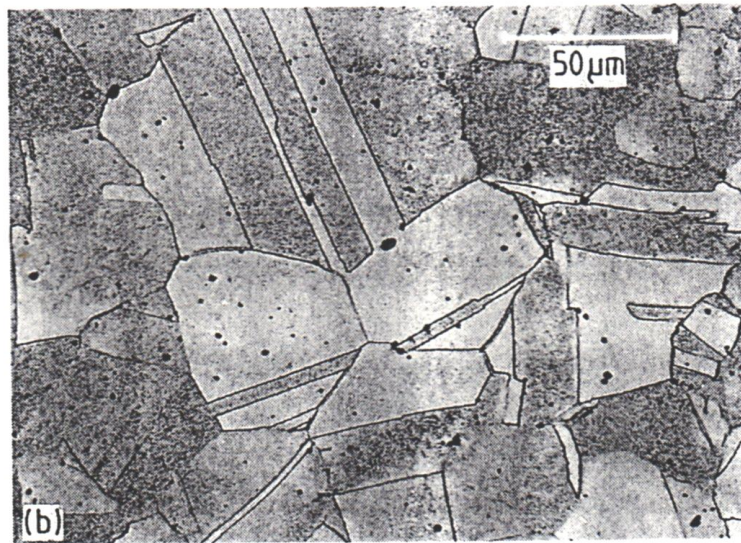


BAB II

KAJIAN TEORI

A. Tembaga

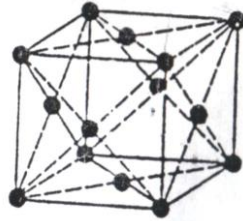
Tembaga ditemukan dalam bentuk bijih tembaga yang masih bersenyawa dengan zat asam, asam belerang atau bersenyawa dengan kedua zat tadi. Dalam dunia industri sebagian besar penggunaan tembaga yang dipakai dalam bentuk kawat atau sebagai penghantar panas yang baik².



Gambar 1. Struktur mikro dari tembaga, *soft-annealed*, α -grains with copper oxide (round inclusions).³

² Surdia, Tata dan Saito, Shinroku, *Pengetahuan Bahan Teknik* (Jakarta:PT. Pradnya Paramita,1999), hal.121

³ R.W.Chan, P. Haasen, E.J.Kramer, *Structure and Properties of Nonferrous Alloys Volume 8* (USA: Material Science And Technologi, 1992), hal. 300.



Gambar 2. Struktur kristal dari tembaga (*face center cubic-fcc*)

Tabel 1. Sifat-sifat dari tembaga⁴

<i>Physical properties</i>	
fasa	solid
Massa jenis (near r.t.)	8.90-8.96 g·cm ⁻³
Liquid density at m.p.	8.02 g·cm ⁻³
titik lebur	1083 °C
Titik didih	2562 °C
<i>Linear thermal expansion</i>	(16.8 – 17.2) 10 ⁻⁶ /K
<i>Electrical conductivity</i>	35 -58 m/(Ω mm ²)
<i>Thermal conductivity</i>	240 – 386 W/(m K)
<i>Specific heat capacity</i>	0.38 – 0.45 J/ (g K)
<i>Electrical resistivity</i>	0.03 – 0.017 Ω mm ² /m
<i>Mechanical properties</i>	
<i>Bulk modulus</i>	140 GPa
<i>Shear modulus</i>	48 Gpa
<i>Yield strength</i>	100 – 250 N/mm ²
<i>Tensile strength</i>	200 – 360 N/mm ²
<i>Brinell hardness</i>	55 – 110 kp/mm ²
<i>Modulus of elasticity</i>	100 – 130 kN/mm ²
<i>Atomic properties</i>	
struktur kristal	<i>Face Centered Cubic</i> (FCC)
<i>Oxidation states</i>	2, 1 (mildly basic oxide)
energi pengionisasian(more)	1 st : 745.5 Kj·mol ⁻¹
	2 nd : 1957.9 Kj·mol ⁻¹
	3 rd : 3555 Kj·mol ⁻¹
jari-jari atom	135 pm
<i>Atomic radius</i> (calc.)	145 pm
Jari-jari kovalen	138 pm
Jari –jari Van der Waalss	140 pm

⁴ *Ibid* ,hal 282.

