



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR –TL184834

**REVIEW PENGARUH PROSES PERLAKUAN PANAS PADA
SHAPE MEMORY ALLOY TERHADAP SIFAT EFEK SHAPE
MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO**

**MUHANDIS HARAS ALI MOHAMAD
NRP. 0251164000065**

**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 PROSES PERLAKUAN PANAS
PADA SHAPE MEMORY ALLOY TERHADAP SIFAT
EFEK SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO**

MUHANDIS HARAS ALI MOHAMAD
NRP. 0251164000065

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 EFFECT OF HEAT TREATMENT PROCESS IN
SHAPE MEMORY ALLOY ON SHAPE MEMORY
EFFECT AND MICROSTRUCTURE**

MUHANDIS HARAS ALI MOHAMAD
NRP. 02511640000065

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

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**PENGARUH PROSES PERLAKUAN PANAS PADA
SHAPE MEMORY ALLOY TERHADAP SIFAT EFEK
SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

MUHANDIS HARAS ALI MOHAMAD
NRP 02511640000065

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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



SURABAYA
Juli 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

REVIEW PENGARUH PROSES PERLAKUAN PANAS PADA SHAPE MEMORY ALLOY TERHADAP SIFAT EFEK SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO

Nama : Muhandis Haras Ali Mohamad
NRP : 0251164000065
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Co-Pembimbing : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstrak

Paduan Shape Memory Alloy merupakan paduan yang dapat kembali ke bentuk maupun ukuran semula setelah dideformasi pada temperatur tertentu. Pada saat ini paduan yang sering digunakan sebagai bahan pembuatan shape memory alloy yaitu paduan tembaga misalnya Cu-Zn-Al dan Cu-Al-Ni, serta paduan Ni-Ti, karena sifat mekaniknya yang cukup baik. Shape memory alloy dapat dibentuk dengan metode casting dan dilanjutkan dengan diberikan perlakuan panas, yaitu homogenizing, annealing, solution treatment dan aging. Kemudian dilakukan beberapa pengujian yaitu pengujian struktur mikro, X-Ray Diffraction, Differential Scanning Calorimetry dan Shape Memory Effect. Dari hasil review paper adanya proses perlakuan panas mempengaruhi struktur mikro yang ada pada paduan shape memory alloy, sehingga berpengaruh juga pada shape memory effect yang dihasilkan. Pada paduan Cu-based, solution treatment dan aging adalah perlakuan panas yang paling mempengaruhi perubahan struktur mikro dan shape memory effect, karena solution treatment mempengaruhi terbentuknya fasa martensit dan aging mempengaruhi terbentuknya fasa α . Pada paduan Ni-Ti perlakuan panas aging dan annealing mempengaruhi perubahan struktur mikro apabila dilakukan pada di atas temperatur 400°C.

Kata Kunci : *Paduan, Perlakuan Panas, Shape Memory Alloy, Shape Memory Effect, Struktur Mikro*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

REVIEW EFFECT OF HEAT TREATMENT PROCESS IN SHAPE MEMORY ALLOY ON SHAPE MEMORY EFFECT AND MICROSTRUCTURE

Student Name : Muhandis Haras Ali Mohamad
NRP : 0251164000065
Department : Material and Metallurgical Engineering
Advisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Co-Advisor : Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Abstract

Shape Memory Alloy is an alloy that can return to its original shape and size after being deformed at a certain temperature. At present alloys that are often used as materials for making shape memory alloys are copper alloys such as Cu-Zn-Al and Cu-Al-Ni, and Ni-Ti alloys, because of their reasonably good mechanical properties. Shape memory alloy can be formed by casting method and followed by heat treatment, which is homogenizing, annealing, solution treatment and aging. Then a number of tests are performed, namely microstructure testing, X-Ray Diffraction, Differential Scanning Calorimetry and Shape Memory Effect. From the results of a review paper the heat treatment process affects the microstructure that exists in the shape memory alloy, so that it also affects the shape memory effect produced. In Cu-based alloys, solution treatment and aging are the heat treatments that most affect changes in microstructure and shape memory effect, because solution treatments affect the formation of the martensite (β') phase and aging influences the formation of the α phase. In Ni-Ti alloys the aging and annealing heat treatment influences the phase change if it is carried out above 400 ° C.

Keywords : Alloy, Heat Treatment, Microstructure, Shape Memory Alloy, Shape Memory Effect .

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian penyusunan Tugas Akhir dengan judul **“REVIEW PENGARUH PROSES PERLAKUAN PANAS PADA SHAPE MEMORY ALLOY TERHADAP SIFAT EFEK SHAPE MEMORY DAN STRUKTUR MIKRO”**. Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan dan bantuan kepada penulis hingga Laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya:

1. Allah SWT atas segala berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir.
2. Kedua Orang Tua, Mustapa Ali Mohamad, S.T., M.T. dan juga Umi Hidayaturohmah, S.Apt. yang selalu memberikan dukungan moril dan materil serta doa yang tidak henti untuk penulis.
3. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. dan Bapak Mavindra Ramadhani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing I dan II Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu serta memberikan ilmu dan saran kepada penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
5. Bapak Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T. dan Ibu Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang telah membantu penulis menjalani pendidikan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.

6. Pak Anto, Pak Tari, Pak Chanan dan seluruh Dosen Karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS yang telah membantu pengerjaan secara teknis dan non-teknis dalam proses penelitian.

Penulis menyadari dengan keterbatasan ilmu, laporan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca agar karya berikutnya bisa lebih baik. Penulis berharap Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 24 Juli 2020

Penulis,



Muhandis Haras Ali Mohamad
0251164000065

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
Abstrak	vii
Abstract	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Review.....	4
1.5 Manfaat Review.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Shape Memory Alloy</i>	5
2.1.1 Fenomena Transformasi Fasa pada <i>Shape Memory Alloy</i>	5
2.1.2 Efek <i>Shape Memory</i> pada <i>Shape Memory Alloy</i>	8
2.2 Paduan Cu-Zn-Al.....	10
2.3 Paduan Cu-Al-Ni.....	12
2.4 Paduan Ni-Ti.....	14
2.5 Perlakuan Panas.....	16
2.5.1 <i>Homogenizing</i>	17
2.5.2 <i>Annealing</i>	17
2.5.3 <i>Solution treatment</i>	18
2.5.4 <i>Aging</i>	20
2.6 Pengujian.....	21
2.6.1 Pengujian Struktur Mikro.....	22
2.6.2 Pengujian <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	23
2.6.3 Pengujian <i>Differential Scanning Calorimeter (DSC)</i>	23
2.6.4 Pengujian <i>Shape Memory Effect (SME)</i>	24

2.7	Penelitian Sebelumnya.....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir Penelitian	27
3.2	Bahan dan Metode Penelitian	28
3.3	Ruang Lingkup Pembahasan.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Paduan yang Dapat Digunakan Sebagai Material Pembentuk <i>Shape Memory Alloy</i>	37
4.1.1	Paduan Cu-Zn-Al	37
4.1.2	Paduan Cu-Al-Ni.....	50
4.1.3	Paduan Ni-Ti	60
4.2	Pembahasan.....	73
4.2.1	Perlakuan Panas Paduan Cu-Zn-Al	73
4.2.2	Perlakuan Panas Paduan Cu-Al-Ni.....	75
4.2.3	Perlakuan Panas Paduan Ni-Ti	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	77
5.2	Saran	78
DAFTAR PUSTAKA		79
UCAPAN TERIMA KASIH		83
BIODATA PENULIS		85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pengaruh Temperatur terhadap Perubahan Fasa <i>Shape Memory Alloy</i> Tanpa Pembebanan Mekanik	6
Gambar 2.2	Skema <i>Shape Memory Effect</i> dari SMA yang Menunjukkan Perubahan Proses <i>Detwinning</i> dengan Adanya Pembebanan.....	7
Gambar 2.3	Skema <i>Shape Memory Effect</i> pada Pelepasan Beban dan Selanjutnya Pemanasan Kembali menjadi Austenit di Bawah Kondisi Tanpa Beban.....	8
Gambar 2.4	Kurva Tegangan-Regangan-Temperatur yang Menunjukkan <i>Shape Memory Effect</i> dari <i>Shape Memory Alloy</i> NiTi	9
Gambar 2.5	Diagram Fasa Ternary Cu-Zn-Al	11
Gambar 2.6	Diagram Fasa Ternary Cu-Al-Ni	14
Gambar 2.7	Diagram Fasa Binery Ni-Ti	16
Gambar 2.8	Skema <i>Solution treatment</i> pada paduan A-B.....	19
Gambar 2.9	Grafik Pengaruh <i>Natural Aging</i> dan <i>Artificial Aging</i> pada Kekerasan	21
Gambar 2.10	Alur Sinar Pada Pengamatan Mikroskop Optik.....	22
Gambar 2.11	Prinsip Kerja <i>X-Ray Diffraction</i>	23
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	28
Gambar 4.1	(a) Struktur Mikro Paduan 1 yang di <i>Aging</i> dengan	38
Gambar 4.2	(a) Paduan 1 setelah di <i>Aging</i> dengan temperatur.....	39
Gambar 4.3	(a) Paduan 2 setelah di <i>Quenching</i> dengan media	40
Gambar 4.4	Mikrostruktur dari Spesimen yang di <i>Aging</i> pada (a)	42
Gambar 4.5	Pengaruh Waktu dan Temperatur <i>Aging</i> Terhadap.....	43

Gambar 4.6	Struktur mikro material yang dilakukan <i>aging</i> (a) as	45
Gambar 4.7	Struktur Mikro <i>Shape Memory Alloy</i> yang di <i>aging</i>	47
Gambar 4.8	Grafik Hasil Pengujian DSC Material SMA.....	48
Gambar 4.9	Siklus Termal SMA Cu-Zn-Al dengan Tegangan	49
Gambar 4.10	Kurva Siklus Pemanasan dan Pendinginan DSC	51
Gambar 4.11	Struktur Mikro Paduan Cu-Al-Ni	53
Gambar 4.12	Hasil XRD Paduan Cu-Al-Ni Material N1 dan N2	53
Gambar 4.13	Hasil Uji DSC Material N1 dan N2 dengan <i>heating/cooling rate</i> sebesar 25 K min^{-1}	54
Gambar 4.14	Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Material	56
Gambar 4.15	Kurva Hasil Pengujian DSC Material <i>As-Cast</i>	57
Gambar 4.16	Kurva Hasil Pengujian DSC Material <i>Solution</i>	57
Gambar 4.17	Grafik Perbandingan Temperatur dan Siklus Termal.....	58
Gambar 4.18	Struktur Mikro <i>Shape Memory Alloy</i> Setelah	59
Gambar 4.19	Struktur Mikro Material yang diberi Perlakuan Panas	61
Gambar 4.20	Hasil Uji DSC pada Material (a) tanpa <i>aging</i> ,	62
Gambar 4.21	Perbandingan Temperatur Transformasi Sampel	64
Gambar 4.22	Perbandingan Nilai Rata-Rata Temperatur.....	65
Gambar 4.23	Struktur Mikro Sampel (a) Homogenisasi (b) <i>Aging</i>	66
Gambar 4.24	Kurva DSC Material Ni-Ti Tanpa <i>Annealing</i>	67
Gambar 4.25	Kurva DSC Material Ni-Ti <i>Annealing</i> pada	68
Gambar 4.26	Kurva DSC Material Ni-Ti <i>Annealing</i> pada	68
Gambar 4.27	Kurva DSC Material Ni-Ti <i>Annealing</i> pada	69

Gambar 4.28 Kurva DSC Material Ni-Ti <i>Annealing</i> pada	69
Gambar 4.29 Kurva DSC Material Ni-Ti <i>Annealing</i> pada	70
Gambar 4.30 Hasil Pengujian <i>Fatigue</i> Material SMA	72

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat Paduan <i>Shape Memory Alloy</i> Cu-Zn-Al.....	11
Tabel 2.2	Sifat Paduan <i>Shape Memory Alloy</i> Cu-Al-Ni.....	13
Tabel 2.3	Sifat Paduan <i>Shape Memory Alloy</i> Ni-Ti	15
Tabel 2.4	Paduan Cu-Zn beserta Temperatur <i>Annealing</i>	18
Tabel 3.1	Bahan dan Metode Penelitian	28
Tabel 3.2	Ruang Lingkup Pembahasan	35
Tabel 4.1	Persentase Komposisi Paduan Cu-Zn-Al	38
Tabel 4.2	Persentase Komposisi Paduan Cu-Zn-Al	40
Tabel 4.3	Temperatur Transformasi Material <i>Shape Memory</i>	47
Tabel 4.4	Deformasi Tegangan Untuk Beberapa Siklus.....	50
Tabel 4.5	Persentase Komposisi Cu-Al-Ni.....	51
Tabel 4.6	Persentase Komposisi Cu-Al-Ni.....	52
Tabel 4.7	Temperatur Transformasi dari Paduan N1 dan N2	54
Tabel 4.8	Temperatur Transformasi <i>Shape Memory Alloy</i>	57
Tabel 4.9	Persentase Komposisi Ni-Ti	60
Tabel 4.10	Persentase Komposisi Ni-Ti	63
Tabel 4.11	Material Ni-Ti yang diberi Perlakuan Panas <i>Aging</i>	63
Tabel 4.12	Transformasi Temperatur Material Ni-Ti Sebelum	71
Tabel 4.13	Tabel Hasil Pengujian <i>Fatigue</i> Material SMA	73

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan zaman, kebutuhan manusia akan suatu benda yang memiliki *properties* tertentu semakin meningkat, namun kebutuhan tersebut tidak bisa dipenuhi jika hanya mengandalkan material murni yang dihasilkan langsung oleh alam atau hanya dengan mengandalkan satu material saja. Karena keterbatasan tersebut sehingga akhirnya melahirkan material-material baru dengan cara menggabungkan beberapa material sehingga mendapatkan *properties* lebih baik dan sesuai dengan sifat yang diinginkan. Gabungan dari beberapa material tersebut sering disebut dengan material paduan atau *alloy*. Seiring dengan perkembangan dan permintaan yang semakin beragam paduan yang digunakan mengalami banyak perkembangan dari masa ke masa, salah satu contohnya adalah terlahirnya material *shape memory alloy*.

Material *shape memory alloy* atau yang biasa disebut SMA adalah kelompok material yang dapat kembali ke bentuk maupun ukuran awalnya setelah dideformasi, dengan cara memberikan perlakuan panas pada temperatur tertentu, panas itu akan mengaktifkan *shape memory effect* yang ada pada material tersebut. *shape memory effect* dipengaruhi oleh fasa-fasa yang berubah menyesuaikan temperatur. (ASM International Volume 2, 1990).

Shape Memory Alloy dapat dibuat dengan menggunakan beberapa unsur misalnya, *copper*, *zinc*, *aluminum*, *ferrous*, nikel, dan lain sebagainya. Yang dapat menghasilkan paduan-paduan tertentu misalnya paduan Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni dan Ni-Ti. Untuk Ni-Ti mempunyai kelebihan sifat mekanik paling baik, namun proses pembuatannya sulit dan biaya pembuatannya mahal menjadi kendala. Lalu, adalah paduan Cu-Zn-Al yang memiliki kelebihan yaitu *range* temperatur transformasi yang luas, proses pembuatannya yang lebih mudah, dan harga yang lebih terjangkau,

namun cenderung tidak stabil pada temperatur yang relatif tinggi dan paduan-paduan lainnya yang memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing.

Pada pratiknya *shape memory effect* pada *shape memory alloy* bergantung pada perubahan fasa, dari fasa austenit ke fasa martensit dan sebaliknya. Fasa austenit merupakan fasa yang terbentuk pada temperatur cenderung tinggi, sedangkan martensit merupakan fasa yang terbentuk pada temperatur yang cenderung rendah. Fasa martensit pada SMA dibagi menjadi dua, yaitu fasa *twinned* martensit dan fasa *detwinned* martensit. Perubahan fasa dari *twinned* martensit ke *detwinned* martensit tidak dipengaruhi oleh temperatur melainkan deformasi oleh deformasi, sehingga menyebabkan perubahan bentuk material. Selain perubahan dari *twinned* martensit ke *detwinned* martensit, salah satu hal yang paling penting dari SMA adalah perubahan kembali dari fasa martensit ke fasa austenit (*forward transformation*), perubahan fasa ini akan menunjukkan seberapa besar *shape recovery* dan menunjukkan perubahan material ke bentuk awalnya. (Kumar, 2008)

Lalu pada tahun 2013, Christian Lexcellent, pada bukunya menyebutkan bahwa paduan Cu-Zn-Al merupakan paduan yang memiliki sifat pseudoelastisitas, sifat *shape memory* yang sangat baik, dan temperatur transformasi dengan *range* temperatur yang sangat luas, antara 0 dan lebih dari 150°C, serta relatif mudah untuk membentuk paduan ini. Namun, paduan ini tidak banyak digunakan pada dunia industri, karena paduan ini memiliki kekurangan yaitu kurang stabil pada temperatur di atas atau sekitar 130°C, karena di atas temperatur ini fasa β memiliki kecenderungan untuk terurai, membuat penurunan temperatur transformasi, dan dengan cepat menghilangkan sifat efek *shape memory*. Oleh karena itu, paduan ini tidak pernah digunakan pada temperatur di atas 100°C.

Penelitian tentang *shape memory alloy* menggunakan material lain yaitu Cu-Al-Ni, yang dilakukan oleh J.I. P´erez-Landaz´abal, dkk pada tahun 2005, yang membahas tentang

stabilitas dan proses dekomposisi fase β pada material Cu-Al-Ni menunjukkan hasil

Kemudian penelitian lain juga dilakukan oleh Iskender Ozkul dan Canan Aksu Canbay pada tahun 2018, kali ini menggunakan material Ni-Ti, yang meneliti tentang perilaku *shape memory alloy* yang diberi perlakuan panas *aging*. Pada penelitian tersebut dihasilkan bahwa spesimen yang tidak di *aging* masih memiliki tetangan sisa, sedangkan material yang di *aging* pada temperatur 200, 300 dan 400°C tidak memiliki tegangan sisa dan menghasilkan martensit yang lebih stabil. Namun, hasil paling baik didapatkan pada material yang di *aging* pada temperatur di bawah 300°C, karena semakin tinggi temperatur akan menghasilkan presipitat yang lebih banyak ketika material didinginkan. Presipitat tersebut mempengaruhi sifat perubahan bentuk, semakin banyak presipitat maka semakin sedikit fasa β yang terbentuk dan semakin menurun pula *shape recovery* yang dihasilkan, begitu pula sebaliknya.

Shape Memory Alloy dapat dibuat dengan berbagai material dan setiap material itu memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing, serta metode pembuatan melalui perlakuan panas juga mempengaruhi struktur mikro dan fasa yang terbentuk, sehingga dapat mempengaruhi pula *shape memory effect* yang dihasilkan, dan sedikit banyak juga mempengaruhi *properties* atau sifat yang dihasilkan, maka dari itu penelitian kali ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh proses perlakuan panas pada *shape memory alloy* terhadap efek *shape memory* dan struktur mikro pada material Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni dan Ni-Ti, yang dilihat dari parameter struktur mikro dan fasa yang dihasilkan pada setiap material, karena dua hal tersebut yang cukup berpengaruh pada *shape memory effect* yang dihasilkan.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam review ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh proses perlakuan panas pada *shape memory alloy* terhadap struktur mikro?
2. Bagaimana pengaruh proses perlakuan panas pada *shape memory alloy* terhadap efek *shape memory*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah dalam review ini adalah sebagai berikut:

1. Bersifat review, tanpa melakukan eksperimen
2. Paduan yang digunakan dianggap homogen
3. Komposisi dari tiap paduan dianggap sama

1.4 Tujuan Review

Adapun tujuan dalam review ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh proses perlakuan panas pada *shape memory alloy* terhadap struktur mikro.
2. Menganalisis pengaruh proses perlakuan panas pada *shape memory alloy* terhadap efek *shape memory*.

1.5 Manfaat Review

Adapun manfaat dari review ini adalah untuk menganalisis dan mengetahui pengaruh perlakuan panas pada *shape memory alloy* terhadap efek *shape memory* dan struktur mikro. Sehingga dari data yang didapatkan, diharapkan dapat menambah *database* terkait perlakuan panas yang baik digunakan untuk pembuatan *shape memory alloy* pada dunia industri. Selanjutnya juga dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu teknologi khususnya di bidang Teknik Material dan Metalurgi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Shape Memory Alloy*

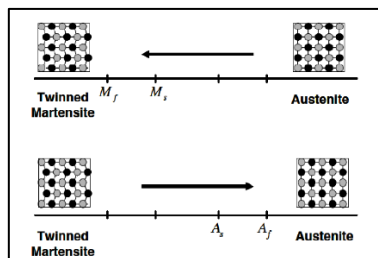
Shape Memory Alloy adalah kelompok material yang memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk maupun ukuran semula, setelah material di deformasi, dengan cara memberi perlakuan panas kepada material tersebut, sehingga kembalinya material ini ke bentuk semula, dipengaruhi oleh temperatur dan perubahan fasa. Material yang dapat menunjukkan sifat *shape memory* pada saat kondisi pemanasan saja, biasa disebut dengan *shape memory alloy one way* atau *shape memory alloy satu arah*, sedangkan material yang dapat menunjukkan sifat *shape memory* pada saat pemanasan maupun saat pendinginan (temperatur tinggi dihilangkan) disebut sebagai *shape memory alloy two ways* atau *shape memory alloy dua arah*. Dalam implementasinya tidak semua paduan logam dapat dijadikan *shape memory alloy* yang memiliki efek *shape memory*, saat ini diketahui ada dua paduan logam yang dapat menunjukkan efek *shape memory*, logam paduan tersebut adalah paduan nikel-titanium (Ni-Ti) dan paduan tembaga, ditambah dengan unsur lain yaitu Zn, Al, dan Ni, sehingga menjadi paduan Cu-Zn-Al dan paduan Cu-Al-Ni. Untuk saat ini aplikasi dari material *shape memory alloy* sudah banyak contohnya yaitu pada bidang biomedis, otomotif, kedirgantaraan, dan lain sebagainya. (ASM International Volume 2, 1990).

