn-Al-4Ni	100-120
Cu-Zn-Al-5Ni	160-200

Pada Gambar 4.16 merupakan hasil struktur mikro paduan Cu-Zn-Al-Ni yang sudah dilakukan perlakuan panas , dimana saat ditambahkan unsur Ni mengakibatkan berubahnya ukuran butir pada paduan Cu-Zn-Al-Ni. dapat dilihat Pada Gambar 4.16 terjadi perubahan struktur mikro, pada paduan Cu-Zn-Al terdapat ukuran *grain size* yang besar pada fasa martensit, sedangkan pada paduan Cu-Zn-Al-Ni terjadi pengecilan *grain size* fasa martensit, hal ini menandakan dengan dilakukannya penambahan unsur Ni pada paduan Cu-Zn-Al mengakibatkan mengecilnya ukuran butir fasa martensit sehingga meningkatkan dislokasi, hal ini menyebabkan meningkatkan *shape memory effectnya* (Dasgupta, dkk, 2014).



Gambar 4.16 Hasil Struktur Mikro Paduan Cu-Zn-Al dengan (a) Penambahan 0% Unsur Ni, (b) Penambahan 0.4% Unsur Ni (c) Penambahan 0.5% Unsur Ni (Dasgupta, dkk, 2014)

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Pengaruh penambahan unsur pada paduan Cu-Zn-Al mempengaruhi struktur mikro yang terbentuk. Pada unsur Gd membentuk ukuran butir paling kecil yaitu 1,1 mm pada penambahan 0.08wt% dan 0.12wt%, pada unsur Fe 0.1wt% dan unsur B 0.1%wt mengalami pembesaran ukuran butir.
2. Pengaruh penambahan unsur pada paduan Cu-Zn-Al mempengaruhi *shape memory effect*, dari semua unsur yang ditambahkan unsur Gd memiliki nilai *shape memory effect* tertinggi yaitu 98.6% dengan penambahan unsur 0.08wt% dan 0.12wt serta penambahan unsur Fe dan B menyebabkan penurunan *shape memory effect.*

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah:

1. Menentukan komposisi paduan dengan teliti, karena perbedaan komposisi sedikit saja dapat mempengaruhi fasa serta sifat mekanik yang didapatkan.
2. Menggunakan unsur tambahan yang memiliki radius atomic unsur yang lebih besar dari pada paduan utama, sehingga dapat dislokasi yang lebih banyak disepanjang batas butir

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR PUSTAKA

_, 1991. **ASM Handbook Volume 4 : Heat Treating**. ASM Handbook International Commitee.

_, 1992. **ASM Handbook Volume 2 : Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials**. ASM International Handbook Commite.

_, 1992. **ASM Handbook Volume 3 : Alloy Phase Diagrams**. ASM International Handbook Commitee.

_, 2004. **ASM Handbook Volume 9 : Metallography and Microstructure.** ASM International Handbook Commitee.

Adjiantoro, B. & Budiarto, 2000. "Pengaruh Penambahan Unsur Zr dan TiB Pada Paduan Cu-Zn-Al Terhadap Struktur Kristal, Kekerasan, dan Sruktur Mikro". **Puslitbang Metalurgi-LIPI.**

Aghinotri, R. & Sidharth, B., 2016. "Syhthesis and Characteritation of CuZnAl Based Shape Memory Alloys and to Optimize Behavior on Different Properties by Varying Weight Percentage". **International Journal of Material Science and Engineering**, 4(4).

Alaneme, K. K., Okotete, E. A. & Maledi, N., 2017. :Phase Characterisation and Mechanical Behaviour of Fe-B modified Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys:. **Journal od Materials Research and Technology**, p. 11.

Apriani, S., 2001. "Analisa Kandungan Logam Berat Besi (Fe) dan Kromium (Cr) Pada Sumur Artesis dan Sumur Penduduk Dengan Menggunakan Metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) di Kelurahan Rejo Sari Kecamantan Tenayan Raya Kota Pekanbaru". **Jurnal FMIPA**, 2(2).

Bhuniya, A., Chattopadhyay, P., Datta, S. & Banerjee, M., 2005. "On The Degradation of Shape Memory Effect in Trace Ti-added Cu-Zn-Al Alloy". **Materials Science and Engineeering A**, pp. 125-132.

Callister, W. D., 2014. **Materials Science and Engineering An Introduction 9th Edition**. United States of America: john Wiley and Sons, Inc.

Chanmuang, C., Niyomsoan, S. & Chomsaeng, N., 2018. "Effect of Indium in Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys". **IOP Publishing Ltd.**

Collini, L., 2010. **Copper Alloys - Early Applications and Current Performance**. Enhanching Prosesses Intech.

Dasgupta, R. et al., 2014."Effect os Alloying Constituents on The Martensitic Phase Formation in Some Cu-based SMAs". **Journal of Material Research and Technology**, pp. 264-273.

Elsner, H., 2010. **Heavy Minerals of Economic Infortance**. Canada: Assesment Maual Federal Institute of Geoscience and Natural Resource (BGR).