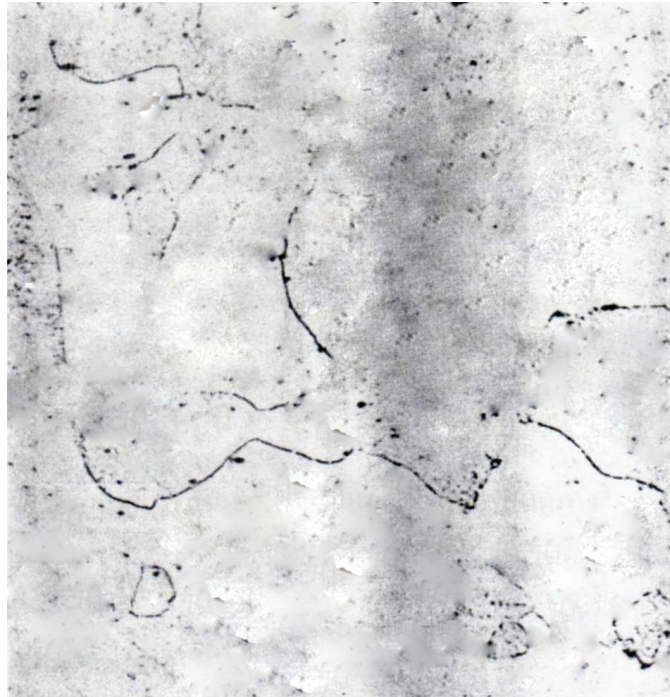
Tembaga mempunyai daya hantar listrik yang tinggi dan daya hantar panasnya juga tinggi. Dari Tabel 1 hal. 7, tembaga memiliki konduktifitas panas $240 - 386 \text{ W/(m K)}$ dan *Specific heat capacity* $0.38 - 0.45 \text{ J/ (g K)}$, konduktivitas listrik $35 - 58 \text{ m/}(\Omega \text{ mm}^2)$.

Tembaga mempunyai sifat dapat dirol, ditarik, ditekan, dan dapat ditempa (*meleable*). Dari Tabel 1 hal. 7, menunjukkan titik cair tembaga adalah 1083°C , titik didihnya 2593°C , kekuatan tariknya $200\text{-}360 \text{ N/mm}^2$ dan massa jenis $8.90\text{-}8.96 \text{ g/cm}^3$, dan juga dari Tabel 1 hal. 7 struktur kristal dari tembaga adalah *Face Centered Cubic* (FCC) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 hal 7. Jika dilihat dari Gambar struktur mikro dari tembaga terdapat bidang kembaran yang disebabkan oleh *Stacking Fault Energy* (SFE) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 hal. 6.

B. Aluminium

Alumunium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy dalam tahun 1809 sebagai unsur dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H.C.Oersted tahun 1825. Secara industri tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C. M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah memperoleh logam alumunium dari alumina dengan cara elektrolisa. Sampai sekarang proses Heroult Hall masih dipakai untuk memproduksi alumunium⁵.

⁵ Surdia, Tata dan Saito, Shinroku, *op.cit.*, hal. 129.



Gambar 3. Struktur mikro dari aluminium. Pengerjaan dingin dan *annealed*. Perbersaran 500x.⁶

Aluminium (Al) didapat dengan elektrolisa, umumnya mencapai kemurnian 99,85% berat. Dengan mengelektrolisa kembali dapat dicapai kemurnian 99,99% berat. Jika dibandingkan antara Tabel 1 hal. 7 dan Tabel 2 hal. 10, hantaran listrik Al nsu-kira 65% dari hantaran listrik tembaga. Aluminium adalah logam yang ringan (berat jenis 1/3 dari berat jenis tembaga), dan tahanan jenis aluminium $1\frac{1}{4}$ X tahanan jenis tembaga. Dari Tabel 2 hal. 10 bahwa aluminium memiliki struktur kristal yang sama dengan tembaga yaitu *Face Centered Cubic* (FCC) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 hal. 8, yang membedakan stuktur kristal pada tembaga dan aluminium yaitu jari-jari atom tembaga 135 pm seperti yang ditunjukkan pada

⁶ J.R. Davis. *Aluminum and Aluminum Alloys*. (USA: ASM Speciality Handbook, 1996), hal. 495.

Tabel 1 hal. 7 dan jari-jari atom aluminium yaitu 125 pm seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Struktur mikro pada aluminium yang ditunjukkan pada Gambar 3 hal 9, hanya terlihat berwarna putih dan batas butir yang terlihat pada Gambar 3 hal 9 tidak jelas atau hampir tidak terlihat.