2.1.1 Fenomena Transformasi Fasa pada *Shape Memory Alloy*

Diagram fasa merupakan representasi kondisi kesetimbangan fasa yang berbeda, yang dipisahkan oleh garis ekuilibrium antar fase. Diagram fase dapat mengontrol berbagai variabel misalnya tegangan, temperatur, konsentrasi, medan listrik, dan sifat-sifat mekanik lainnya. *Shape Memory Alloy* memiliki dua fase yang berbeda, dengan struktur kristal yang berbeda pula. Yang pertama adalah fase austenit yaitu fase yang ada pada saat temperatur tinggi, serta memiliki struktur kristal kubik, fase yang kedua adalah fase martensit yang ada pada saat temperatur rendah,

dan memiliki struktur kristal *tetragonal*, *orthorombic* atau *monoclinic*. Transformasi dari satu struktur ke struktur yang lain tidak terjadi secara difusi, melainkan terjadi secara distorsi kisi atau pergeseran kisi. Misalnya transformasi martensit, setiap kristal martensit memiliki orientasi arah yang berbeda, yang disebut *variant*. *Variant* dari martensit dapat dibagi menjadi dua, yaitu *twinned* martensit, dan *detwinned* martensit. Transformasi fasa dari austenit ke martensit dan sebaliknya adalah hal unik yang paling dasar dari *shape memory alloy*. Perubahan fasa dari austenit menjadi martensit disebut sebagai *forward transformation*. Ketika material dipanaskan dari fasa martensitik, struktur kristalnya akan kembali menjadi austenit dan perubahan ini disebut dengan *reverse transformation*, dalam hal ini tidak ada perubahan bentuk yang terjadi. Selama *forward transformation*, dengan beban di bawah nol, mulai berubah menjadi *twinned martensite* pada temperatur martensit start dan berakhir pada martensit *finish*, saat semua telah berubah menjadi full martensit. Demikian pula saat pemanasan, *reverse transformation* mulai dari austenit *start* kemudian berhenti saat austenit *finish*, ketika semua fasa telah berubah menjadi *full* austenit. (Kumar, 2008).

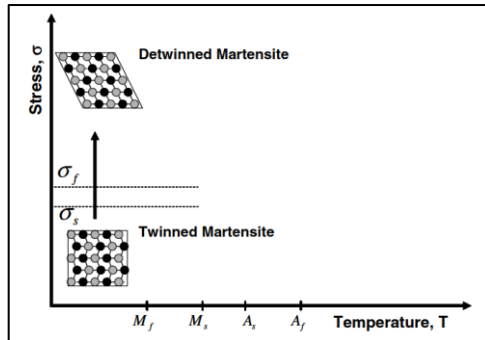
Skema perubahan struktur kristal *shape memory alloy* dari *twinned* martensit ke austenit dan dari austenit ke martensit dapat dilihat berdasarkan Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Pengaruh Temperatur terhadap Perubahan Fasa *Shape Memory Alloy* Tanpa Pembebanan Mekanik (Kumar, 2008)

Ketika beban mekanis diberikan kepada material di fasa *twinned* martensit, hal ini memungkinkan terjadinya perubahan fasa dari *twinned* martensit menjadi *detwinned* martensit. Proses *detwinned* martensit akan terlihat secara makroskopis, dimana saat beban mekanis dihilangkan, maka bentuknya akan tetap. Selanjutnya pemanasan SMA di atas temperatur A_f , akan menghasilkan transformasi fasa kembali, dari *detwinned* martensit menjadi austenit, sehingga bentuknya akan kembali seperti semula.

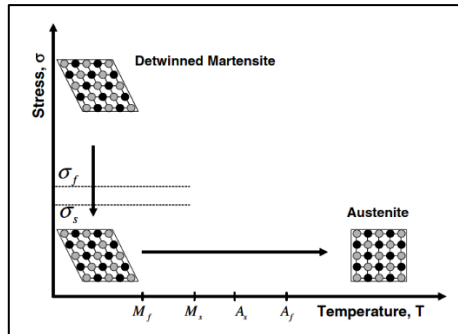
Skema perubahan struktur kristal *shape memory alloys* dari *twinned* ke *detwinned* martensit dapat dilihat pada Gambar 2. 2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Skema *Shape Memory Effect* dari SMA yang Menunjukkan Perubahan Proses *Detwinning* dengan Adanya Pembebanan (Kumar, 2008)

Pendinginan kembali (*forward transformation*) di bawah temperatur martensit (M_f) akan kembali menghasilkan *twinned* martensit, tanpa adanya perubahan bentuk. Proses tersebut dikenal sebagai *shape memory effect*.

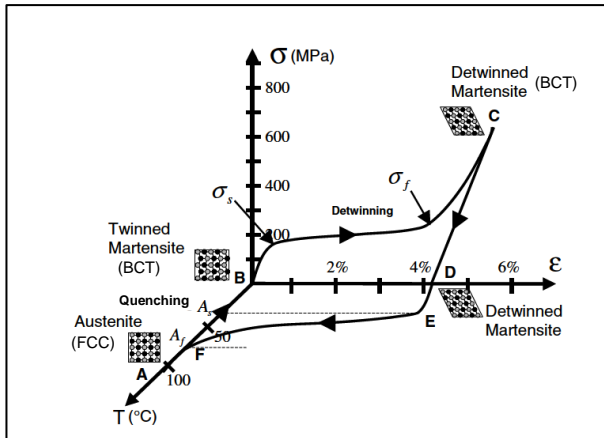
Skema perubahan struktur kristal *shape memory alloy* dari *twinned* ke *detwinned* martensit dapat dilihat pada Gambar 2. 3.



Gambar 2.3 Skema *Shape Memory Effect* pada Pelepasan Beban dan Selanjutnya Pemanasan Kembali menjadi Austenit di Bawah Kondisi Tanpa Beban (Kumar, 2008)

2.1.2 Efek *Shape Memory* pada *Shape Memory Alloy*

Efek *Shape Memory* dapat dilihat pada saat material *shape memory alloy* berada pada fasa *twinned* martensit, kemudian fasa tersebut diberikan beban, sehingga menyebabkan berubahnya fasa menjadi *detwinned* martensit (temperatur di bawah A_s). Pada fasa *detwinned* martensit, beban dilepaskan, namun material *shape memory alloy* akan tetap mempertahankan bentuknya, hingga diberikan temperatur di atas A_f (austenit *finish*) yang menyebabkan fasanya berubah menjadi *full-austenit*, dan diikuti dengan perubahan bentuk kembali ke awal, seperti saat sebelum diberi beban. Untuk lebih mudah memahami perubahan fasa pada *shape memory alloy* dengan pembebanan termomekanikal dan dikombinasikan dengan tegangan, regangan, serta temperatur, dapat dilihat pada Gambar 2. 4 yang menunjukkan data eksperimen dari spesimen NiTi yang diuji di bawah pembebanan uniaksial. Tegangan σ merupakan tegangan uniaksial pada spesimen akibat beban yang diterapkan. Sedangkan, regangan ϵ adalah perubahan panjang dari spesimen sepanjang arah dari beban yang diterapkan sesuai panjang aslinya.



Gambar 2.4 Kurva Tegangan-Regangan-Temperatur yang Menunjukkan *Shape Memory Effect* dari *Shape Memory Alloy* NiTi (Kumar, 2008)

Dimulai dari fasa induk (poin A pada Gambar 2.4) *quenching* austenit tanpa tegangan di bawah temperatur transformasi (M_s dan M_f) menghasilkan pembentukan *twinned* martensit (poin B). Ketika *twinned* martensit diberikan tegangan, terjadi proses reorientasi, dan menghasilkan varian martensit searah. 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 alloy* akan kembali ke bentuk asli (diindikasikan poin A). Selanjutnya *quenching* menuju fasa martensit akan menyebabkan pembentukan kembali fasa *twinned* martensit, sehingga seluruh siklus dari *shape memory effect* bisa terus

berulang. Penjelasan fenomenan di atas dapat disebut dengan *one-way shape memory effect*. (Kumar, 2008)

Kemudian, secara struktur unit cell, dapat dilihat pula pada Gambar 2.4, jika pada awalnya saat fasa austenit struktur cell yang dimiliki yaitu *Face Centre Cubic* (FCC) dari unsur tembaga (Cu), struktur ini memiliki jari-jari atom yang luas, sehingga pada saat kondisi temperatur tinggi yang berada pada kondisi *solid solution*, unsur Zn dan Al yang lebih sedikit larut/masuk kedalam jari-jari atom Cu, kemudian pada saat proses *quenching* (pendinginan cepat) perubahan fasa terjadi dari austenit menjadi martensit, jari-jari atom austenit (FCC) yang semula lebar, mendadak menyempit, pada saat terjadi perubahan fasa menjadi martensit, sehingga struktur cell berubah menjadi *Body Centre Cubic* (BCC), namun dengan kondisi unsur Zn dan Al yang berada dalam Cu tidak sempat keluar, sehingga terjadi tegangan antar atom, yang menyebabkan struktur BCC yang semula kubus, berubah memanjang menjadi struktur *Body Centre Tetragonal* (BCT).

2.2 Paduan Cu-Zn-Al

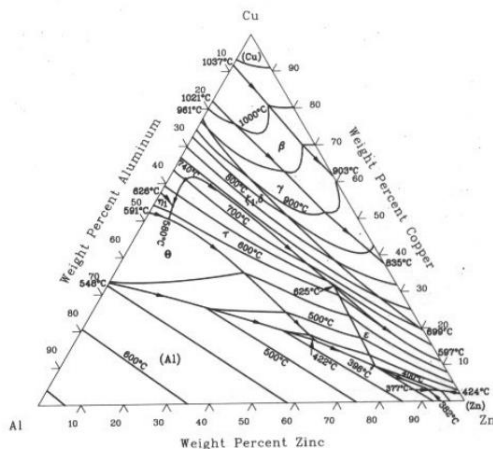
Menurut Rajesh A. dkk (2016), paduan Cu-Zn-Al yang dapat memberikan efek *shape memory* harus berada pada *range* komposisi tertentu, yaitu Cu antara 60-80%, kemudian Zn 15-30%, dan Al 3-10%. Selain itu, paduan Cu-Zn-Al memiliki beberapa kelebihan dibandingkan NiTi misalnya ulet, dapat di cold working, proses pembuatannya mudah, harga yang lebih terjangkau dan memiliki *range* transformasi temperatur yang lebih besar dibanding paduan NiTi, sehingga bukan tidak mungkin paduan Cu-Zn-Al menjadi alternatif lain paduan *shape memory alloy* untuk digunakan pada berbagai aplikasi yang membutuhkan *properties* tertentu. Untuk sifat paduan *shape memory alloy* Cu-Zn-Al dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah.

Paduan Cu-Zn-Al menunjukkan sifat yang sangat baik pada *shape memory effect* dan pseudoelastisitas. Hal ini dapat terjadi karena temperatur transformasi yang sangat luas, antara 0°C dan lebih dari 150°C. Namun masalah utamanya adalah paduan ini

tidak banyak digunakan di industri karena pada temperatur berkisar 130°C paduan ini mulai tidak stabil. Karena di luar suhu ini, fase β , tidak berada pada kesetimbangan termodinamika, sehingga memiliki kecenderungan untuk terurai, dampak yang pertama adalah pada penurunan suhu transformasi dan kemudian dengan cepat menghilangkan efek *shape memory*. Oleh karena itu, paduan ini hanya dapat digunakan untuk aplikasi yang suhunya tidak melebihi seratus derajat celsius. (Christian LExcellent, 2013)

Tabel 2.1 Sifat Paduan *Shape Memory Alloy* Cu-Zn-Al
(ASM Metal Handbook Volume 2, 1992)

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



Gambar 2.5 Diagram Fasa Ternary Cu-Zn-Al

Pada Gambar 2.5 di atas, disisi kanan merupakan persentase dari Cu (tembaga), pada sisi bawah merupakan persentase Zn (seng) dan pada sisi kiri merupakan persentase dari Al (aluminium). Untuk mengetahui persentase dari tiap unsur yang dibutuhkan, maka dilakukan dengan menentukan fasa yang ingin dicapai, lalu dibuatlah garis pada tiap persentase unsur, sehingga akan membentuk perpotongan dari tiga garis tersebut untuk menentukan persentase dari tiap unsur. (ASM Handbook Vol. 3)

2.3 Paduan Cu-Al-Ni

Paduan Cu-Al-Ni banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, misalnya di dunia industri, utamanya paduan ini diterapkan pada temperatur kerja yang cenderung tinggi, karena paduan ini memiliki stabilitas termal dan temperatur transformasi yang tinggi, selain itu, paduan ini juga cenderung lebih mudah di produksi. Namun, paduan Cu-Al-Ni sendiri memiliki kekurangan dibandingkan *shape memory alloy* lainnya, yaitu kemampuan deformasi yang rendah dan materialnya yang getas, sehingga hanya menghasilkan *shape memory effect* sebesar 4% pada *shape memory alloy-one way* dan 1.5% pada *shape memory alloy-two way*.

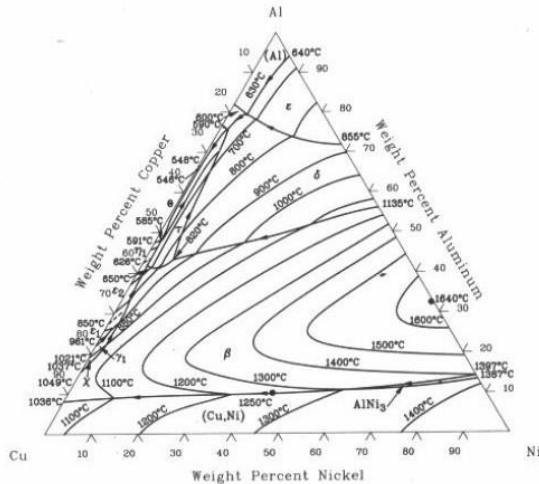
Seperti paduan lainnya, *shape memory effect* Cu-Al-Ni ini sangat sensitif terhadap perubahan komposisi unsur atau penambahan unsur lainnya. Karena setiap ada perubahan kandungan unsur, akan berpengaruh terhadap fasa dan struktur mikro yang terbentuk, serta temperatur transformasi dari material. Fasa yang paling berpengaruh pada pembentukan *shape memory alloy* Cu-Al-Ni ini adalah fasa β (austenit) pada temperatur tinggi, karena fasa β ini, yang akan membentuk fasa-fasa lainnya, yang dipengaruhi oleh kecepatan pendinginan. Saat pendinginan berlangsung lambat, maka fasa β akan berubah menjadi α dan γ_2 , sedangkan saat pendinginan berlangsung cepat maka akan terbentuk fasa β_1 atau martensit yang memiliki struktur kristal DO₃, dengan kandungan Al 11%. Lalu apabila kandungan Al lebih tinggi hingga menyentuh 13%, maka yang akan terbentuk adalah struktur kristal 18 R dan β'_1 , lain halnya apabila kandungan Al

dinaikan lagi menjadi 13.5%, maka struktur kristal yang terbentuk adalah 2H dan γ' , kemudian saat kandungan Al lebih tinggi lagi yaitu pada angka 13.7 hingga 14%, maka menghasilkan struktur kristal γ' (2H) dan β' (18R), serta semakin memperbanyak pertumbuhan presipitat. (Ying Chen, 2009)

Pada umumnya, persentase yang digunakan untuk pembuatan Cu-Al-Ni *shape memory alloy* ini adalah berkisar 11-14.5% untuk Al, 3-5% untuk Ni, dan balance untuk Cu. Untuk sifat-sifat paduan lainnya dari Cu-Al-Ni *shape memory alloy*, dapat dilihat pada Tabel 2.2:

Tabel 2.2 Sifat Paduan *Shape Memory Alloy* Cu-Al-Ni
(ASM Metal Handbook Volume 2, 1992)

Sifat	Nilai Sifat
Temperatur Leleh ($^{\circ}\text{C}$)	1000-1050
Densitas (g/cm^3)	7.12
Konduktivitas Termal ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	30-43
Kapasitas Panas ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	373-574
<i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa)	600
Temperatur Transformasi ($^{\circ}\text{C}$)	<200
<i>Recoverable Strain</i> (%)	4
Hysteresis ($\Delta^{\circ}\text{C}$)	15-20



Gambar 2.6 Diagram Fasa Ternary Cu-Al-Ini

Pada Gambar 2.6 di atas, disisi kanan merupakan persentase dari Al (aluminium), pada sisi bawah merupakan persentase Ni (nikel) dan pada sisi kiri merupakan persentase dari Cu (tembaga). Untuk mengetahui persentase dari tiap unsur yang dibutuhkan, maka dilakukan dengan menentukan fasa yang ingin dicapai, lalu dibuatlah garis pada tiap persentase unsur, sehingga akan membentuk perpotongan dari tiga garis tersebut untuk menentukan persentase dari tiap unsur. (ASM Handbook Vol. 3)

2.4 Paduan Ni-Ti

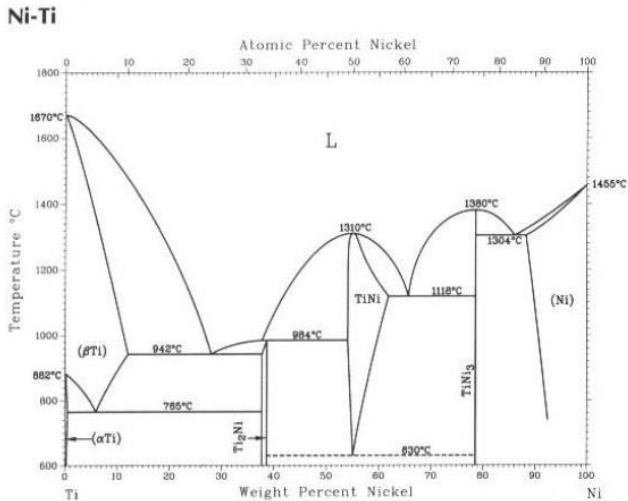
Selain, paduan tembaga, paduan lain yang dapat digunakan sebagai bahan dasar pembentukan *shape memory alloy* adalah paduan Nikel-Titanium. Jika dibandingkan dengan paduan tembaga, paduan Ni-Ti memiliki properties yang lebih baik, misalnya pada *shape memory strain* yang mencapai 8%, sedangkan pada paduan tembaga hanya berkisar 4-5%. Kemudian paduan Ni-Ti juga memiliki thermal stability, ketahanan terhadap korosi yang lebih baik, serta *ductility* yang lebih tinggi. Komposisi yang digunakan untuk pembuatan *shape memory alloy* berbasis Ni-Ti,

umumnya adalah 50%Ni-50%Ti; 55%Ni-45%Ti; 45%Ni-55%Ti. (C. Josiah Cherian, dkk, 2019)

Paduan Ni-Ti merupakan paduan yang baik, karena tingkat kelarutan nikel dan titanium yang sedang dan berbanding seimbang, sehingga membuat paduan ini dapat memodifikasi *properties* dan temperatur transformasinya, selain itu memiliki tingkat keuletan yang baik seperti logam pada umumnya. Untuk sifat fisik dan sifat mekanik dari paduan Ni-Ti dapat di lihat pada Tabel 2.3 di bawah:

Tabel 2.3 Sifat Paduan *Shape Memory Alloy* Ni-Ti
(ASM Metal Handbook Volume 2, 1992)

Sifat	Nilai Sifat
Temperatur Leleh (°C)	1300
Densitas (g/cm ³)	6.45
Resistivitas (μΩ.cm)	-
Konduktivitas Termal (W/m.°C)	-
Kapasitas Panas (J/kg.°C)	373-574
<i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa)	895
Temperatur Transformasi (°C)	-200-110
<i>Recoverable Strain</i> (%)	<8.5
Hysteresis (Δ°C)	15-20



Gambar 2.7 Diagram Fasa Binery Ni-Ti

Pada Gambar 2.7 di atas, sisi bawah menunjukkan perbandingan persentase komposisi Nikel dan Titanium dan sisi kiri menunjukkan temperatur. Untuk mengetahui persentase dari tiap unsur yang dibutuhkan, maka dilakukan dengan menentukan fasa yang ingin dicapai. (ASM Handbook Vol. 3)

2.5 Perlakuan Panas

Perlakuan panas merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengubah sifat-sifat mekanik dari logam murni atau paduan misalnya baja, pada sifat kekerasan, kekuatan, ketahanan, maupun keuletannya yang disesuaikan dengan kebutuhan penggunaan material tersebut. Ada berbagai benda yang diproses melalui proses perlakuan panas, mulai dari yang mudah seperti baut dan kawat, hingga yang sulit misalnya gear, piston, moulds, dan matres. Pada proses *heat treatment* yang sulit adalah bagaimana cara mengontrol dan mendapatkan temperatur yang tepat untuk suatu material, agar material tersebut mendapatkan sifat yang diinginkan. Proses perlakuan panas meliputi beberapa

hal dasar yaitu pemanasan pada temperatur dan kecepatan tertentu, mempertahankan temperatur pada waktu tertentu sehingga temperatur yang digunakan dapat merata dari permukaan hingga inti material, kemudian pendinginan dengan media pendingin tertentu (air, oli, atau udara), penggunaan proses itu bergantung dari sifat material yang diinginkan. Selain tiga hal dasar pada perlakuan panas, ada pula syarat yang harus dipenuhi dalam melakukan perlakuan panas yaitu temperatur pemanasan yang harus merata dan teratur, lalu alat pengukur temperatur yang harus akurat, dan yang terakhir laju pendinginan yang harus sesuai dengan jenis perlakuan panas yang dilakukan. (Purwanto, 2016).