Gouda, E. S., 2014. "Classifications, Characterization and Applications of Metallic Alloys". **International Journal of Physics and Astronomy**, pp. 15-49.

Groover, M. P., 2010. **Fundamentals of Modern Manufacuring Materials, Processes, and System 4th Edition**. United States of America: John WIley & Sons, Inc.

Han, Y. S. & Kim, Y. G., 1987. "The Effects Of Boron And Aging On Mechanical Properties And Martensitic Temperatures In Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys". **Pergamon Journals, Ltd, All rights reserved**, 21(7), pp. 947-952.

Kaufmann, E.N. 2003. **Characterization of Materials: Volumes 1 and 2.** Hokoben: John Wiley & Sons

Kumar, P. d. D. L., 2008. Shape Memory Alloys. **Modelling and Engineering Applications**, p. Springer US.

Mabruri, E., 2012. "Pengaruh Solution Annealing dan Aging pada Kawat Paduan Shape Memory Ni-Ti dan Ni-Ti-Cu". **Pusat Penelitian Metalurgi** - *LIPI*, pp. 77 - 84.

Mark, H., 2005. **Encyclopedia Of Polymer Science Technology**. Amerika: John Wiley & Sons, Inc.

Matoh, T., 1997. "Boron on Plant Cell Walls". **Plant and Soil Journal**, 193(5), pp. 59-70.

Sawitri, D. d. A. F., 2013. **Perancangan Mekanik Mesin Poles Untuk Proses Metalografi Bahan Menggunakan Motor Lisrik**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Sudrajat, A., 1999. **Teknologi dan Manajemen Sumberdaya Mineral**. Bandung: ITB.

Suwargi, E., Pardiato, B. & Ishlah, T., 2010. "Potensi Logam Tanah Jarang di Indonesia:. **Sumber Daya Geologi ISSN 1907-5367**, 5(3).

Xu, J. W., 2008. "Effects of Gd Addition on Microstructure and Shape Memory Effect of Cu-Zn-Al Alloy". **Journal of Alloys and Compounds**, Issue 331-335, p. 448.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

UCAPAN TERIMA KASIH

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

1. Kedua orang tua penulis yang selalu mendoakan, memberikan motivasi dan semangat selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Handis selaku *partner* Tugas Akhir penulis yang berjuang bersama dalam Tugas Akhir ini.
3. Mas Abrar dan Mas Garias selaku kakak tingkat yang selalu membantu dan membimbing penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
4. Arfan, Ica dan Luckyta *partner shape memory alloys* yang selalu membantu dan memberi semangat serta motivasi.
5. Keluarga besar MT18 yang tidak henti-hentinya memberikan semangat kepada penulis serta menjadi tempat kembali dan rumah yang nyaman untuk penulis.
6. HMMT Rapi yang telah mewarnai kehidupan kampus penulis dengan perjuangan dalam kehidupan berorganisasi di departemen
7. Keluarga besar HMMT FTIRS 17/18, 18/19 yang menjadi tempat untuk berkembang di kampus serta memberikan pengalaman dan pembelajaran.
8. Departemen Hublu HMMT FTIRS yang selalu menemani, memberikan warna, dan memberikan banyak pengalaman selama tahun kedua dan ketiga berkuliah.
9. MT16, MT17, MT19, 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 Juli 2020
Penulis

Aditya Eka Kurniawan

BIODATA PENULIS

Penulis lahir di Lumajang 6 Mei 1997 sebagai anak pertama. Penulis menempuh Pendidikan formal dimulai dari SDN Ditrotrunan 1 Lumajang tahun 2004 – 2010. Dilanjutkan di SMP Negeri 1 Sukodono tahun 2010 – 2013. Kemudian dilanjutkan di SMA Negeri 2 Lumajang pada tahun 2013 – 2016. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan Pendidikan S-1 di Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama berkuliah di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, penulis pernah mengikuti kegiatan pelatihan LKMM Pra TD, LKMM TD dan BMS. Penulis juga aktif dalam kegiatan berorganisasi di Himpunan Teknik Material dan Metalurgi (HMMT FTI-ITS) sebagai staff hubungan luar pada kepengurusan 2017/2018 dan sebagai Kabiro Industri hubungan luar pada kepengurusan 2018/2019. Selain aktif di organisasi tingkat departemen, penulis juga aktif mengikuti kepanitiaan di tingkat institut seperti ITS EXPO 2017 Dalam bidang akademik penulis tercatat sebagai Asisten Laboratorium Fisika Material pada tahun 2017, serta Koor Grader Teknologi Pengecoran tahun 2019. Untuk menyelesaikan Pendidikan S1, penulis melakukan penelitan dalam bidang studi Metalurgi Manufaktur (Pengecoran dan Perlakuan Panas) dengan tugas akhir berjudul “Review Pengaruh Penambahan Unsur Terhadap Struktur Mikro dan Sifat *Shape Memory Effect* pada Paduan Cu-Zn-Al” Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: adityaekakurniawan06@gmail.com, No. HP : 083847616173