Tabel 2. Sifat-sifat Alumunium⁷

Sifat-sifat fisik	Kemurnian Al %			
	99,996		>99,0	
Massa jenis (20 ⁰)	2,6989		2,71	
Titik cair	660,2		653-657	
Panas jenis (cal/g. ⁰ C)(100 ⁰ C)	0,2226		0,2297	
Hantaran listrik (%)	6,9		59 (dianil)	
Tahanan listrik koefisien temperature (⁰ C)	0,0029		0,0115	
Koefisien pemuaian (20-100 ⁰ C)	23,86 x 10 ⁻⁶		23,5 x 10 ⁻⁶	
Jenis kristal, konstanta kisi	fcc, a=4,013Kx		fcc,a=4,04Kx	
Sifat-sifat mekanik	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm ²)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekautan mulur (0,2%)(kg/mm ²)	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44
Sifat – sifat atom				
Tenaga pengionan	1 st : 577.5 Kj·mol ⁻¹			
	2 nd : 1816.7 Kj·mol ⁻¹			
	3 rd : 2744.8 Kj·mol ⁻¹			
Jari-jari atom	125 pm			
Jari-Jari kovalen	118 pm			

C. Seng (*zinc*)

Seng ditemukan di Greek dan Romawi sebagai unsur dari paduan logam kuningan (Cu-Zn). Pemurnian diperoleh secara elektrolisa dari bahan oksida seng (ZnO). Hasil pemurnian mencapai kadar 97,75% Zn.⁸

⁷ Surdia, Tata dan Saito, Shinroku, *op.cit*, hal. 134

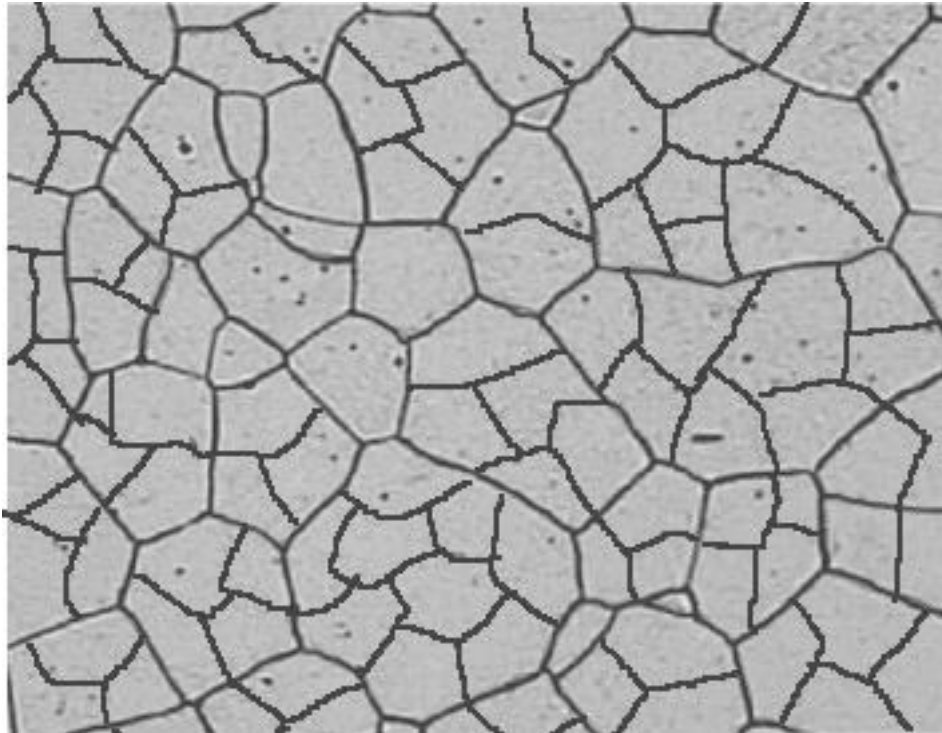
⁸ Sumanto, *Pengetahuan Bahan untuk Mesin dan Listrik*. (Yogyakarta: Andi Offset, 1996).hal.41.