Pada penelitian kali ini digunakan beberapa perlakuan panas, yaitu *homogenizing*, *annealing*, *solution treatment* dan *artificial aging*.

2.5.1 Homogenizing

Homogenisasi adalah proses pemanasan material pada temperatur tinggi, yang digunakan untuk mengurangi sifat segregasi kimia maupun metalurgi, dan berfungsi juga untuk membentuk struktur mikro yang lebih homogen sehingga ikut memperbaiki sifat mekanik material. (Purwanto, 2016).

Proses homogenisasi umumnya digunakan pada material yang memiliki rentang temperatur yang luas, contohnya seperti tembaga, kuningan dan perunggu-nikel. Waktu dan temperatur yang digunakan pada proses homogenisasi bervariasi, bergantung pada paduan, ukuran butir pada saat pengecoran dan tingkat homogenisasi yang diinginkan. Namun, temperatur homogenisasi yang biasa digunakan berkisar 50°C di atas garis solidus material atau sekitar 700 – 1000°C, dan waktu homogenisasi yang biasa digunakan berkisar 3 hingga 10 jam. Proses homogenisasi dapat memperbaiki sifat keuletan, kekerasan dan ketangguhan suatu material. (ASM Handbook Vol. 4)

2.5.2 Annealing

Annealing adalah salah satu proses *heat treatment* yang dilakukan untuk mempersiapkan paduan atau logam sebelum

diproses perlakuan panas berikutnya. Untuk melakukan *annealing*, caranya memanaskan paduan atau logam hingga temperatur tertentu, kemudian menahannya dengan waktu tertentu, lalu didinginkan dengan kecepatan pendinginan tertentu, sesuai dengan tujuan penggunaannya. (Suherman, 2003).

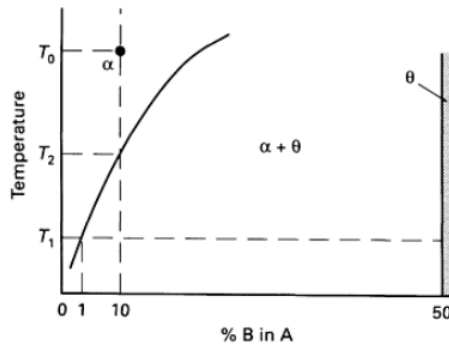
Annealing berfungsi untuk mengurangi kekuatan luluh dan kekerasan benda kerja, kemudian untuk mengurangi tegangan internal dan segregasi dari material, meningkatkan keuletan, sifat kemagnetan dan listrik, serta untuk memperbaiki ukuran butir. Temperatur *annealing* yang digunakan pada tiap material berbeda-beda, bergantung pada komposisi dan tujuan penggunaan material tersebut, namun umumnya pada temperatur rekristalisasi. (Singh, 2006). Misalnya pada material tembaga, temperatur yang biasa digunakan untuk *annealing* pada paduan tembaga dapat dilihat pada Tabel 2.5 di bawah. (ASM Handbook Volume 4,1992).

Tabel 2.4 Paduan Cu-Zn beserta Temperatur *Annealing*

Paduan	Nama Paduan	Temperatur (°C)
C23000	<i>Red Brass</i>	425 – 725
C24000	<i>Low Brass</i>	425 – 700
C26000	<i>Cartridge Brass</i>	425 – 750
C26800		
C27000	<i>Yellow Brass</i>	425 - 700
C27400		
C28000	<i>Muntz Metal</i>	425 – 600

2.5.3 *Solution treatment*

Solution treatment adalah proses perlakuan panas yang digunakan untuk melarutkan atau mencegah terbentuknya fasa baru, sehingga yang didapatkan hanya sebuah fasa tunggal yang berada di atas garis solvus. Proses *solution treatment* dilakukan dengan cara memanaskan logam pada temperatur di atas garis solvus, kemudian logam tersebut di holding selama beberapa saat, selanjutnya logam tersebut di dinginkan secara cepat (*quenching*) dengan media pendingin tertentu.



Gambar 2.8 Skema *Solution treatment* pada paduan A-B (ASM Handbook Vol. 4, 1992)

Gambar 2.8 di atas merupakan contoh dari skema perlakuan panas *solution treatment* pada paduan A-10% B. Pada temperatur kamar paduan tersebut memiliki dua fasa yaitu α dan θ , untuk mendapatkan fasa tunggal, maka paduan tersebut harus dipanaskan di atas garis solvus (pada T_0), karena jika pemanasan hanya pada temperatur T_1 maka paduan tersebut masih berada pada fasa yang sama yaitu α dan θ , ataupun jika paduan paduan tersebut hanya dipanaskan tepat pada garis solvus (garis kelarutan), maka paduan tersebut masih akan tetap memiliki fasa α dan θ , karena pada temperatur tersebut masih terjadi proses perubahan (kelarutan) fasa dari θ menjadi α . Maka dapat diambil kesimpulan, semakin tinggi temperatur yang digunakan akan semakin tinggi pula kelarutan θ terhadap α . Untuk itu, pemanasan paduan dilakukan di atas garis solvus (T_0), yang dimaksudkan untuk memastikan paduan tersebut memiliki satu fasa yang sama yaitu fasa α . Kemudian salah satu rangkaian yang merupakan proses *solution treatment* adalah pendinginan cepat (*quenching*). Proses *quenching* disini dimaksudkan untuk menahan atau mencegah fasa θ tetap larut didalam fasa α . (ASM Handbook Vol. 4, 1992)

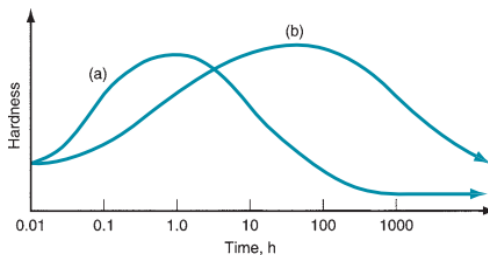
Konsep yang digunakan pada paduan di atas sama halnya dengan proses *solution treatment* yang dilakukan untuk paduan *shape memory alloy* Cu-Zn-Al dan Cu-Al-Ni, namun yang berbeda adalah fasa yang diinginkan pada hasilnya. Pada *Shape Memory Alloy* Cu-Zn-Al dan Cu-Al-Ni, fasa yang dibutuhkan adalah β' (martensit) pada temperatur ruang. Untuk mendapatkan fasa β' tersebut, dilakukan dengan cara memanaskan fasa α dan β dari temperatur ruang ke temperatur di atas garis solvus (garis kelarutan), untuk paduan Cu-Zn-Al dan Cu-Al-Ni temperatur di atas garis solvus berkisar 800 – 1000°C, kemudian paduan tersebut di *holding* (ditahan) selama beberapa waktu, untuk menghomogenkan fasa yang inginkan yaitu fasa β (austenit), kemudian paduan yang memiliki fasa β tersebut didinginkan dengan cepat menuju temperatur ruang, sehingga fasa α yang larut kedalam fasa β tidak dapat muncul kembali, kemudian didapatkan fasa β' yang merupakan martensit.

2.5.4 Aging

Proses *aging* atau penuaan adalah proses penahanan pada suatu temperatur tertentu (temperatur kamar atau temperatur di bawah garis solvus) selang waktu tertentu. dibedakan menjadi dua, yaitu penuaan alami (*natural aging*) dan penuaan buatan (*artificial aging*). *Natural aging* atau penuaan alami adalah penuaan untuk paduan yang di *age hardening* dalam keadaan dingin. *Natural aging* berlangsung pada temperatur ruang dengan waktu penahanan 5 sampai 8 hari. Sedangkan, penuaan buatan (*artificial aging*) adalah penuaan untuk paduan yang di *age hardening* dalam keadaan panas. *Artificial aging* berlangsung pada temperatur antara dan dengan lamanya waktu penahanan antara 1 sampai 24 jam. (Fuad,2010). Semakin tinggi temperaturnya, semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kekuatan tertentu (Taufiq dan Korda. 2010).

Kombinasi temperatur dan waktu selama perlakuan *aging* (penuaan) sangat penting dalam mengeluarkan sifat yang diinginkan dalam paduan. Pada temperatur yang lebih tinggi,

seperti pada Gambar 2.9 (a), kekerasan memuncak dalam waktu yang relatif singkat; sedangkan pada temperatur yang lebih rendah, seperti pada Gambar 2.9 (b), lebih banyak waktu diperlukan untuk mengeraskan paduan tetapi kekerasan maksimumnya cenderung lebih besar daripada dalam dengan *artificial aging*. Seperti yang terlihat didalam gambar, kelanjutan dari proses ini dapat menghasilkan pengurangan sifat kekerasan dan kekuatan, yang disebut *overaging*.



Gambar 2.9 Grafik Pengaruh *Natural Aging* dan *Artificial Aging* pada Kekerasan (Groover, 2010)

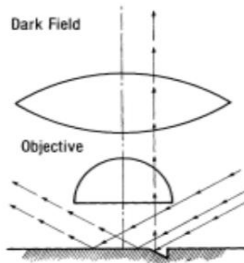
Sebagian besar paduan tembaga dari yang dikeraskan digunakan dalam aplikasi konduksi listrik dan panas. Oleh karena itu perlakuan panas harus dirancang untuk mengembangkan kekuatan mekanik dan konduktivitas listrik yang diperlukan. Kekerasan dan kekuatan yang dihasilkan tergantung pendinginan, larutan dan kontrol perlakuan pengerasan (*aging*). Paduan tembaga mengeras oleh perlakuan suhu tinggi daripada penuaan suhu (alami), seperti dalam kasus beberapa paduan aluminium.

2.6 Pengujian

Pada penelitian kali ini dilakukan beberapa pengujian, yaitu pengujian metalografi, pengujian kekerasan, pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), dan pengujian *Shape Memory Effect* (SME).

2.6.1 Pengujian Struktur Mikro

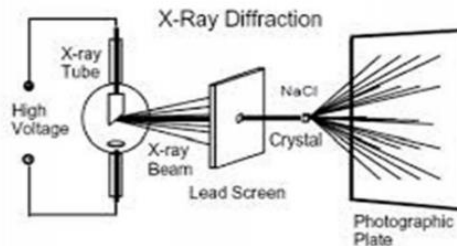
Pengujian Struktur Mikro atau metalografi merupakan salah satu metode pengujian yang digunakan untuk melihat struktur mikro yang terdapat pada suatu logam dengan skala mikro. Alat yang digunakan untuk pengujian struktur mikro ini adalah mikroskop optik. Struktur logam yang terlihat pada pengamatan dengan mikroskop disebut mikrostruktur. Pada Gambar 2.10 terlihat alur sinar datang pada pengamatan, kemudian sinar tersebut akan dipantulkan oleh lensa yang ada yang ada pada mikroskop ke mata, sehingga akan memperlihatkan struktur mikro yang terbentuk. Struktur mikro yang terbentuk akan dibandingkan dengan diagram fasa paduan dari material tersebut. Sebelum dilakukan pengujian struktur mikro, dilakukan preparasi spesimen terlebih dahulu melalui beberapa tahapan yaitu *cutting* (memotong material), *mounting* (pemberian resin, untuk memudahkan tahap selanjutnya), *grinding* (meratakan permukaan material), *polishing* (pemberian alumina, untuk lebih menghaluskan dan mengkilapkan material), kemudian material di-etsa, (untuk mengkorosi material, sehingga lebih mudah untuk diamati) kemudian tahap terakhir adalah mengobservasi material menggunakan mikroskop. (Juliaptini, 2010)



Gambar 2.10 Alur Sinar Pada Pengamatan Mikroskop Optik
(Kauffman, 2003)

2.6.2 Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk dari sampel yang diuji. Prinsip kerja yang dilakukan pada pengujian XRD adalah ketika suatu material dikenai sinar X, maka intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang, seperti yang terlihat pada Gambar 2.11 di bawah. Hal ini disebabkan karena penyerapan oleh material dan juga penghamburan atom-atom yang ada di dalam material tersebut. Berkas sinar X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi. (Ginting, 2005)



Gambar 2.11 Prinsip Kerja *X-Ray Diffraction*
(Kaufmann, 2003)

2.6.3 Pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC)

Pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC) merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kalor yang diserap atau dikeluarkan dari sebuah material yang dipanaskan atau didinginkan pada rentang temperatur tertentu, sehingga didapatkan temperatur transformasi dari material yang di uji. Bahan yang dapat dianalisis kapasitas panas dan entalpinya menggunakan alat DSC antara lain bahan logam, paduan logam dan bahan keramik. Sampel yang digunakan pada pengujian DSC ini berukuran sangat kecil, hanya beberapa milligram. Prinsip kerja

dari alat ini adalah penambahan temperatur secara terus-menerus pada sampel dan pembanding, yang dimonitor, sehingga tidak berlebihan, hal ini bertujuan untuk mempertahankan agar temperatur keduanya selalu sama. Penambahan panas yang terjadi dicatat pada *recorder*, kemudian panas ini digunakan juga untuk mengganti kekurangan atau kelebihan karena reaksi endoterm atau eksoterm yang terjadi pada sampel. Data yang diperoleh tersebut di plot ke dalam kurva yang dapat disetarakan dengan suatu spektrum yang disebut termogram. Perbedaan temperatur antara kedua material tersebut terus dideteksi dan dicatat sebagai suatu puncak kurva. Pada reaksi endotermik, suhu sampel lebih rendah daripada suhu referen dan sebaliknya bila suhu sampel lebih tinggi daripada suhu referen, maka terjadi reaksi eksotermik, kemudian terbentuklah puncak endoterm dan eksoterm. (Ginting, 2005)

2.6.4 Pengujian *Shape Memory Effect* (SME)

Pengujian *Shape Memory Effect* (SME) menggunakan standar yang telah ditetapkan yaitu ASTM F2082-01. Proses pengujian ini dilakukan untuk mengetahui persentase *recovery* dari paduan *shape memory alloy* setelah dideformasi. Bentuk spesimen untuk pengujian ini ada beberapa bentuk yaitu *strip*, *wire*, dan *tube* dengan ketebalan atau diameter 0,3-3,0 mm. Prinsip kerjanya yaitu dengan cara mendinginkan spesimen hingga seluruh fasanya menjadi martensit, kemudian material di deformasi, dan dipanaskan di atas temperatur austenisasi, agar seluruh fasanya berubah menjadi austenit. Kemudian untuk mengetahui persentase *recovery* dari material *shape memory alloy* tersebut dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.1 di bawah ini:

$$SME = \frac{\theta_o - \theta_t}{\theta_o} \times 100\% \quad (2.1)$$

2.7 Penelitian Sebelumnya

Pada Tahun 2018, dilakukan penelitian Raihan Abrar mengenai pengaruh variasi media pendingin pada material *shape memory alloy* Cu-Zn-Al terhadap efek *shape memory* dan struktur

mikro, dengan komposisi material yang digunakan adalah Cu - 23.6% Zn - 5% Al, lalu material tersebut di lakukan pengecoran, kemudian diberikan perlakuan panas *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment*, kemudian di *quenching* menggunakan media pendingin (*brine solution*, oli, air dan udara). Setelah itu dilakukan pengujian, hasilnya pada semua media pendingin dapat menghasilkan sifat efek *shape memory*, dan memiliki fasa α , β dan γ , namun untuk sifat efek *shape memory* terbesar dihasilkan oleh material yang menggunakan media pendingin *brine solution* yaitu sebesar 86.87%.

Kemudian dilakukan pula penelitian oleh Garias Devara membahas topik yang sama yaitu pengaruh variasi media pendingin pada material *shape memory alloy* Cu-Zn-Al terhadap efek *shape memory* dan struktur mikro, namun dengan komposisi material yang berbeda yaitu Cu - 21.8 Zn - 7 Al lalu material tersebut di lakukan pengecoran, kemudian diberikan perlakuan panas *homogenizing*, *annealing*, dan *solution treatment*, kemudian di *quenching* menggunakan media pendingin (*brine solution*, oli, air dan udara). Setelah itu dilakukan pengujian, dan hasil yang didapatkan kesimpulan semakin kuat media pendingin yang digunakan, maka semakin banyak pula martensit yang terbentuk, sehingga persentase *recovery* dari material *shape memory alloy* juga meningkat, hasil paling besar didapatkan pada media pendingin *brine solution*, dengan persentase *recovery* sebesar 90%.

Pada tahun 2019, dilakukan penelitian lanjutan oleh Luckyta Rizky, yang membahas mengenai pengaruh *holding time* proses *solution treatment* dan media pendingin pada *shape memory alloy* Cu-Zn-Al terhadap efek *shape memory* dan struktur mikro. Pada penelitian ini menggunakan komposisi paduan Cu - 21 Zn - 5 Al, kemudian diberikan perlakuan panas *homogenizing*, *annealing* dan *solution treatment*, dengan waktu *holding time solution treatment* yang berbeda yaitu 10, 30, dan 60 menit, lalu masing-masing *holding time* dilakukan *quenching* dengan media pendingin *brine solution* dan *dry ice*. Setelah itu dilakukan pengujian kekerasan, *X-Ray Diffraction*, metalografi, *SME*, dan *Differential Scanning*

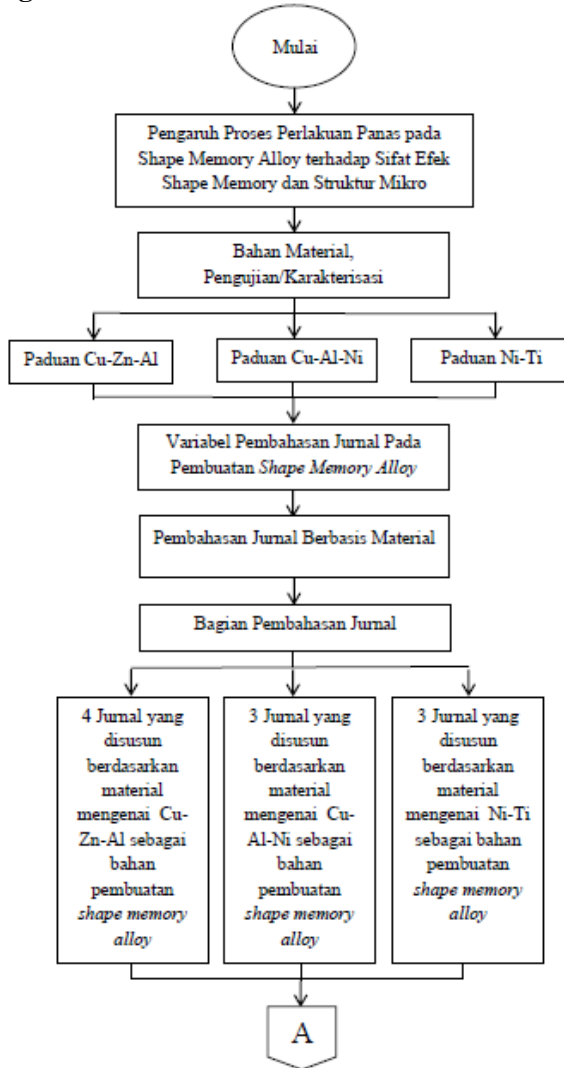
Calorimetry dan didapatkan hasil semua spesimen memiliki efek *shape memory* dan fasa α , β dan γ yang terbentuk disebabkan oleh proses *quenching*. Untuk efek *shape memory* paling tinggi dihasilkan oleh material yang mengalami *holding time* proses *solution treatment* selama 10 menit, dengan media pendingin *brine solution*, yaitu sebesar 36.67%.

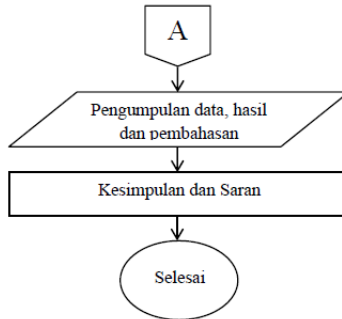
Pada tahun yang sama dilakukan pula penelitian oleh Monica Gayatri yang membahas tentang pengaruh temperatur proses *solution treatment* dan media pendingin pada *shape memory alloy* Cu-Zn-Al terhadap efek *shape memory* dan struktur mikro. Penelitian ini menggunakan komposisi paduan Cu – 21 Zn – 5 Al, kemudian diberikan perlakuan panas *homogenizing*, *annealing* dan *solution treatment*, dengan temperatur *solution treatment* yang berbeda yaitu 750, 850, dan 900°C, lalu dilakukan *quenching* dengan media pendingin *brine solution* dan *dry ice*. Setelah itu pengujian kekerasan, *X-Ray Diffraction*, metalografi, *SME*, dan *Differential Scanning Calorimetry*, dari pengujian tersebut didapatkan persentase *recovery* terbesar pada material yang mengalami proses *solution treatment* di temperatur 850°C dengan media pendingin *brine solution*, yaitu sebesar 36.67%, dan dihasilkan pula fasa α , β dan γ dari setiap media pendingin.

Dan dilakukan pula penelitian yang lain oleh Muhammad Arfani yang membahas tentang pengaruh temperatur *annealing* dan variasi media pendingin pada *shape memory alloy* Cu-Zn-Al terhadap efek *shape memory* dan struktur mikro. Pada penelitian ini menggunakan komposisi paduan Cu – 21 Zn – 5 Al, kemudian diberikan perlakuan panas *homogenizing*, *annealing* (dengan temperatur *annealing* yang berbeda yaitu 425, 550, dan 600°C) dan *solution treatment*, lalu masing-masing material yang di *annealing* dilakukan proses *quenching* dengan media pendingin *brine solution* dan *dry ice*. Setelah itu pengujian kekerasan, *X-Ray Diffraction*, metalografi, *SME*, dan *Differential Scanning Calorimetry*, dari pengujian tersebut didapatkan persentase *recovery* terbesar pada material yang mengalami proses *annealing* dengan temperatur.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan dan Metode Penelitian

Tabel 3.1 Bahan dan Metode Penelitian

Material	Fokusasi /Topik	Variabel	Metode	Referensi
Cu-Zn-Al	Menginvestigasi Struktur dan Morfologi dari Paduan <i>Shape Memory alloy</i> Cu-Zn-Al	Komposisi: Paduan 1: 70.59 Cu-24.98 Zn-4.43 Al Paduan 2: 72.7 Cu-21.62 Zn-5.68 Al	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Solution treatment</i>: 820°C, selama 20 menit. • <i>Quenching</i>, es brine. • <i>Aging</i>: 200°C, selama 8 jam 	Zengin R. dan Kayak N, 2010.
	Transformasi fasa β pada <i>Shape Memory Alloy</i> Paduan Cu-Zn-Al	Komposisi: Paduan 1: 73.4 Cu-20.8 Zn - 5.8 Al Paduan 2: 72.6 Cu-22.3 Zn-5.1 Al	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Homogenizing</i>: 1073-1123 K, 2 jam, kemudian di <i>quenching</i>: media pendingin air. • <i>Annealing</i>: 773 K selama 60 menit • <i>Solution treatment</i>: 10 menit (temperatur 1143 K 	Vanja Asanovic', Kemal Delijic dan Nada Jaukovic, 2007.

		<ul style="list-style-type: none"> • untuk paduan A dan 1133 K untuk paduan B). • <i>Quenching</i>: oli temperatur 378 ± 5 K selama 10 menit dan di <i>quench</i> lagi dengan air es • <i>Aging</i> pada temperatur 473, 523, 573, 623, 673, 723, 773 and 823 K 	
Pengaruh Perlakuan Aanas <i>Aging</i> terhadap <i>Shape Memory Alloy</i> dengan Penambahan Unsur Mn dan Zr	Komposisi: Cu-21Zn-6Al	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Solution treatment</i>: 820°C selama 5 menit. • <i>Step-quench</i>: pada air temperatur 100°C kemudian di tahan selama 30 menit, kemudian di celupkan lagi ke air dengan temperatur ruang. • <i>Aging</i> pada temperatur yaitu 70, 100, 150 dan 200°C selama 6 jam 	C.Y. Chung a, C.W.H. Lam, S.S. Tan, 1997.
Pengaruh Penambahan Ti terhadap Degradasi Efek <i>Shape Memory</i> pada	Komposisi: Cu – 13.60 Zn – 8.99 Al.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Solution treatment</i>: 825°C selama 30 menit, dan di <i>quenching</i> menggunakan air es. 	A.K. Bhuniya, dkk, 2004.

Paduan Cu –
Zn – Al.

- *Aging* pada range temperatur 50 – 300°C selama 2 jam

Cu-Al-Ni

Stabilitas dan Proses Dekomposisi Fasa β pada Paduan Cu-Al-Ni

Komposisi:
Paduan 1:
81.43 Cu-
14.37Al-4.2 Ni

Paduan 2:
83.6 Cu-
13.15Al-3.25Ni

- *Solution treatment*: 900°C selama 30 menit, media pendingin air es.

J.I. Pérez-Landazabal, dkk, 2005.

Hubungan antara Temperatur Transformasi dengan Elemen Paduan pada *Shape memory alloy* Cu-Al-Ni

Komposisi:
Paduan 1:
81.97 Cu-
13.73 Al-4.3Ni

Paduan 2:
Cu 82.27-13
Al - 4.3 Ni

- *Solution treatment*: temperatur fasa β , selama 1 jam, media pendingin *ice brine*.

Z. Karagoz • C. Aksu Canbay, 2013.

Pengaruh Perlakuan Panas pada Material *Shape Memory Alloy* terhadap Mikro Struktur dan Temperatur Transformasi Fasa.

Komposisi:
Cu-12.8 Al-4.1 Ni

Variabel:
Temperatur *Aging*, yaitu 150, 200, 250 dan 300°C.

- *Solution treatment*: temperatur 850°C, selama 1 jam, media pendingin air.
- *Aging*: temperatur 150, 200, 250 dan 300°C selama 60 menit, media pendingin air

I. Ivanić, S. dkk, 2018.

Ni-Ti	<p>Analisis Termal dan Struktur pada Ni-Ti <i>Shape Memory Alloy</i>.</p>	<p>Komposisi: Ti 67.53 – Ni 32.47</p> <p>Variabel: Temperatur <i>annealing</i>, yaitu 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, dan 500°C selama 4 jam</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Annealing</i>, pada 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, dan 500°C selama 4 jam 	<p>N. Unlu , I. Ozkul, C. Aksu Canbay, 2018.</p>
	<p>Investigasi Perilaku Termomekanik pada Paduan Nikel-Titanium yang di <i>Aging</i></p>	<p>Komposisi: 50.62 Ti - 49.38 Ni</p> <p>Variabel: Temperatur adalah 200, 300 dan 400°C. Waktu adalah 0.5, 1, 3, 7, 24, 36, dan 48 jam</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Homogenizing</i>: 900°C • <i>Aging</i>: temperatur 200, 300 dan 400°C. Waktu adalah 0.5, 1, 3, 7, 24, 36, dan 48 jam 	<p>İskender Ozkul, Canan Aksu Canbay, 2018.</p>
	<p>Pengaruh Temperatur <i>Annealing</i> pada Perubahan Fasa yang terjadi pada <i>Shape Memory Alloy</i> Ni-Ti menggunakan DSC</p>	<p>Variabel: Temperatur <i>Annealing</i>, yaitu 400, 450, 500, 550, dan 600°C.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Annealing</i>: temperatur 400, 450, 500, 550, dan 600°C 	<p>Krzysztof Kus dan Teodor Breczko, 2010.</p>

Penelitian Sebelum nya	Pengaruh Variasi media pendingin pada Proses <i>Heat Treatment</i> Cu-23,6Zn - 5Al Shape Memory Alloys terhadap Efek Shape Memory dan Struktur Mikro	Komposisi: Cu-23,6Zn-5Al Variabel: Media pendingin: <i>Brine</i> , air, oli, udara	Pertama: <i>Homogenizing</i> 2 jam, temp. 850°C, media pendingin udara. <i>Annealing</i> 4 jam, temp. 500°C, media pendingin udara. <i>Solution treatment:</i> 10 menit, 850°C, media pendingin <i>brine</i> , air, oli, udara. Kedua: <i>Solution treatment:</i> 850°C, 2 jam, media pendingin <i>brine</i> .	Raihan Abrar, dkk, 2018.
	Pengaruh variasi media Pendingin pada Proses <i>Heat Treatment</i> Cu-21,8Zn-7Al <i>Shape Memory Alloy</i> terhadap Efek Shape Memory dan Struktur Mikro	Komposisi: Cu-21,8Zn-7Al Variabel: Media pendingin: <i>Brine</i> , air, oli, udara	Pertama: <i>Homogenizing</i> 2 jam, temp. 850°C, media pendingin udara. <i>Annealing</i> 4 jam, temp. 500°C, media pendingin udara. <i>Solution treatment:</i> 10 menit, 850°C, media pendingin <i>brine</i> , air, oli, udara. Kedua: <i>Solution treatment:</i> 850°C, 2 jam, media pendingin <i>brine</i> .	Garias Devara, dkk, 2018.
	Pengaruh <i> Holding Time</i> Proses <i>Solution treatment</i> dan	Komposisi: Cu-21Zn-5Al Variabel:	<i>Homogenizing</i> 2 jam, temp. 850°C, media pendingin udara	Luckyta Rizky, dkk, 2019.

Variasi Media Pendingin pada Cu-Zn-Al <i>Shape Memory Alloys</i> terhadap Efek <i>Shape Memory</i> dan Struktur Mikro	Waktu <i>solution treatment</i> 10, 30, 60 menit Media pendingin: <i>brine, dry ice</i>	<i>Annealing</i> 4 jam, temp. 550°C, media pendingin udara. <i>Solution treatment:</i> 10, 30, 60 menit, 850°C, media pendingin <i>brine, dry ice</i>	
Pengaruh Variasi Temperatur <i>Solution Treatment</i> dan Media Pendingin pada Proses <i>Heat Treatment</i> Cu-Zn-Al <i>Shape Memory Alloy</i> terhadap Efek <i>Shape Memory</i> dan Struktur Mikro	Komposisi: Cu-21Zn-5Al Variabel: Temperatur <i>solution treatment</i> 750, 850, dan 900°C Media pendingin: <i>brine, dry ice</i>	<i>Homogenizing</i> 2 jam, temp. 850°C, media pendingin udara <i>Annealing</i> 4 jam, temp. 550°C, media pendingin udara. <i>Solution treatment:</i> 10 menit, 750, 850 dan 900°C, media pendingin <i>brine, dry ice</i>	Monica Gayatri, dkk, 2019.

Pengaruh Varisi Temperatur <i>Annealing</i> dan Media Pendingin pada Proses <i>Heat</i> <i>Treatment</i> Cu-23,6Zn- 5Al <i>Shape</i> <i>Memory</i> <i>Alloys</i> terhadap <i>Shape</i> <i>Memory</i> <i>Effect</i> dan Struktur Mikro	Komposisi: Cu-21 Zn-5 Al Variabel: Temperatur <i>Annealing</i> : 425, 550, 600	<i>Homogenizing</i> 2 jam, temp. 850°C, media pendingin udara <i>Annealing</i> 4 jam, temp. 425, 550, 600°C, media pendingin udara. <i>Solution treatment</i> : 10 menit, 750, 850 dan 900°C, media pendingin <i>brine, dry</i> <i>ice</i>	Muhammad Arfani, dkk, 2019.
---	---	---	-----------------------------------

3.3 Ruang Lingkup Pembahasan

Tabel 3.2 Ruang Lingkup Pembahasan

Material	Pengujian				Referensi
	Metalografi	XRD	DSC	SME	
Cu-Zn-Al	V	V			Zengin R. dan Kayak N, 2010.
	V			V	Vanja Asanovic', Kemal Delijic dan Nada Jaukovic, 2007.
	V	V			C.Y. Chung a, C.W.H. Lam, S.S. Tan, 1997.
	V				A.K. Bhuniya, dkk, 2004
Cu-Al-Ni			V		J.I. P´erez-Landaz´abal, dkk, 2005.
	V	V	V		Z. Karagoz • C. Aksu Canbay, 2013.
	V		V		I. Ivanić, S. dkk, 2018.
Ni-Ti	V		V		N. Unlu , I. Ozkul, C. Aksu Canbay, 2018.
	V		V		İskender Ozkul, Canan Aksu Canbay, 2018.
			V		Krzysztof Kus dan Teodor Breczko, 2010.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Paduan yang Dapat Digunakan Sebagai Material Pembentuk *Shape Memory Alloy*

Berikut ini adalah paduan-paduan yang memiliki kemampuan yang baik dan dapat digunakan sebagai material pembentuk *shape memory alloy*.

4.1.1 Paduan Cu-Zn-Al

Paduan Cu-Zn-Al menunjukkan sifat yang sangat baik pada *shape memory effect* dan pseudoelastisitas. Hal ini dapat terjadi karena temperatur transformasi yang sangat luas, antara 0°C dan lebih dari 150°C. Namun masalah utamanya adalah paduan ini tidak banyak digunakan di industri karena pada temperatur berkisar 130°C paduan ini mulai tidak stabil. Karena di luar suhu ini, fase β , tidak berada pada kesetimbangan termodinamika, sehingga memiliki kecenderungan untuk terurai, dampak yang pertama adalah pada penurunan suhu transformasi dan kemudian dengan cepat menghilangkan efek *shape memory*. Oleh karena itu, paduan ini hanya dapat digunakan untuk aplikasi yang suhunya tidak melebihi 100°C. (Christian Lexcelent, 2013).

Paduan Cu-Zn-Al yang dapat memberikan efek *shape memory* harus berada pada *range* komposisi tertentu, yaitu Cu antara 60-80%, kemudian Zn 15-30%, dan Al 3-10%. Selain itu, paduan Cu-Zn-Al memiliki beberapa kelebihan dibandingkan NiTi misalnya ulet, dapat di cold working, proses pembuatannya mudah, harga yang lebih terjangkau dan memiliki *range* transformasi temperatur yang lebih besar dibanding paduan NiTi, sehingga bukan tidak mungkin paduan Cu-Zn-Al menjadi alternatif lain paduan *shape memory alloy* untuk digunakan pada berbagai aplikasi yang membutuhkan *properties* tertentu. (Rajesh A. dkk, 2016)

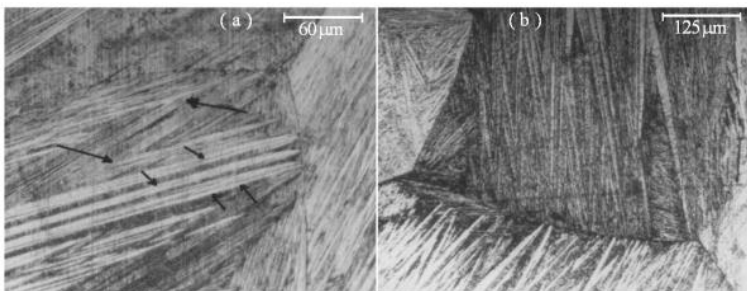
Penelitian yang dilakukan oleh Zengin R. dan Kayak N di tahun 2010 untuk menginvestigasi struktur dan morfologi dari paduan *shape memory alloy* Cu-Zn-Al, pada penelitian tersebut

menggunakan dua paduan yang berbeda komposisi, sebagai variabelnya. Untuk komposisinya dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini, yang kemudian dipersiapkan untuk dilakukan perlakuan panas.

Tabel 4.1 Persentase Komposisi Paduan Cu-Zn-Al

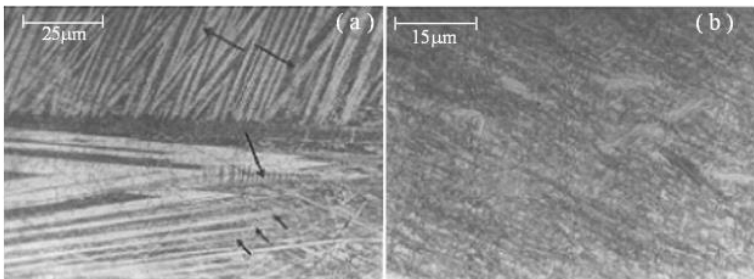
Paduan	Zn	Al	Cu
1	24.98	4.43	<i>Rest</i>
2	21.62	5.68	<i>Rest</i>

Yang pertama material *shape memory alloy* yang telah siap, dilakukan *solution treatment* dengan temperatur 820°C untuk melarutkan fasa α sehingga hanya didapatkan fasa β kemudian di holding pada temperatur tersebut selama 20 menit untuk menghomogenkan struktur mikro yang ingin didapatkan yaitu β . Proses selanjutnya adalah *quenching*, yaitu pendinginan cepat menggunakan es *brine* untuk mencegah fasa α muncul kembali. Setelah di *quenching* paduan tersebut di *aging* dengan temperatur 200°C, dan waktu holding selama 8 jam. Setelah itu paduan tersebut di etsa menggunakan larutan yang mengandung 5 g ferric chloride, 96 ml methanol and 20 ml HCl konsentrat, untuk dapat mengetahui morfologi permukaan setelah dilakukan proses *aging*, kemudian di observasi menggunakan mikroskop optik.



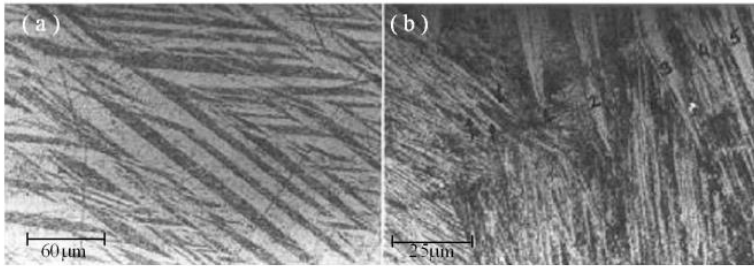
Gambar 4.1 (a) Struktur mikro paduan 1 di *aging* temperatur 200°C selama 1 jam. (b) Paduan 2 setelah di *quenching*

Gambar 4.1 (a) menunjukkan fasa martensit ditunjukkan oleh panah pendek, sedangkan struktur yang ditandai oleh panah panjang dalam butiran yang sama didefinisikan sebagai fasa martensit tipe V, bergantung pada pendinginan yang terjadi karena perbedaan temperatur yang besar. Gambar (b) fasa yang terlihat pada butiran bawah yang berbentuk tajam, disebut fasa martensit tipe V. Kemudian, fasa yang terbentuk pada butiran tengah tidak tajam keadaan ini dapat disebabkan oleh tekanan dalam yang terjadi pada batas fasa austenit-martensit selama pembentukan.



Gambar 4.2 (a) Paduan 1 setelah di *aging* dengan temperatur 200°C selama 1 jam. (b) Paduan 1 setelah di *aging* dengan temperatur 200°C selama 7 jam.

Gambar 4.2 (a) menunjukkan pertumbuhan martensit tipe V dengan empat varian yang terkandung dalam kelompok fasa. Seperti yang ditunjukkan dengan panah panjang pada fasa ditengah dan tipe V dari banyak fasa adalah fasa martensit lameran atau *twinned* martensit. Kemudian struktur martensit yang ditandai dengan panah kecil disebut *needle martensit* pada literatur. Pada Gambar (b) menunjukkan terbentuknya sedimen fasa α setelah di *aging* dengan temperatur 200°C selama 7 jam ini terbentuk karena densitasnya meningkat yang dipengaruhi oleh waktu *aging*. Jadi dapat dikatakan bahwa pembentukan α atau endapan lainnya menyebabkan penurunan temperatur transformasi dengan mencegah pembentukan martensit, dan sehingga dapat menurunkan sifat *shape memory*.



Gambar 4.3 (a) Paduan 2 setelah di *quenching* dengan media pendingin air. (b) paduan 2 setelah di *aging* pada temperatur 200°C selama 4 jam

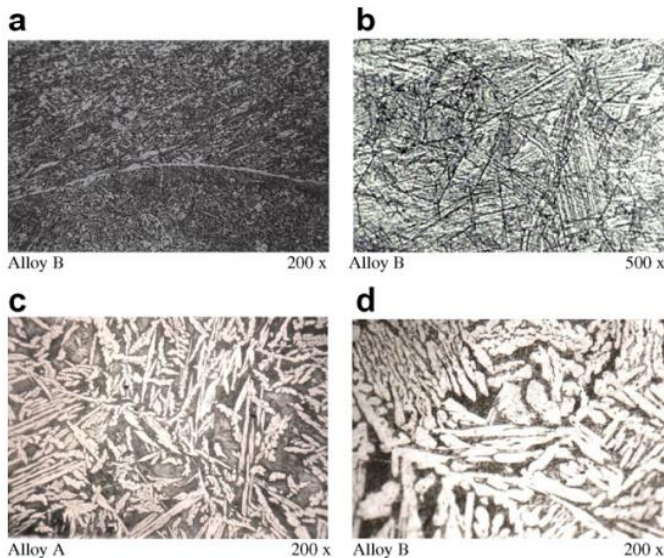
Gambar 4.3 (a) menunjukkan struktur yang didefinisikan sebagai konfigurasi seperti berlian atau kelompok fasa martensit yang harmonis. Transformasi termoe elastik, yang berperan pada mekanisme pembentukan *shape memory effect* mulai terbentuk ditandai dengan bentuk zig-zag dari martensit β yang setengah berhenti pada suhu M_s , dan pembentukan martensit diselesaikan pada suhu $T < M_f$. Gambar (b) sampel ini mengandung banyak butir kecil yang mengarah ke sudut yang sempit, yang ditandai dengan nomor 1 sampai 5. Dapat disimpulkan bahwa endapan fasa α yang dipengaruhi oleh lamanya waktu *aging*, dapat menyebabkan penurunan sifat *memory*, pada temperatur 200°C selama 4 jam.

Lalu, pada tahun 2007, Vanja Asanovic', Kemal Delijic dan Nada Jaukovic, melakukan penelitian mengenai transformasi fasa β pada *shape memory alloy* paduan Cu-Zn-Al. Pada penelitian tersebut mereka menggunakan dua paduan yang berbeda yang dapat dilihat pada Tabel 4.2 di bawah ini:

Tabel 4.2 Persentase Komposisi Paduan Cu-Zn-Al

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

Untuk perlakuan panas yang dilakukan pertama adalah *homogenizing* pada temperatur 1073-1123 K selama 2 jam, kemudian di *quenching* dengan media pendingin air pada temperatur ruangan. Setelah di *homogenizing*, *ingot* kemudian diberi perlakuan *hot forged* dan *cold rolled* sehingga menghasilkan material dengan ketebalan 0.3 mm, lalu dilakukan *intermediate annealing* pada temperatur 773 K selama 60 menit dilakukan setiap melewati proses perlakuan sebanyak dua atau tiga kali. Kemudian spesimen yang preparasi hingga berbentuk plat kemudian dilakukan *solution treatment* selama 10 menit pada daerah fasa β (temperatur 1143 K untuk paduan A dan 1133 K untuk paduan B), kemudian dilakukan *step quench*. Semua spesimen di *quench* dengan media pendingin oli pada temperatur 378 ± 5 K selama 10 menit dan di *quench* lagi dengan air es. Prosedur *step quenching* ini dipilih untuk dilakukan supaya menghindari fenomena stabilisasi martensit, dimana ketika *aging* dilakukan dan langsung di *quench* maka spesimen akan mengalami stabilisasi martensit dan degradasi dari karakteristik *shape memory*. Kemudian dilakukan *aging* pada temperatur 473, 523, 573, 623, 673, 723, 773 and 823 K. Hasil struktur mikronya dapat dilihat pada Gambar 4.4 di bawah.

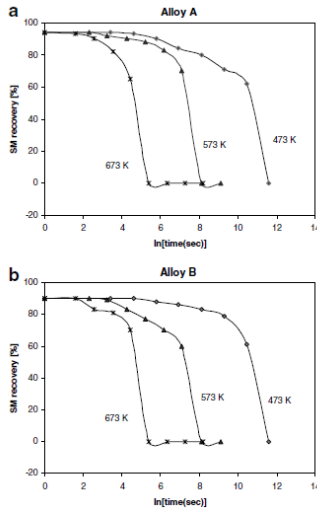


Gambar 4.4 Mikrostruktur dari specimen yang di *aging* pada (a) 30 jam di temperatur 473 K, (b) 128 menit di temperatur 573 K, (c) 32 menit di temperatur 673 K dan (d) 256 menit di temperatur 773 K.

Pada Gambar 4.4 di atas dapat dilihat bawah terjadi pertumbuhan presipitat (fasa α) di batas butir, saat material di panaskan pada *range* temperatur 473K hingga 823K. Kemudian semakin lama dan semakin tinggi temperatur yang digunakan maka akan semakin banyak juga presipitat (fasa α) yang terbentuk. Presipitat ini berpengaruh kepada *shape recovery* yang dihasilkan, semakin banyak presipitat yang terbentuk maka, semakin turun, sifat *shape recovery* yang terbentuk.

Pada Alloy 1 dihasilkan *shape recovery* sebesar 94-96%. Kemudian waktu yang diperlukan atom aluminium untuk berdifusi dan menghasilkan bainit lebih lama karena komposisi aluminium yang lebih banyak. Sedangkan pada Alloy 2 dihasilkan *shape recovery* sebesar 91-94%. Kemudian, waktu yang diperlukan

aluminium untuk berdifusi dan menghasilkan bainit lebih cepat, karena kadar aluminium yang lebih sedikit.



Gambar 4.5 Pengaruh Waktu dan Temperatur *Aging* Terhadap *Shape Recovery*

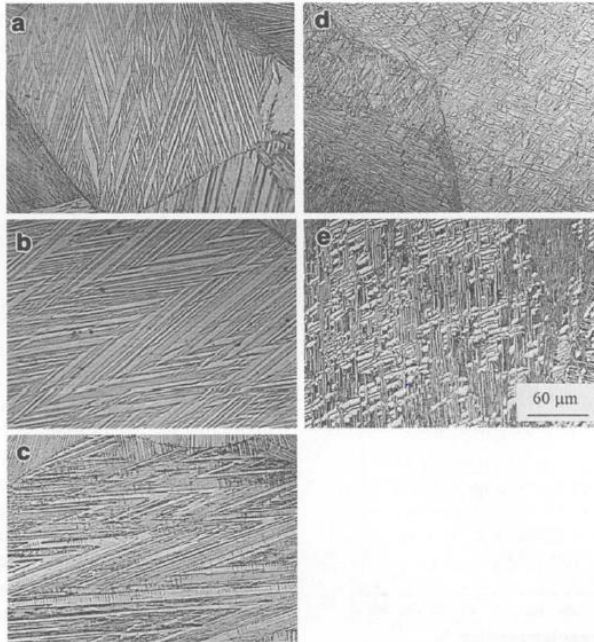
Dari Gambar 4.5 di atas dapat dilihat bahwa semakin lama dan semakin tinggi temperatur yang digunakan selama proses *aging* maka semakin cepat pula *shape recovery* akan menurun. Pada *aging* pada temperatur 473 K selama 9,5 jam, *shape recovery* menurun secara perlahan. Nilai *shape recovery* yang relatif tinggi berada pada spesimen yang di *aging* pada temperatur 473 K selama 3 jam dan pada spesimen yang di *aging* pada temperatur 573 K selama 20 menit. Namun, pada temperatur 673 K *shape recovery* menurun dengan cepat.

Shape recovery mengalami penurunan selama proses *aging* jika dibandingkan dengan spesimen yang hanya mengalami step-quenched, karena spesimen yang di *aging* menghasilkan presipitat (fasa α) yang membuat *shape recovery* semakin turun apabila setidaknya mengandung 20% saja fasa α .

Pada tahun 1997, C.Y. Chung a, C.W.H. Lam, S.S. Tan melakukan penelitian tentang pengaruh perlakuan panas *aging* terhadap *shape memory alloy* dengan penambahan unsur Mn dan Zr. Pada penelitian tersebut komposisi *shape memory alloy* yang digunakan adalah Cu-21Zn-6Al, untuk perlakuan panasnya sendiri ada *solution treatment* pada temperatur 820°C selama 5 menit, kemudian dilakukan step-quench, dengan cara mencelupkan pada air dengan temperatur 100°C kemudian di tahan selama 30 menit, kemudian di celupkan lagi ke air dengan temperatur ruang. Lalu spesimen tersebut di *aging* dengan 4 temperatur yaitu 70, 100, 150 dan 200°C selama 6 jam.

Setelah proses perlakuan panas *aging*, di lakukan lah uji XRD yang memiliki hasil (i) $p_1, p_2, p_3 = 0$; (ii) $\beta = 90^\circ$; (iii) $\gamma = 60^\circ$ dan (iv) $x = 1/3$. Dari hasil tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa terjadi perubahan fasa martensit setelah proses *aging* yaitu dari martensit M18R berubah menjadi N18R.

Gambar 4.6 di bawah menunjukkan spesimen sebelum dan setelah di *aging*, pada Gambar (a) menunjukkan material SMA sebelum di *aging* namun telah melalui proses step *quenching*, pada material tersebut menghasilkan fasa martensit yang diperlihatkan dengan struktur seperti jarum atau bentuk V. Pada Gambar (b) yaitu material yang telah di *aging* pada temperatur 70°C selama 6 jam, juga terbentuk fasa martensit yang sama yaitu berbentuk V. Kemudian pada Gambar (c) menunjukkan material yang telah di *aging* pada temperatur 150°C, fasa yang dihasilkan adalah martensit, namun pada temperatur ini mulai terbentuk interface antar martensit. Lalu pada Gambar (d) menunjukkan material yang telah di *aging* pada temperatur 200°C selama 6 jam, fasa yang dihasilkan adalah bainit dan martensit, namun jumlahnya lebih banyak bainit, yaitu sekitar 70%. Untuk Gambar (e) fasa yang terbentuk adalah α yang ditunjukkan dengan warna terang dan β yang ditunjukkan dengan warna gelap.



Gambar 4.6 Struktur mikro material yang dilakukan *aging* (a) as quenched, (b) 70°C *aging*, (c) 150°C *aging*, (d) 200°C *aging* (e) 300°C *aging*.

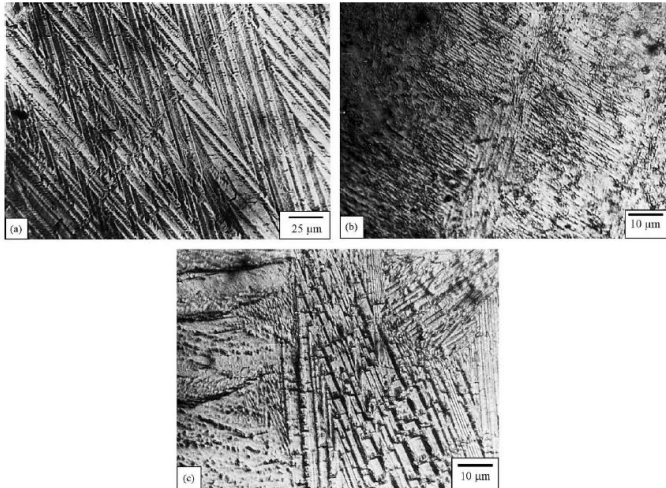
Pada Gambar 4.6 (b) di tunjukan entalpi dari material yang di *aging*, pada temperatur 70 hingga 150°C, tidak menunjukkan penurunan entalpi secara signifikan, sehingga apabila material di *aging* pada temperatur di bawah 150°C, maka tidak banyak merubah fasa yang ada yaitu martensit, sehingga *shape memory effect* yang dihasilkan masih baik. Namun, apabila material di *aging* di atas temperatur 150°, pada penelitian kali ini di *aging* menggunakan temperatur 200°C, maka terjadi perubahan entalpi secara signifikan, yang menandakan terjadinya perubahan fasa martensit dan struktur mikro yang ada, sehingga apabila material di *aging* di atas temperatur 200°C akan dapat menurunkan *shape memory effect* yang dihasilkan.

Gambar 4.6 (d) menunjukkan material yang di *aging* pada temperatur 200°C, saat di *aging* pada temperatur ini mulai terjadi pertumbuhan presipitat bainit yang merupakan fasa transisi, kemudian akan berubah fasanya menjadi fasa α . Saat di *aging* pada temperatur 300°C, daerah fasa α dan β semakin luas. Setelah fasa α pada Al habis, konsentrasi Al pada batas butir akan meningkat, sehingga akan menyebabkan berubahnya komposisi kimia dan temperatur transformasi, sesuai yang ada pada Gambar 4.6, yang menunjukkan perubahan temperatur transformasi.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa, pembentukan fasa kembali terjadi saat material di *aging*, namun yang terbentuk bukanlah martensit M18R, melainkan yang terbentuk adalah N18R, tetapi memiliki properties yang mirip dengan M18R, fasa ini sifatnya tidak stabil hingga mencapai temperatur yang tepat, yang dapat di kontrol dengan waktu dan temperatur *aging*. Pada temperatur 200°C selama 6 jam, mulai terbentuk presipitat yang berubah menjadi fasa bainit dan fasa α , sehingga menurunkan jumlah martensit dan temperatur transformasi yang ada.

Pada tahun 2004, A.K. Bhuniya, dkk melakukan penelitian mengenai pengaruh penambahan Ti terhadap degradasi efek *shape memory* pada paduan Cu – Zn – Al. Pada penelitian kali ini menggunakan komposisi paduan Cu – 13.60 Zn – 8.99 Al. Kemudian paduan tersebut dilakukan proses perlakuan panas *solution treatment* pada temperatur 825°C selama 30 menit, dan di *quenching* menggunakan air es, kemudian material *shape memory alloy* tersebut di lakukan *aging* pada *range* temperatur 50 – 300°C selama 2 jam, lalu dilakukan pengujian struktur mikro (metalografi) dan pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC).

Pada pengujian struktur mikro (metalografi) dihasilkan struktur mikro yang dapat dilihat pada Gambar 4.7.



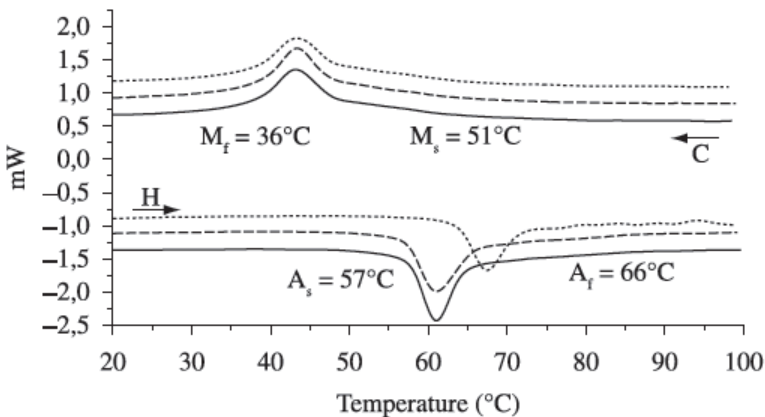
Gambar 4.7 Struktur Mikro *Shape Memory Alloy* yang di *aging* pada temperatur (a) 75°C (b) 250°C (c) 300°C selama 2 jam

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat hasil pengujian struktur mikro pada material *shape memory alloy* yang di *aging* pada temperatur (a) 75°C (b) 250°C (c) 300°C selama 2 jam. Pada Gambar 4.7 (a) material SMA yang di *aging* pada temperatur 75°C menunjukkan orientasi martensit tipe-V yang baik dan masih terlihat dengan jelas. Pada Gambar 4.7 (b) struktur martensit masih ada namun ditambah dengan meningkatnya precipitat yang cukup signifikan dan pada Gambar 4.7 (c) martensit yang ada semakin tidak teratur arahnya dan presipitat yang ada semakin banyak pada martensit. Kemudian dilakukan pengujian *differential scanning calorimeter* (DSC) pada material *shape memory alloy* yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.3.

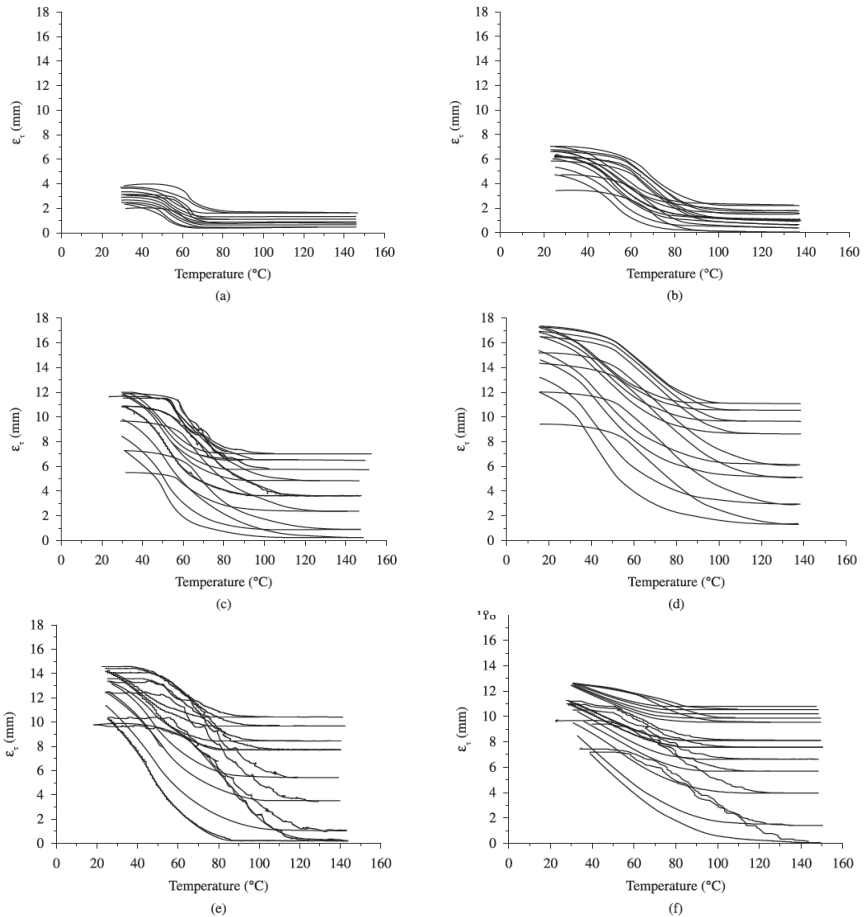
Tabel 4.3 Temperatur Transformasi Material *Shape Memory Alloy*

Alloy	A_s	A_f	T_p
A	65	122	77

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Carlos Augusto N.O dan Cezar Henrique G. pada tahun 2010 mengenai pengaruh sifat termoelastik pada pegas *shape memory alloy* Cu-Zn-Al, pada penelitian kali ini menggunakan komposisi paduan Cu-25,3% Zn-4,0%Al, kemudian material tersebut di proses menggunakan perlakuan panas *solution treatment* pada temperatur 850° selama 10 menit kemudian di *quenching* menggunakan media pendingin air pada temperatur 100°C selama 15 menit. Lalu, dilakukan pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC), untuk mengetahui temperatur transformasi dari material *shape memory alloy*, dapat dilihat pada Gambar 4.8 yang menghasilkan temperatur transformasi yaitu sebagai berikut: Ms: 51°C; Mf: 36°C; As: 57°C; Af: 66°C.



Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengujian DSC Material SMA



Gambar 4.9 Siklus Termal SMA Cu-Zn-Al dengan Tegangan
a) 27 MPa, b) 44 MPa, c) 55 MPa, d) 70 MPa
e) 83 MPa dan f) 111 MPa.

Dari Gambar 4.9 diatas mengenai siklus termal yang dialami oleh material *shape memory alloy* menggunakan beban yang berbeda dan temperatur yang semakin tinggi, maka menyebabkan tegangan yang terjadi pada material mengalami penurunan.

Tabel 4.4 Deformasi Tegangan Untuk Beberapa Siklus
Deformasi Termoelastik

<i>Cycles</i>	Initial	1	5	10	15	20	30	40	50
Pegas 4.0 mm									
27 MPa	0.6	2.0	2.9	3.0	3.1	3.1	3.6	3.7	3.9
44 MPa	1.7	5.2	7.2	7.2	7.2	7.0	6.2	5.0	4.6
55 MPa	4.2	3.4	5.1	5.2	5.1	5.2	5.0	4.9	4.7
70 MPa	4.6	9.4	8.8	7.9	7.0	6.6	5.1	4.6	4.2
83 MPa	5.0	8.4	9.6	9.4	8.7	8.1	7.5	7.0	6.5
111 MPa	8.2	6.6	6.1	4.0	4.0	3.4	3.0	2.4	2.0

Kemudian pada Tabel 4.4 mengenai deformasi tegangan yang dialami material *shape memory alloy*, maka memperlihatkan semakin besar beban dan semakin banyak siklus yang diberikan pada material *shape memory alloy* akan menyebabkan regangan yang dialami oleh material semakin menurun. Sehingga dari Gambar 4.8 dan Tabel 4.4 dapat menunjukkan semakin banyak siklus yang diberikan pada material, semakin besar beban yang diberikan dan semakin tinggi temperatur yang diberikan pada material akan semakin mempercepat material mengalami deformasi, sehingga menurunkan sifat *shape memory effect*.

4.1.2 Paduan Cu-Al-Ni

Paduan *shape memory alloy* berbasis Cu atau tembaga yang sedang dikembangkan selain paduan Cu-Zn-Al, adalah paduan Cu-Al-Ni. Paduan Cu-Al-Ni memiliki kelebihan dibandingkan paduan Cu-Zn-Al dan juga Ni-Ti yaitu memiliki stabilitas yang lebih baik pada temperatur tinggi. Paduan Cu-Al-Ni dapat digunakan sebagai aktuator dan sensor yang memiliki temperatur kerja sekitar 200°C, sedangkan paduan Cu-Zn-Al dan Ni-Ti hanya dapat bekerja pada temperatur maksimal 120°C. (A. Agrawal, R.K. Dube, 2018).

Paduan Cu-Al-Ni memiliki *range* temperatur transformasi yang sangat luas, yaitu antara temperatur -200°C hingga temperatur 300°C, bergantung pada kandungan Al dan Ni yang ada. Meskipun pada temperatur tinggi paduan ini cenderung stabil, namun pada

temperatur rendah paduan ini cenderung lebih getas dibandingkan paduan Cu-Zn-Al. (Z. Karagoz, C. Aksu Canbay, 2013).

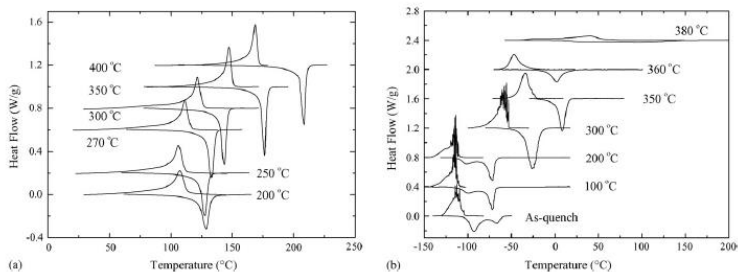
Paduan Cu-Al-Ni yang memiliki sifat efek *shape memory* harus berada pada *range* komposisi yaitu dengan komposisi Al sebanyak 12 hingga 14.5%, lalu komposisi Ni sebanyak 3 hingga 4.5% Ni, dan sisanya Cu. (ASM Handbook Vol. 2, 1992)

Pada penelitian yang dilakukan oleh J.I. P´erez-Landaz´abal, dkk pada tahun 2005 mengenai stabilitas dan proses dekomposisi fasa β pada paduan Cu-Al-Ni, pada penelitian tersebut menggunakan dua komposisi yang berbeda sebagai variabelnya. Untuk komposisinya dapat dilihat pada Tabel 4.5 di bawah ini:

Tabel 4.5 Persentase Komposisi Cu-Al-Ni

Paduan	Al	Ni	Cu
L	14.37	4.2	<i>Rest</i>
H	13.15	3.25	<i>Rest</i>

Kedua sample dibuat dengan proses *powder metallurgy* dan *hot isostatic pressing* (HIP), kemudian di berikan proses *solution treatment*, pada temperatur 900°C, dan di holding selama 30 menit, dalam kondisi inert menggunakan gas argon. Lalu di queching ke dalam air es.



Gambar 4.10 Kurva Siklus Pemanasan dan Pendinginan DSC Setelah Pemanasan dengan Temperatur yang Berbeda (a) Paduan H dan (b) Paduan L

Pada Gambar 4.10 (a) di atas dapat dilihat untuk paduan H memiliki fasa martensit (β') pada temperatur ruang hingga pada saat paduan tersebut dipanaskan pada temperatur 400°C , tidak mengalami perubahan fasa, tetapi tetap pada fasa martensit (β').

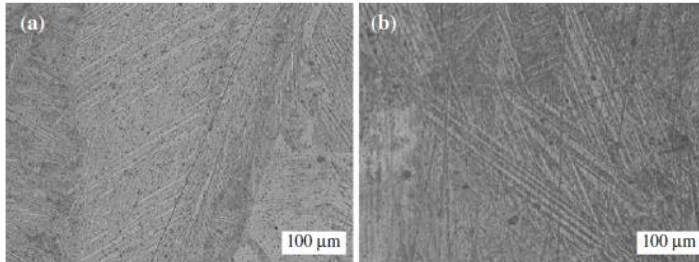
Pada Gambar 4.10 (b) untuk paduan L hanya menunjukkan bentuk kurva MT yang kontinu pada saat temperatur tinggi dan temperatur rendah, sebaliknya *reverse* MT menunjukkan dua *peak* yang merupakan ciri-ciri perubahan fasa β campuran menjadi β' dan γ' , pada temperatur rendah terjadi perubahan fasa β' menjadi β , sedangkan pada temperatur tinggi terjadi perubahan fasa dari γ' menjadi β . Munculnya dua *peak* yang berbeda tersebut disebabkan oleh perbedaan temperatur *hysteresis*, yang berasal dari perbedaan komposisi paduan Cu-Al-Ni. Peningkatan komposisi aluminium, dengan komposisi Nikel yang konstan menyebabkan perubahan pembentukan martensit yaitu dari β menjadi β' dan γ' .

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Z. Karagoz • C. Aksu Canbay pada tahun 2013 yang membahas tentang hubungan antara temperatur transformasi dengan elemen paduan pada *shape memory alloy* Cu-Al-Ni. Pada penelitian kali ini yang digunakan sebagai variabel adalah perbedaan komposisi, yang dapat dilihat pada Tabel 4.6 di bawah:

Tabel 4.6 Persentase Komposisi Cu-Al-Ni

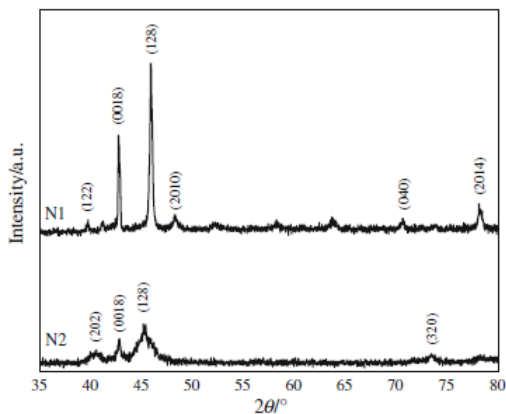
Paduan	Cu	Al	Ni
N1	81.97	13.73	4.3
N2	82.27	13	4.3

Kemudian kedua sampel dibentuk dengan menggunakan metode casting, lalu kedua sampel tersebut di berikan perlakuan panas proses *solution treatment*, pada temperatur fasa β , selama 1 jam, kemudian di lakukan proses *quenching* pada *ice brine*.



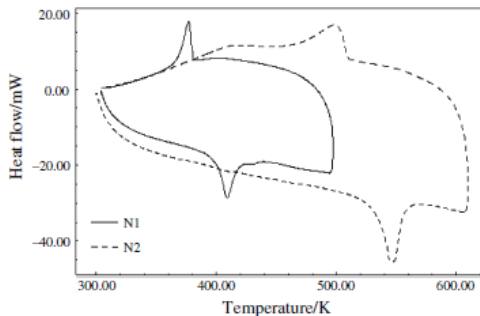
Gambar 4.11 Struktur Mikro Paduan Cu-Al-Ni
(a) Sampel N1 (b) Sampel N2

Struktur mikro yang ada pada Gambar 4.11 di atas menunjukkan sampel N1 dan sampel N2 yang masing-masing menghasilkan fasa martensit (β') pada temperatur ruang. Perbedaannya pada sampel N1 (a) menunjukkan batas butir, dan di dalam butir yang dihasilkan merupakan martensit tipe V serta jarum, namun berbeda orientasi, sedangkan pada sampel N2 (b) hanya dapat terlihat martensit tipe V.



Gambar 4.12 Hasil XRD Paduan Cu-Al-Ni material N1 dan N2

Dari Gambar 4.12 hasil XRD di atas dapat diambil hasil yaitu mengindikasikan bahwa sampel N1 dan N2 merupakan *monoclinic* dengan di dapatkan lattice parameter sebagai berikut: $a = 4.443 \text{ \AA}$, $b = 5.169 \text{ \AA}$, and $c = 37.012 \text{ \AA}$. Kemudian dihitung rasio a/b dan didapatkan hasil sebesar 0.84, yang mengindikasikan adalah fasa martensit 18R yang memiliki *long period*, sehingga dapat disimpulkan dengan proses pendinginan cepat fasa β berubah menjadi struktur DO_3 yang kemudian berubah lagi menjadi martensit (β'). Meskipun hasilnya menunjukkan sampel N1 dan N2 memiliki pola yang serupa, namun pada sampel N1 menunjukkan struktur 2 fasa yang dibentuk oleh fasa martensit β'_1 dan fasa α , disebabkan oleh komposisi aluminium yang tinggi pada sampel N1, sehingga pada saat proses homogenisasi fasa β , menghasilkan pembentukan martensit seluruhnya, dengan campuran fasa β'_1 dan α .



Gambar 4.13 Hasil Uji DSC material N1 dan N2 dengan *heating/cooling rate* sebesar 25 K min^{-1}

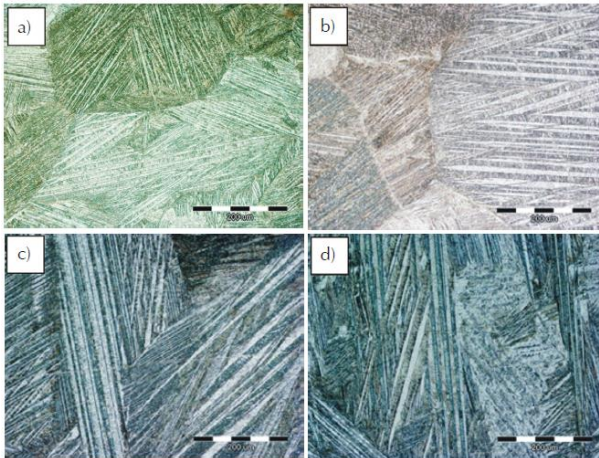
Tabel 4.7 Temperatur Transformasi dari Paduan N1 dan N2 dengan *Heating / Cooling Rates* sebesar 25 K min^{-1}

Sampel	As (°C)	Af (°C)	Ms (°C)	Mf (°C)
N1	390.4	422.8	381.2	363.7
N2	526.3	557	510	464.4

Dari Gambar 4.13 dan Tabel 4.7 di atas dapat diambil hasil bawah komposisi dari paduan Cu-Al-Ni mempengaruhi temperatur transformasi dari *shape memory alloy*. Aluminium berpengaruh pada perubahan *forward* dan *reverse transformation*, selain itu aluminium dan nikel juga menekan difusi Al dan Cu, sehingga material dapat mempertahankan *single phase* pada saat proses pendinginan.

Pada tahun 2018, I. Ivanić, S. dkk melakukan penelitian mengenai pengaruh perlakuan panas pada material *shape memory alloy* terhadap mikro struktur dan temperatur transformasi fasa. Komposisi material paduan yang digunakan pada penelitian kali ini adalah Cu-12.8 Al-4.1 Ni, kemudian material tersebut diberikan perlakuan panas *solution treatment* pada temperatur 850°C selama 60 menit kemudian di *quenching* menggunakan media pendingin air, kemudian dilanjutkan dengan *aging* pada 4 temperatur yang berbeda yaitu pada temperatur 150, 200, 250 dan 300°C masing-masing selama 60 menit lalu di *quenching* menggunakan media pendingin air. Kemudian material yang telah melalui proses perlakuan panas tersebut di uji menggunakan pengujian struktur mikro dan *differential scanning calorimeter* (DSC).

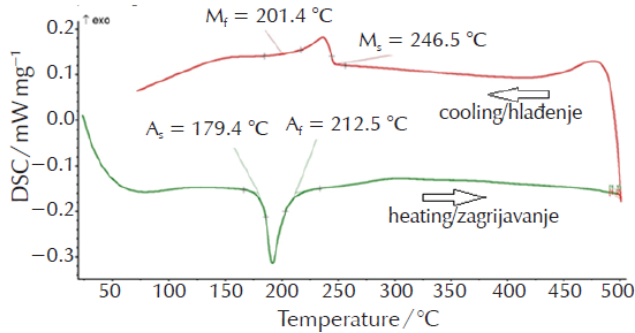
Pengujian struktur mikro, dilakukan pada material *as-cast*, material yang mengalami proses perlakuan panas *solution treatment* pada temperatur 850°C selama 60 menit, material yang mengalami *tempering* pada temperatur 150°C dan 300°C, yang dapat dilihat pada Gambar 4.14.



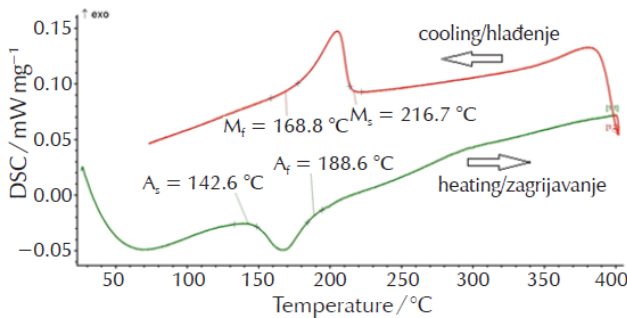
Gambar 4.14 Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Material
(a) As-Cast (b) *Solution treatment* 850°C (c) *Tempering* 150°C
dan (d) *Tempering* 300°C

Dari Gambar 4.14 dapat dilihat hasil pengujian struktur mikro, semuanya menghasilkan fasa martensit, namun setelah melalui proses perlakuan panas Gambar 4.12 (b)(c)(d) fasa martensit semakin terlihat lebih jelas, yang membedakan hanyalah orientasi martensit dari tiap-tiap butir. Proses perlakuan panas *solution treatment* dilakukan untuk membentuk fasa *full*-martensit, namun ukuran butir dan martensit tipe lain yang terbentuk bergantung dari temperatur, waktu dan media pendingin yang digunakan.

Selanjutnya dilakukan pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), dengan kecepatan pemanasan dan pendinginan adalah 10 K min^{-1} pada *range* temperatur ruang hingga 400°C. Hasil Pengujian DSC dapat dilihat pada Gambar 4.15, Gambar 4.16 dan Tabel 4.8.



Gambar 4.15 Kurva Hasil Pengujian DSC Material *As-Cast*



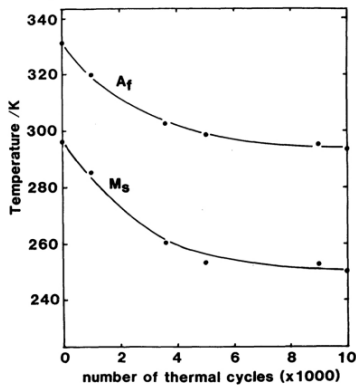
Gambar 4.16 Kurva Hasil Pengujian DSC Material *Solution Treatment* pada Temperatur 850°C selama 60 menit dengan Media Pendingin Air

Tabel 4.8 Temperatur Transformasi *Shape Memory Alloy*

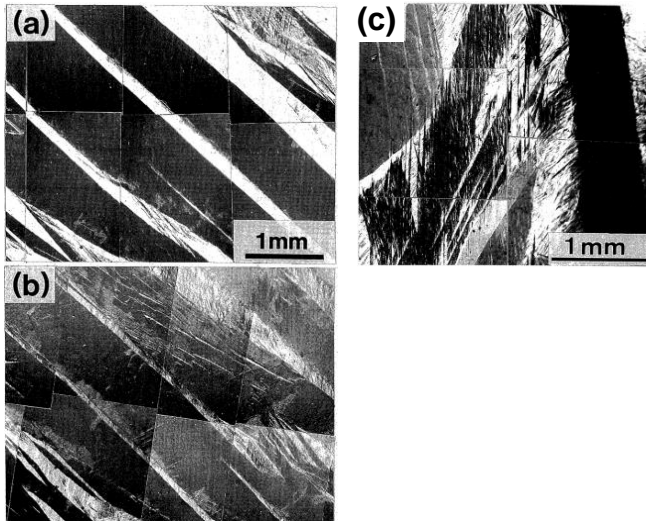
Sampel	A _s (°C)	A _f (°C)	M _s (°C)	M _f (°C)
As-Cast	179.4	212.5	246.5	201.4
<i>Solution treatment at 850 °C/60'/WQ</i>	142.6	188.6	216.7	168.8
<i>Tempered at 150 °C/60'/WQ</i>	150.4	180.5	214.0	176.4
<i>Tempered at 200 °C/60'/WQ</i>	152.5	182.0	213.7	181.4
<i>Tempered at 250 °C/60'/WQ</i>	163.4	192.0	216.8	181.4
<i>Tempered at 300 °C/60'/WQ</i>	180.3	205.5	213.1	183.3

Dari hasil pengujian DSC pada Gambar 4.15, Gambar 4.16 dan Tabel 4.8, dihasilkan temperatur transformasi yang berbeda-beda, hal itu disebabkan oleh perlakuan panas yang diberikan pada tiap-tiap material. Temperatur transformasi paling tinggi dihasilkan oleh spesimen *as-cast*, hal ini disebabkan oleh regangan internal dan struktur mikro yang terbentuk pada saat proses pengecoran. Kemudian setelah proses perlakuan panas temperatur transformasi hanya berkisar 213.1°C hingga 216.8°C.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Yoshiyuki Nakata, Tsugio Tadaki and Ken'ichi Shimizu pada tahun 1985, mengenai pengaruh temperatur berulang pada *shape memory alloy* Cu-Al-Ni dengan menggunakan komposisi paduan Cu-13.7 Al-4.0 Ni. Kemudian material tersebut diberikan perlakuan panas *solution treatment* pada temperatur 1273K, lalu di *quenching* menggunakan media pendingin air pada temperatur 313K.



Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Temperatur dan Siklus Termal



Gambar 4.18 Struktur Mikro *Shape Memory Alloy* Setelah
(a)1 Siklus, (b)1000 Siklus, (c)10000 Siklus Termal

Dari Gambar 4.17 yang menunjukkan perbandingan temperatur dan jumlah siklus yang dihasilkan, menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur yang digunakan maka akan semakin sedikit jumlah siklus yang dapat diterima oleh material *shape memory alloy* dan semakin rendah temperatur yang digunakan maka akan semakin banyak siklus yang dapat diterima oleh material *shape memory alloy*, kemudian pada Gambar 4.18 menunjukkan struktur mikro dari material *shape memory alloy* yang merupakan fasa martensit, Gambar 4.18 (a) menunjukkan material *shape memory alloy* yang mengalami 1 siklus termal, (b) mengalami 1000 siklus termal dan (c) 10000 siklus termal, dari hasil struktur mikro tersebut, menunjukkan semakin banyak siklus termal yang dilakukan maka martensit yang dihasilkan akan semakin tidak beraturan.

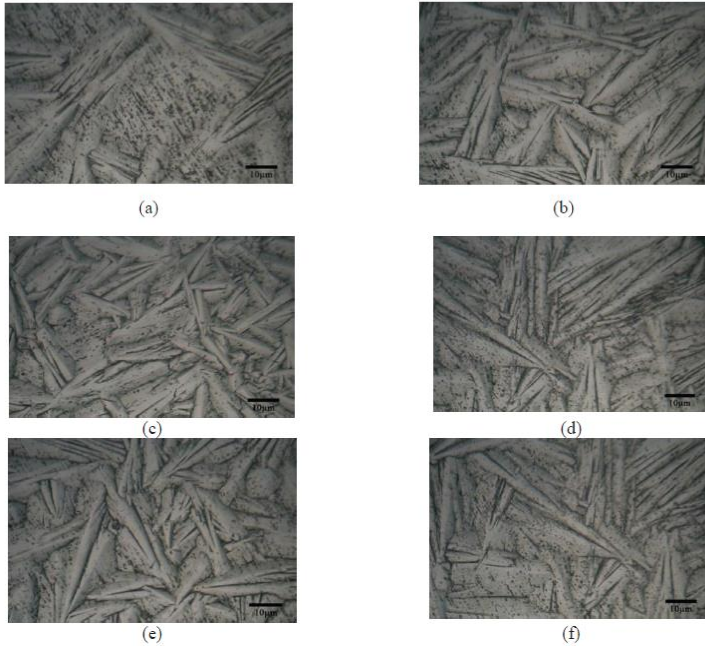
4.1.3 Paduan Ni-Ti

Selain paduan berbasis Cu atau tembaga, yaitu Cu-Zn-Al dan Cu-Al-Ni, *shape memory alloy* juga dapat dibuat dengan menggunakan paduan lain yaitu Nikel Titanium atau Ni-Ti. *shape memory alloy* Ni-Ti memiliki kelebihan dibandingkan Cu-based, yaitu sifat *ductility* yang tinggi, sehingga lebih ulet, selain itu Ni-Ti juga memiliki sifat biokompatibilitas yang baik, kekakuan rendah, ketahanan korosi yang baik, ketahanan aus yang tinggi, sifat superelastisitas, dan kekuatan yang baik. Sifat-sifat ini yang membuat Ni-Ti dapat diaplikasikan pada berbagai bidang, misalnya medis, aerospace, dan otomotif. Komposisi yang digunakan untuk pembuatan *shape memory alloy* berbasis Ni-Ti, umumnya adalah 50%Ni-50%Ti; 55%Ni-45%Ti; 45%Ni-55%Ti. (C. Josiah Cheria, dkk, 2019)

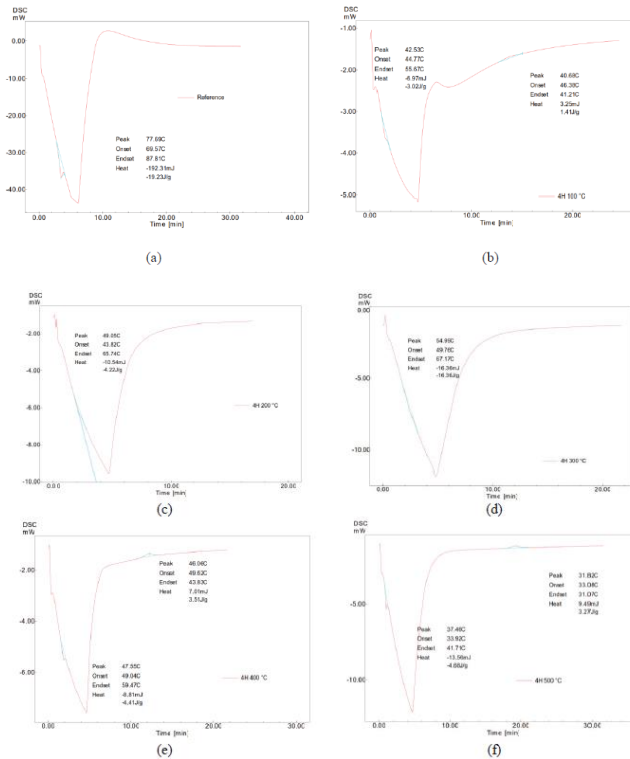
Pada penelitian yang dilakukan oleh N. Unlu , I. Ozkul, C. Aksu Canbay pada tahun 2018, mengenai analisis termal dan struktur pada Ni-Ti *shape memory alloy*. Pada penelitian ini komposisi yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Paduan	Ni	Ti
1	32.47	67.53

Variable yang digunakan pada penelitian kali ini adalah temperatur *aging*, yaitu pada temperatur 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, dan 500°C selama 4 jam. Setelah melalui proses *aging*, semua spesimen uji metalografi kemudian dilihat mikrostrukturnya, semua spesimen menunjukkan bahwa pada bagian permukaan material terdapat *martensite plate*, sehingga disini dapat disimpulkan bahwa perlakuan panas tidak banyak berpengaruh pada struktur mikro material kecuali pada temperatur 500°C yang dapat dilihat pada Gambar 4.19 di bawah. Perbedaan temperatur menunjukkan berubah atom-atom yang berikatan, lalu pemanasan pada temperatur di atas 400°C, akan mengubah *mechanical properties* dari SMA tersebut.



Gambar 4.19 Struktur mikro material yang diberi perlakuan panas (a) tanpa *aging*, (b) 4h 100 °C, (c) 4h 200 °C, (d) 4h 300 °C, (e) 4h 400°C, (f) 4h 500 °C



Gambar 4.20 Hasil Uji DSC pada Material (a) tanpa *aging*, (b) 4h 100 °C, (c) 4h 200 °C, (d) 4h 300 °C, (e) 4h 400 °C, (f) 4h 500 °C

Pada Gambar 4.20 (a) SMA tanpa *aging* menunjukkan A_s : 69.57 dan A_f : 87.81. Kemudian pada SMA yang (b) di *aging* pada temperatur 100°C, menunjukkan A_s : 44.77 dan A_f : 55.67. Lalu, (c) *aging* pada temperatur 200°C menunjukkan A_s : 43.82 dan A_f : 65.74. (d) *Aging* pada temperatur 300°C menunjukkan A_s : 49.76 dan A_f : 67.17. (e) *Aging* pada temperatur 400°C menunjukkan A_s : 49.04 dan A_f : 59.47. (f) *Aging* pada temperatur 500°C menunjukkan A_s : 33.92 dan A_f : 41.71. Namun, pada material a, c dan d tidak menunjukkan

temperatur M_s dan M_f , sedangkan pada material b, e dan f menunjukkan temperatur M_s dan M_f .

Selanjutnya, pada tahun 2018, penelitian dilakukan oleh Iskender Ozkul, Canan Aksu Canbay, yang membahas tentang investigasi perilaku termomekanik pada paduan Nikel-Titanium yang di *aging*. Komposisi yang digunakan pada penelitian kali ini dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Persentase Komposisi Ni-Ti

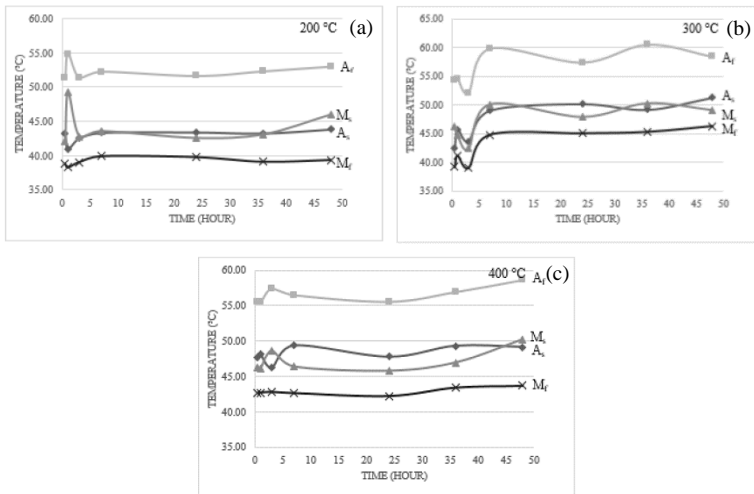
Paduan	Ni	Ti
1	49.38	50.62

Penelitian ini, menggunakan temperatur dan waktu *aging* sebagai variabel, dengan temperatur yang digunakan adalah 200, 300 dan 400°C, sedangkan waktu yang digunakan adalah 0.5, 1, 3, 7, 24, 36, dan 48 jam. Terdapat 22 sampel pada penelitian ini, yang dapat dilihat pada Tabel 4.11:

Tabel 4.11 Material Ni-Ti yang diberi Perlakuan Panas *Aging*

Temp. (°C)	Waktu (jam)	A_s	A_f	M_s	M_f
Homogenized		43.94	52.26	45.43	40.33
200	0,5	43.23	51.39	42.09	38.76
200	1	40.93	54.86	49.19	38.31
200	3	42.5	51.42	42.79	39.05
200	7	43.36	52.26	43.52	39.91
200	24	43.42	51.64	42.51	39.77
200	36	43.26	52.31	43.04	39.10
200	48	43.87	52.99	45.94	39.36
300	0,5	42.54	54.36	46.2	39.21
300	1	45.73	54.60	44.76	41.22
300	3	43.63	52.04	42.38	39.10
300	7	49.02	59.84	50.10	44.81
300	24	50.17	57.38	47.92	45.05
300	36	49.16	60.55	50.28	45.3
300	48	51.3	58.42	49.09	46.3

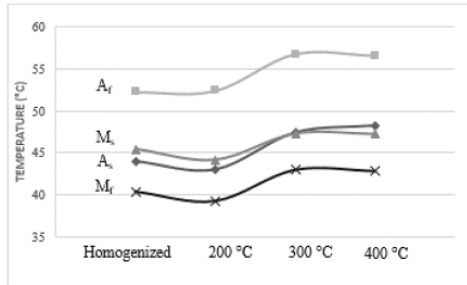
400	0,5	47.64	55.46	46.32	42.63
400	1	48.06	55.5	46.14	42.7
400	3	46.29	57.41	48.59	42.78
400	7	49.33	56.51	46.37	42.61
400	24	47.78	55.58	45.77	42.17
400	36	49.3	56.93	46.95	43.42
400	48	49.14	58.59	50.22	43.68



Gambar 4.21 Perbandingan Temperatur Transformasi Sampel yang di Aging pada Temperatur (a) 200, (b) 300 dan (c) 400°C

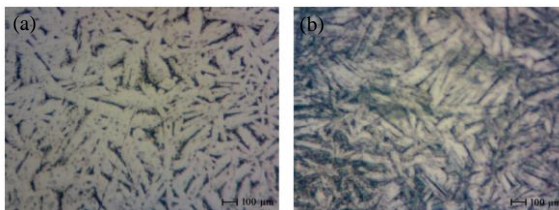
Pada Gambar 4.21 (a) dengan temperatur 200°C, terjadi aktivitas sehingga menyebabkan kurva meningkat di waktu 0.5 hingga 3 jam pertama, ini terjadi akibat adanya pelepasan residual stress. Begitu juga pada Gambar (b) dan Gambar (c) terjadi perubahan yang signifikan di waktu 0.5 hingga 3 jam, sehingga 3 jam adalah waktu yang penting untuk material mencapai titik stabilnya. Kemudian, setelah 3 jam hingga waktu 48 jam, grafik tidak menunjukkan perubahan yang signifikan, karena pada waktu

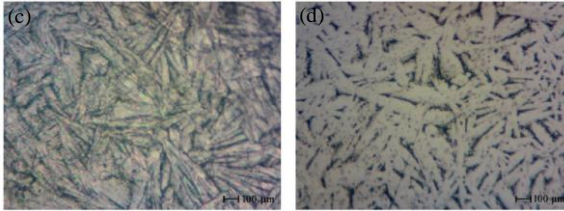
itu presipitasi mulai tumbuh dalam butir, sehingga membentuk struktur yang tidak mudah berubah.



Gambar 4.22 Perbandingan Nilai Rata-Rata Temperatur Transformasi

Pada Gambar 4.22 di atas, grafik cenderung memiliki bentuk yang sama, yaitu temperatur sampel yang di homogenisasi lebih tinggi di dibandingkan dengan sampel yang di *aging* pada temperatur 200°C, hal ini terjadi karena pelepasan residual stress. Kemudian pada temperatur 300°C dan 400°C, temperatur transformasi meningkat 5°C, disebabkan karena pada saat proses *aging*, terjadi pertumbuhan presipitat, sehingga terjadi perubahan volume dalam butir, dan meningkatnya kadar Ti, dimana meningkatnya kadar Ti, menyebabkan meningkatnya pula temperatur transformasi.



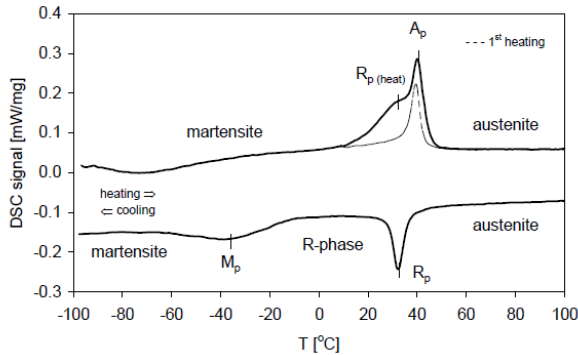


Gambar 4.23 Struktur Mikro Sampel (a) Homogenisasi (b) *Aging* 200°C (c) 300°C (d) 400°C

Dari Gambar 4.23 (a) dan (b) yaitu material yang di homogenisasi dan di *aging* pada temperatur 200°C, memiliki ukuran butir yang lebih kecil, jika dibandingkan dengan material (c) dan (d) yang diberi perlakuan panas *aging* pada temperatur 300°C dan 400°C.

Pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa, sampel yang hanya mengalami proses homogenisasi masih memiliki tegangan sisa, kemudian sampel yang dipanaskan pada temperatur 200°C keatas, dengan waktu lebih dari 3 jam, akan melepaskan tegangan sisa, sehingga fasa dan temperatur transformasi yang dihasilkan lebih stabil. Lalu, ketika temperatur 300°C keatas, akan menyebabkan naiknya temperatur transformasi dan membesarnya ukuran butir.

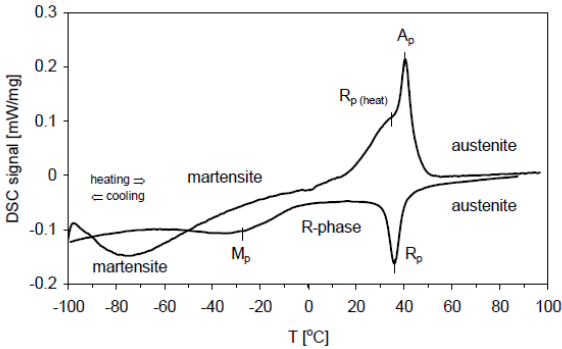
Selanjutnya pada tahun 2010, Krzysztof Kus dan Teodor Breczko, melakukan penelitian terkait paduan nikel-titanium yaitu mengenai menganalisis pengaruh temperatur *annealing* pada perubahan fasa yang terjadi pada *shape memory alloy* Ni-Ti menggunakan DSC (*Differential Scanning Calorimeter*), pada penelitian ini menggunakan material NiTiNOL yang sudah jadi, dengan ketebahan 0.5 mm dan dimensi 2x2 mm. Selanjutnya, pada penelitian kali ini menggunakan temperatur *annealing* sebagai variabel, yaitu sebagai berikut: 400, 450, 500, 550, dan 600°C, lalu di tahan dalam furnace selama 30 menit, kemudian di dinginkan menggunakan udara hingga temperatur ruang.



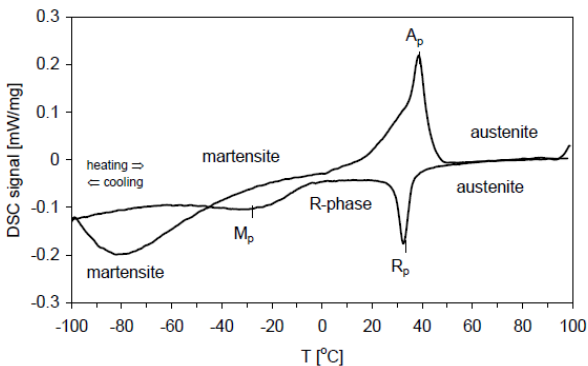
Gambar 4.24 Kurva DSC Material Ni-Ti Tanpa *Annealing*

Pada Gambar 4.24 dapat dilihat bahwa kurva bagian atas menunjukkan reaksi eksotermik pada temperatur tinggi, terjadinya perubahan fasa dari A (austenit) ke fasa R, kemudian pada bagian bawah terdapat reaksi eksotermik pada temperatur rendah, terjadinya perubahan fasa dari fasa R menjadi fasa M (martensit). Sehingga pada material ini menunjukkan dua tahap perubahan transformasi yang baik, yaitu dari A (austenit) – R – M (martensit), pada saat fasa austenit menjadi fasa R, kurva yang terbentuk yaitu sempit, sedangkan pada saat fasa R menjadi martensit, kurva berbentuk dangkal atau cenderung rata.

Untuk reaksi endotermik juga menunjukkan dua tahap perubahan, namun pada reaksi ini, kurva yang terbentuk kurang baik. Pada saat perubahan fasa dari martensit ke fasa R, terbentuk dua kurva yang saling tumpang tindih dan lebih kecil, sedangkan pada saat perubahan fasa dari fasa R ke austenit kurva yang terbentuk lebih besar, hal ini menyulitkan untuk mengidentifikasi, akhir dari perubahan fasa martensit ke fasa R, dan awal dari perubahan fasa R ke austenit.

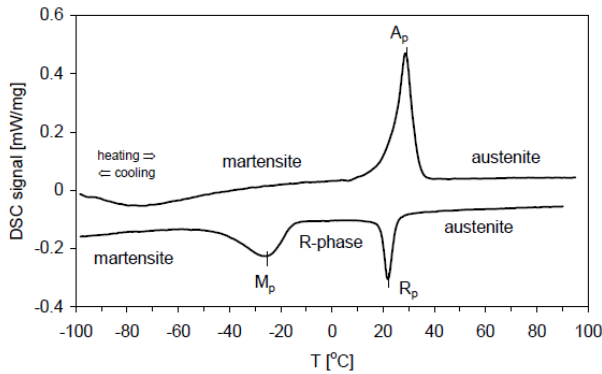


Gambar 4.25 Kurva DSC Material Ni-Ti *Annealing* pada Temperatur 400°C

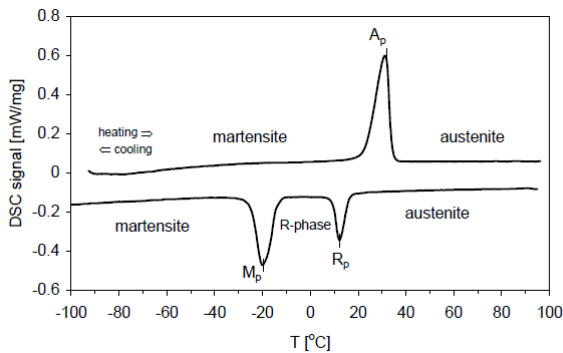


Gambar 4.26 Kurva DSC Material Ni-Ti *Annealing* pada Temperatur 450°C

Pada Gambar 4.25 dan 4.26 menunjukkan kurva DSC yang terbentuk setelah proses *annealing* pada temperatur 400 dan 450°C. Kurva yang terbentuk mirip dengan material tanpa *annealing*, terdapat dua tahap transformasi temperatur melalui fasa R pada saat proses pemanasan dan pendinginan, namun hanya pada saat temperatur *annealing* meningkat, yang menyebabkan reaksi endotermik terjadi *overlapping*, sehingga bentuk kurva menjadi tumpang tindih.



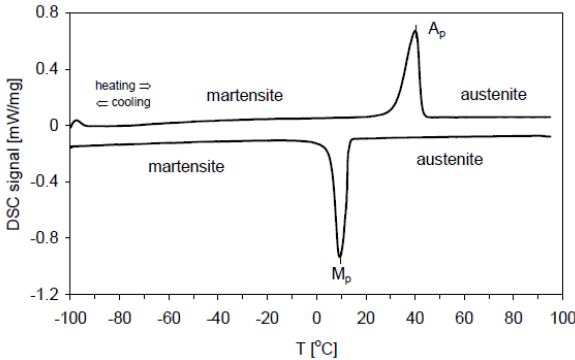
Gambar 4.27 Kurva DSC Material Ni-Ti *Annealing* pada Temperatur 500°C



Gambar 4.28 Kurva DSC Material Ni-Ti *Annealing* pada Temperatur 550°C

Pada Gambar 4.27 dan 4.28 yang menunjukkan hasil DSC dari material yang di *annealing* pada temperatur 500 dan 550°C. Kurva yang dihasilkan masih dalam dua tahap, yaitu antara austenit, fase-R dan martensit. Namun pada temperatur ini, puncak $R \rightarrow M$ cenderung lebih sempit dan pasti lebih dalam dengan peningkatan suhu perlakuan panas. Pada kurva pemanasan DSC, hanya satu puncak endotermik yang terdeteksi. Ini berarti bahwa transformasi dari martensit ke fase-R lebih jauh daripada ke austenit secara

langsung, sehingga menghasilkan proses satu tahap $M \rightarrow A$. Tetapi, pada temperatur rendah dari puncak endotermik masih dapat terlihat perubahan transformasi $R \rightarrow A$.



Gambar 4.29 Kurva DSC Material Ni-Ti *Annealing* pada Temperatur 600°C

Gambar 4.29 merupakan kurva DSC material Ni-Ti yang di *annealing* pada temperatur 600°C, dalam kurva tersebut tidak menunjukkan adanya transformasi fasa R, baik pada pemanasan maupun pendinginan, sehingga transformasi fasa hanya terjadi dalam satu tahap, yaitu dari austenit ke martensit atau sebaliknya dari martensit ke austenit, reaksi eksotermik dan endotermik hanya memiliki satu kurva.

Berdasarkan hasil yang didapatkan pada penelitian yang dilakukan, dengan temperatur *annealing* antara 400 hingga 600°C, temperatur tersebut mempengaruhi karakteristik dari material. Temperatur 600°C, merupakan temperatur kritis, pada temperatur ini fasa R *intermediate* mulai terbentuk, namun seiring bertambahnya temperatur fasa R semakin tidak stabil, hingga pada temperatur 600°C, fasa R ini tidak terbentuk lagi, dan yang terbentuk hanyalah fasa martensit pada kedua arah kurva.

Tabel 4.12 Transformasi Temperatur Material Ni-Ti Sebelum dan Setelah di *Annealing*

<i>Annealing</i> Temperatur [°C]	R _s cool [°C]	R _f cool [°C]	M _s [°C]	M _f [°C]	A _s [°C]	A _f [°C]
as-received	37	28	-10	-64	15	45
400	40.5	31.5	-4	-61	17	45.
450	37	28.8	-5.5	-62	16.5	44.5
500	25.5	19	-15	-44	22.5	34
550	16.5	9.4	-14	-25	23	34.2
600	-	-	12.8	5.2	32	43

Keterangan:

a – starting temperature of M→R transformation,

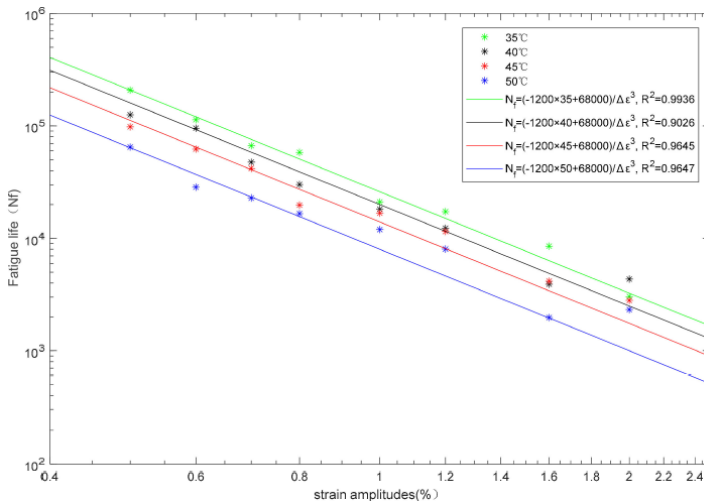
b – final temperature of R→A transformation

Dari Tabel 4.12 di atas pada material yang tidak mengalami proses *annealing* dibandingkan dengan material yang mengalami proses *annealing* pada temperatur 400 dan 450°C, fasa R yang terbentuk cenderung menurun pada temperatur tersebut, begitu pula pada temperatur martensit yang terbentuk, namun tidak terlalu signifikan, karena bentuk kurva yang saling bersilangan dan bentuknya yang melebar dan datar. Sedangkan, pada temperatur *annealing* 500 dan 550°C, terjadi perubahan yang cukup signifikan yaitu pada bagian fasa R yang terbentuk, mengalami pengurangan (fasa R terbentuk pada saat temperatur rendah, sehingga semakin meningkatnya temperatur, maka fasa R yang terbentuk semakin sedikit), karena temperatur martensit semakin naik, puncaknya pada saat temperatur *annealing* 600°C.

Sehingga dari penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa perlakuan panas utamanya disini adalah *annealing*, akan mempengaruhi transformasi fasa dan fasa yang terbentuk oleh material, terlepas dari bagaimana proses pembuatan material tersebut sebelumnya. Pada *range* temperatur 400 hingga 600°C. Pada temperatur *annealing* yang tidak melebihi temperatur

450°C, transformasi fasa yang terjadi secara dua tahap yaitu austenit ke fasa R ke martensit dan sebaliknya, yaitu martensit ke fasa R ke austenit. Sedangkan ketika material di *annealing* di atas 450°C, fasa R yang terbentuk semakin berkurang seiring dengan semakin tingginya temperatur *annealing* yang digunakan, hingga puncaknya pada temperatur 600°C, transformasi fasa yang terjadi hanya satu tahap, yaitu martensit ke austenit dan sebaliknya.

Penelitian yang dilakukan oleh Caikui Lin, dkk pada tahun 2020, mengenai pengaruh temperatur terhadap material *shape memory alloy* pada beban *fatigue*. Pada penelitian tersebut menggunakan material *shape memory alloy* dengan komposisi paduan 55.98 Ni – 44.02 Ti, material tersebut memiliki temperatur transformasi sebagai berikut; Ms: 25.62°C; Mf: 6.90°C; As: 19.33°C; Af: 32.60°C. Kemudian material SMA tersebut lakukan pengujian menggunakan alat *Dynamic Mechanical Analyser* (DMA + 1000), dengan variabel amplitudo regangan 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.7%, 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.6%, dan 2.0%, yang berada pada temperatur pengujian T = 35°C, 40°C, 45°C, 50°C. Hasil pengujian *fatigue* material *shape memory alloy* dilihat pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30 Hasil Pengujian *Fatigue* Material SMA

Tabel 4.13 Tabel Hasil Pengujian *Fatigue* Material SMA

Strain Amplitude Temperature	0.4%	0.5%	0.6%	0.7%	0.8%	1.0%	1.2%	1.6%	2.0%
35°C	>2 x 10 ⁶	208,411	113,607	66,718	58,198	21,082	17,302	8517	3031
40°C	>2 x 10 ⁶	125,602	95,376	47,512	30,101	18,191	12,334	3901	4339
45°C	>2 x 10 ⁶	98,145	62,256	41,908	19,787	16,758	11,524	4155	2806
50°C	126,356	64,904	28,501	22,878	16,586	11,999	8041	1969	2320

Dari hasil pengujian yang ada pada Gambar 4.30 dan Tabel 4.13 menunjukkan semakin tinggi temperatur dan amplitudo regangan yang diberikan kepada material *shape memory alloy* maka akan semakin cepat pula material ini mengalami *fatigue* atau semakin pendek pula *lifetime* yang dimiliki *material shape memory alloy*, karena temperatur semakin tinggi menyebabkan inisiasi dan perluasan retak semakin cepat meningkat.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Perlakuan Panas Paduan Cu-Zn-Al

Pada *Shape Memory Alloy* paduan Cu-Zn-Al, proses perlakuan panas yang dilakukan yaitu *homogenizing*, *annealing*, *solution treatment* dan *aging*. *Homogenizing* dimaksudkan untuk membentuk struktur mikro yang lebih homogen sehingga ikut memperbaiki sifat mekanik material, seperti keuletan, kekerasan dan ketangguhan. Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya *homogenizing* dilakukan pada temperatur 800-850°C, namun kebanyakan pada temperatur 850°C selama 2 jam umumnya dilakukan oleh material yang akan mengalami proses *machining* lebih lanjut. *Annealing* dilakukannya untuk kekerasan benda kerja, kemudian untuk mengurangi tegangan internal material, meningkatkan keuletan, serta untuk memperbaiki ukuran butir. Temperatur yang digunakan pada proses *annealing* berada pada *range* temperatur rekristalisasi, pada penelitian sebelumnya digunakan *range* antara 500-550°C. Proses *solution treatment* dilakukan untuk membentuk material menjadi satu fasa yang sama, dan mencegah terbentuknya fasa baru. Temperatur *solution*

treatment yang digunakan berada di atas solvus, pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya temperatur yang digunakan berada pada *range* 820-850°C dengan waktu tahan 5 – 60 menit, dan menggunakan media pendingin udara, oli, air, *brine*, ataupun *dry ice*. *Aging* merupakan proses penahanan material pada suatu temperatur dan waktu tertentu. Temperatur yang digunakan biasanya berkisar 100 - 200°C, waktu yang digunakan mulai dari 1 - 8 jam. (ASM Handbook Vol. 4)

Pada review kali ini didapatkan bahwa, proses perlakuan panas baik *homogenizing*, *annealing*, *solution treatment* dan *aging* akan merubah struktur mikro yang ada pada material *shape memory alloy*. Namun, pada struktur mikro yang diharapkan ada pada *shape memory alloy* adalah fasa α , fasa β dan β' atau martensit. Untuk menghasilkan fasa tersebut, perlakuan panas *homogenizing* dan *annealing* sebetulnya tidak perlu dilakukan karena kedua perlakuan panas tersebut hanya berfungsi untuk meningkatkan kekuatan mekanik material sebelum dan sesudah proses machining. (ASM Handbook Vol. 4)

Perlakuan panas yang perlu dilakukan adalah *solution treatment*, karena pada proses ini yang bertujuan untuk membentuk satu fasa yang sama, yaitu fasa martensit. Dari penelitian yang telah dilakukan temperatur *solution treatment* yang efektif digunakan untuk membentuk fasa martensit adalah antara 820-870°C, dengan waktu antara 10-20 menit, dengan media pendingin *brine*. (Vanja Asanovic, 2007)

Kemudian, *aging* yang dilakukan pada material *shape memory alloy* akan mempengaruhi juga struktur mikro yang terbentuk, semakin tinggi dan semakin lama waktu *aging* akan meningkatkan pertumbuhan fasa α dan mengurangi fasa martensit yang ada, sehingga jika material *shape memory alloy* akan digunakan dalam temperatur kerja tertentu/mengalami *aging*, temperatur tersebut harus berada dibawah austenit start agar tidak merubah fasa martensit menjadi austenit. (C.Y. Chung a, 1997)

4.2.2 Perlakuan Panas Paduan Cu-Al-Ni

Pada *Shape Memory Alloy* paduan Cu-Al-Ni, dilakukan perlakuan panas *solution treatment*, *aging* dan *tempering*. Proses *solution treatment* dilakukan untuk membentuk material menjadi satu fasa yang sama, dan mencegah terbentuknya fasa baru. Temperatur *solution treatment* yang digunakan berada di atas solvus, pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya menggunakan *range* temperatur 850 - 900°C, dengan waktu tahan selama 30-60 menit, dan media pendingin air, air es dan *brine ice*. (J.I. P´erez-Landaz´abal, 2005).

Aging merupakan proses penahanan material pada suatu temperatur dan waktu tertentu. Temperatur yang digunakan pada saat proses perlakuan panas *aging* yaitu antara 100 - 400°C. *Tempering* biasa digunakan pada paduan aluminium *bronze* atau nikel-aluminium *bronze*, dilakukan dengan cara memanaskan material kemudian didinginkan dengan cepat. Proses *tempering* yang digunakan pada penelitian sebelumnya yaitu memanaskan material pada temperatur 150, 200, 250 dan 300°C selama 60 menit kemudian didinginkan menggunakan media pendingin air. (I. Ivanić, S, 2018)

Pada review kali ini didapatkan proses *solution treatment*, *aging* dan *tempering* mempengaruhi struktur mikro yang terbentuk, yaitu dihasilkannya fasa α , fasa β , fasa γ , dan β' (martensit). Pengaruh dari proses *solution treatment* sendiri adalah membentuk fasa tunggal yaitu β pada material *shape memory alloy* yang dihasilkan dengan di ikuti proses *quenching*, sehingga mendapatkan fasa β' (martensit), seperti penelitian yang dilakukan oleh J.I. P´erez-Landaz´abal pada tahun 2018. Pengaruh *aging* pada *shape memory alloy* Cu-Al-Ni adalah meningkatkan pertumbuhan fasa α , sehingga mengurangi fasa martensit yang ada, jadi perlakuan *aging* ini berpengaruh kurang baik pada *shape memory alloy* apabila temperatur yang digunakan tinggi dan dalam waktu yang lama. Pengaruh *tempering* pada paduan *shape memory alloy* Cu-Al-Ni yaitu meningkatkan intensitas fasa β' sehingga bentuknya semakin jelas, dan runcing.

4.2.3 Perlakuan Panas Paduan Ni-Ti

Pada *Shape Memory Alloy* paduan Ni-Ti, dilakukan perlakuan panas *annealing* dan *aging*. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh N. Unlu pada tahun 2018, temperatur yang digunakan pada perlakuan panas *aging* berkisar antara 100 - 500°C dengan waktu tahan mulai dari 30 menit hingga 48 jam. Kemudian temperatur *annealing* yang digunakan pada penelitian yang dilakukan oleh Krzysztof Kus pada tahun 2010 menggunakan temperatur yaitu antara 400 – 600°C dengan waktu tahan 30 menit.

Pada review kali ini didapatkan hasil bawah perlakuan panas yang dilakukan pada material *shape memory alloy* paduan Ni-Ti mempengaruhi struktur mikro yang dihasilkan. Perlakuan panas *aging* pada temperatur di bawah 400°C dengan waktu tahan di bawah 4 jam akan mengurangi tegangan sisa yang ada pada material, tetapi tidak banyak mempengaruhi struktur mikro yang ada, namun ketika temperatur *aging* di atas 400°C akan mempengaruhi struktur mikro dan memperbesar ukuran butir. (İskender Ozkul, 2018)

Perlakuan panas *annealing* berpengaruh pada pembentukan fasa-R, ketika *annealing* dilakukan pada temperatur di bawah 600°C maka masih akan terbentuk fasa-R, namun ketika diberikan *annealing* di atas temperatur 600°C, akan menghilangkan fasa-R sehingga transformasi fasa terjadi hanya satu tahap dari austenit ke martensit, yang akan menyebabkan meningkatnya temperatur transformasi material Ni-Ti, sehingga mempermudah terbentuknya martensit pada temperatur ruang. (Krzysztof Kus, 2010)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah:

1. Proses perlakuan panas *homogenizing*, *annealing*, *solution treatment* dan *aging* berpengaruh pada struktur mikro material *shape memory alloy*. namun, perlakuan panas yang paling berpengaruh pada pembuatan material *shape memory alloy* paduan Cu-Zn-Al dan Cu-Al-Ni adalah *solution treatment* dan *aging*. Untuk perlakuan panas *solution treatment* pada paduan Cu-Zn-Al dilakukan pada range temperatur 850-870°C, dengan waktu antara 10-20 menit, dan menggunakan media pendingin *brine*, sedangkan pada paduan Cu-Al-Ni dilakukan pada temperatur 900°C selama 1 jam, dan menggunakan media pendingin *brine*. Untuk *aging* pada paduan Cu-Zn-Al dan Cu-Al-Ni harus dilakukan dibawah temperatur austenit start (A_s). Sedangkan untuk paduan Ni-Ti perlakuan panas *annealing* dan *aging* akan berpengaruh pada perubahan struktur mikro apabila dilakukan pada temperatur di atas 400°C.
2. Proses perlakuan panas pada *shape memory alloy* mempengaruhi *shape memory effect*, karena proses perlakuan panas mempengaruhi perubahan struktur mikro pada material *shape memory alloy*. Utamanya pada fasa martensit, semakin banyak martensit yang ada, maka *shape memory effect* pada material *shape memory alloy* akan semakin baik dan apabila martensit yang ada sedikit maka *shape memory effect* juga akan berkurang.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian kali ini adalah:

1. Pengujian *shape memory effect* dilakukan pada tiap penelitian agar data yang didapatkan lebih akurat.
2. Dalam penggunaan material *shape memory alloy*, temperatur kerja harus berada dibawah austenit start, agar tidak merubah fasa martensit yang ada, sehingga mengurangi sifat efek *shape memory*.

DAFTAR PUSTAKA

- ___., 1991. **ASM Handbook Volume 4: Heat Treating**. s.l.:ASM International Handbook Committee.
- ___., 1992. **ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams**. s.l.:ASM International Handbook Committee.
- ___., 2000. **ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation Path**. s.l.:ASM International Handbook Committee.
- ___., 2004. **ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructure**. s.l.:ASM International Handbook Committee.
- ___., 2016. **ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials**. s.l.:ASM International Handbook Committee.
- A.K. Bhuniya, P. C. S. D. M. B., 2004. "On the degradation of Shape Memory effect in trace Ti-added Cu–Zn–Al alloy". **Materials Science and Engineering A** **393**, p. 125–132.
- Avner, S. H., 1974. **Introduction to Physical Metallurgy**. Singapore: McGraw-Hill Book Co..
- Caikui Lin, Z. W. X. Y., 2020. "Experimental Study on Temperature Effects on NiTi Shape Memory Alloys under Fatigue Loading". **Materials**. pp. 573.
- C.Y. Chung, C. L. S. T., 1997. "Effect of parent phase ageing on CuZnAl Shape memory alloys with Mn and Zr addition". **Materials Letters**, pp. 291-296.
- Callister, W. D., 2013. **Material Science and Engineering An Introduction 9th Edition**. New York: JohnWiley & Sons, Inc.
- Canbay, Z. K. • C. A., 2013. "Relationship between transformation temperatures and alloying elements in Cu–Al–Ni Shape memory alloys". Budapest: Akademiai Kiado.
- G. Lojen, I. A. A. K. A. K. E. U. B. K. M. B., 2005. "Microstructure of rapidly solidified Cu–Al–Ni Shape memory alloy

-
- ribbons". **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 162-163, pp. 220-229.
- Groover, M., 2010. **Fundamental Of Modern Manufacture 4th Edition**. USA: JohnWiley & Sons, Inc..
- I. Ivanic, d., 2018. "The Influence of Heat Treatment on Microstructure and Phase Transformation Temperatures of Cu-Al-Ni Shape memory alloy". **Kemija u Industriji**, pp. 111-118.
- İskender Ozkul, C. A. C., 2018. "Investigation of Thermomechanical Behaviors of the Aged Alloys Ti55.68 Ni44.32". **Journal of Science and Technology**, pp. 368 - 374.
- J.I. Perez-Landazabal, d., 2005. "Study of the stability and decomposition process of the B phase in Cu–Al–Ni Shape memory alloys". **Materials Science and Engineering**, pp. 734 -737.
- Josiah Cherian Chekotu, R. G. K. O. D. B., 2019. "Advances in Selective Laser Melting of Nitinol Shape memory alloy Part Production". **Materials**.
- Juliaptini, D., 2010. "Analisis Sifat Mekanik Dan Metalografi Baja Karbon Rendah Untuk Aplikasi Tabung Gas 3 Kg". Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Kaufmann, E., 2003. **Characterization Of Materials: Volumes 1 and 2**. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Krzysztof Kus, T. B., 2010. "DSC-Investigation of the Effect of Annealing Temperature on the Phase Transformation Behavior in Ni-Ti Shape memory alloy". **Materials Physics and Mechanics 9**, pp. 75-83.
- Kumar, P. d. D. L., 2008. "**Shape memory alloys**": **Modeling and Engineering Applications**. Springer: US.
- Lexcellent, C., 2013. **Shape memory alloys Handbook**. London: ISTE Ltd.
- N. Unlu, I. O. C. A. C., 2018. "Thermal and Structural Analyses in Ni-Ti Shape memory alloys". Elazig: AIP Publishing.
-

-
- Carlos Augusto, C.H, 2010. "Thermoelastic Properties on Cu-Zn-Al Shape Memory Springs". **Materials Research**, pp. 219-223.
- Purwanto, E. R., 2016. **Perlakuan Bahan Praktikum (Edisi Perdana)**. Malang: Politeknik Negeri Malang..
- R. Zengin, N. Kayal. 2010. "Structural and Morphological Investigations on Shape Memory CuZnAl Alloys". **ACTA PHYSICA POLONICA A**. Volume 118.
- Singh, R., 2006. "Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology".. New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers.
- Taufiq, d., 2010. "Studi Pengaruh Temperatur Aging dan Orientasi Butiran Terhadap Sifat Mekanik Paduan Al 2014". pp. JTM XVII 3: 161-170..
- Vanja Asanovic', d., 2007. "A study of transformations of b-phase in Cu-Zn-Al Shape Memory Alloy". **Scripta Materialia**. pp. 599-601.
- Ying Chen, X. Z. D. C. D. a. C. A. S., 2009. "Shape Memory and superelasticity in polycrystalline Cu-Al-Ni microwires". **Applied Physics Letters**, Volume 95, p. 171906-171903.
- Yoshiyuki Nakata, T. T. K. S. 1985. "Thermal Cycling Effects in a Cu-Al-Ni Shape Memory Alloy". **Transactions of the Japan Institute of Metals**, Volume 26, pp. 646 to 652.
-

(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 dan adik penulis yang selalu mendoakan, memberikan motivasi dan semangat selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Aditya Eka Kurniawan selaku *partner* Tugas Akhir penulis yang berjuang bersama dalam suka-suka penelitian ini.
3. Sakinah Mirfa Solehuddin Putri, supporting system, yang selalu mensupport penulis dalam keadaan apapun baik susah maupun senang, yang selalu memberi motivasi penulis untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir ini, yang selalu mendoakan untuk kesuksesan bersama.
4. Mas Abrar dan Mas Garias selaku kakak tingkat yang selalu membantu dan membimbing penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
5. Luckyta Rizkivany, Monica Gayatri dan M.Arifani, *trio casting* yang memberikan warisan untuk melanjutkan penelitian ini, serta memberi semangat untuk segera menyelesaikannya.
6. *Crazy Rich Ranted*, yang selalu memberikan tempat bernaung, support dan semangat, untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini, semoga sukses untuk kalian semua.
7. Lab-Lab yang ada di Teknik Material dan Metalurgi yang telah memberikan tempat untuk penulis mengerjakan Tugas Akhir.
8. Keluarga besar MT18 yang tidak henti-hentinya memberikan semangat dan hiburan kepada penulis serta menjadi tempat kembali dan rumah yang nyaman untuk penulis.

9. Lina dan Sarah selaku *partner* Kewirausahaan BEM FTI 18/19 yang telah memberikan pengalaman serta cerita suka duka dalam kehidupan berorganisasi.
10. Kabinet Interaksi yang telah mewarnai kehidupan kampus penulis dengan perjuangan dalam kehidupan berorganisasi di fakultas.
11. Keluarga besar BEM FTI 17/18, 18/19 yang menjadi tempat untuk berkembang di kampus serta memberikan pengalaman dan pembelajaran.
12. KURCACI dan KERASAKTI yang selalu menemani, memberikan warna, dan memberikan banyak pengalaman selama tahun kedua dan ketiga berkuliah.
13. Salsabilla Kirana Safira, sahabat penulis yang selalu ada ketika penulis berkeluh kesah, yang selalu memberi semangat dan motivasi untuk kehidupan penulis.
14. Pemuda Muhammadiyah yang mengisi kegiatan penulis, menerima dan menghibur dikala suntuk saat berada di Jogja.
15. Sobat Senja yang mensupport dan menemani dikala mengerjakan TA saat berada di Jogja.
16. MT16, MT17, MT19, MT20 yang banyak memberikan pengalaman, pembelajaran, dan kenangan yang berharga selama penulis berkuliah.
17. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.
18. Dan terakhir terima kasih kepada, diri saya sendiri yang telah kuat menjalani segala perhelatan Tugas Akhir ini.
Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semua yang membutuhkan.

Surabaya, 15 Juli 2020
Penulis

Muhandis Haras Ali Mohamad

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di 8 April 1998 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh Pendidikan formal dimulai dari SD Muhammadiyah Kauman Yogyakarta tahun 2004 – 2010. Dilanjutkan di SMP Negeri 6 Yogyakarta tahun 2010 – 2013. Kemudian dilanjutkan di SMA Muhammadiyah 1 Yogyakarta pada tahun 2013 – 2016. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan Pendidikan S-1 di Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama berkuliah di Departemen Teknik Material, penulis pernah mengikuti kegiatan pelatihan LKMM Pra TD, LKMW TD, BMS, LKMM TD, LOT 1 BEM FTI, LOT 2 BEM FTI dan PP LKMW. Penulis juga aktif dalam kegiatan berorganisasi di Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM FTI-ITS) sebagai staff pada kepengurusan 2017/2018 dan sebagai Kepala Departemen Kewirausahaan pada kepengurusan 2018/2019. Selain aktif di organisasi tingkat fakultas, penulis juga mengikuti kegiatan Universitas sebagai Pemandu LKMW TD-ITS. Dalam bidang akademik penulis memiliki pengalaman kerja praktik di PT. Astra Honda Motor pada bulan Juli – Agustus 2019, pada saat kerja praktik penulis mendapatkan tema “Analisa Proses dan Kegagalan Pembuatan Komponen Mesin Dengan Metode *Low Pressure Die Casting* dan *High Pressure Die Casting*”. Penulis juga tercatat sebagai Grader Teknologi Pengecoran pada tahun 2019. Untuk menyelesaikan Pendidikan S1, penulis melakukan penelitian dalam bidang studi Metalurgi Manufaktur (Pengecoran dan Perlakuan Panas) dengan tugas akhir berjudul “Review Pengaruh Proses Perlakuan Panas Pada *Shape Memory Alloy* Terhadap Efek *Shape Memory* dan Struktur Mikro” Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: handisharas3@gmail.com, No. HP : 087765806233.