Seng dipakai sebagai pelindung dari karat, karena lebih tahan terhadap karat dari pada besi. Dalam teknik listrik seng banyak dipakai untuk bahan selongsong elemen kering (kutub negatifnya), batang-batang (elektroda) elemen galvani. Seng mempunyai titik lebur 419.58°C dan titik uapnya 906°C , dan struktur kristal dari seng adalah *hexagonal close packed* (hcp) memiliki jari-jari atom 30 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 hal. 12. Struktur mikro dari seng seperti pada Gambar 4 hal. 12 memiliki bentuk butir yang kecil dan warna yang keabu-abuan.

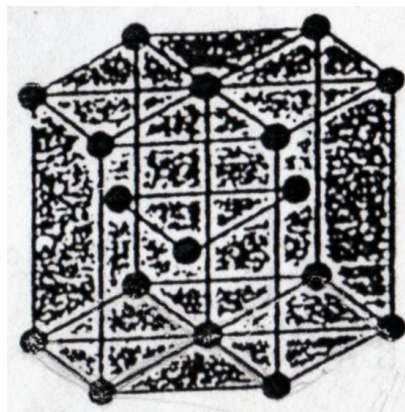
Tabel 3. Sifat sifat dari seng⁹

Sifat-sifat atom	
Jari-jari atom	30
Jari jari atom – Goldschmidt (nm)	0.137
Berat atom (amu)	65.38
Struktur kristal	<i>Hexagonal close packed</i> (HCP)
Struktur elektron	Ar $3d^{10} 4s^2$
<i>Valences shown</i>	2
Sifat mekanik	
<i>Material condition</i>	Polycrystalline
<i>Bulk modulus</i> (GPa)	69.4
<i>Hardness - Mohs</i>	2.5
Modulus elastisitas pada 20°C	70 – 140 GPa
<i>Tensile modulus</i> (GPa)	104.5
Sifat fisik	
Titik didih ($^{\circ}\text{C}$)	906
Massa jenis @ 25°C (g cm-3)	7.133
Titik cair ($^{\circ}\text{C}$)	419.58
<i>Volume contraction on solidification</i>	4.7%
<i>Mean specific heat</i> ($100\text{-}200^{\circ}\text{C}$)	$0.417 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
<i>Thermal conductivity at 25°C</i>	$113 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

⁹ R.W.Chan, P. Haasen, E.J.Kramer *op.cit.* hal.94



Gambar 4. Struktur mikro Zn. Pembesaran 200x, etsa $\text{CrO}_3, \text{Na}_2\text{SO}_4$.¹⁰



Gambar 5. Struktur kristal Zn (*hcp-hexagonal close packed*)

D. *Shape Memory Alloys* (SMA)

Paduan ingat bentuk (*Shape memory alloys*) merupakan paduan logam dengan kemampuan untuk melakukan perubahan dari satu struktur

¹⁰ *Ibid.* p.107

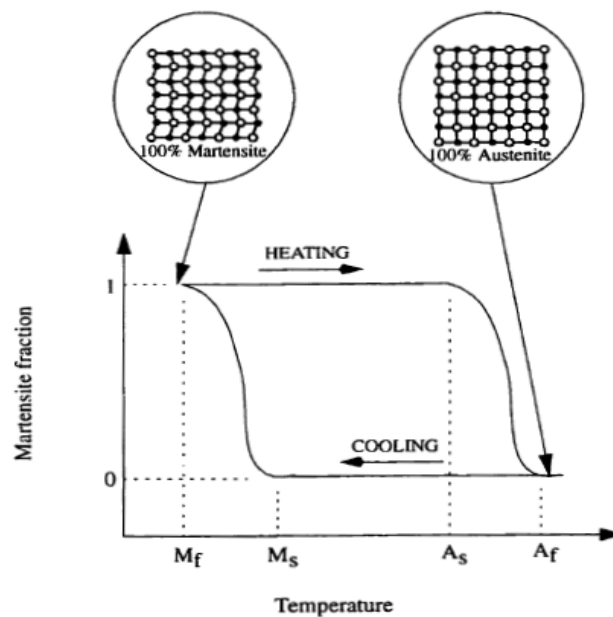
kristalografi ke struktur yang lain melalui suatu perubahan dalam temperatur atau tekanan yang digunakan¹¹. Pada fasa austenit dikenal juga dengan beta (β) atau fasa induk dari paduan logam. Temperatur perubahan dari satu fasa kepada fasa yang lainnya, dikenal sebagai temperatur perubahan bentuk (*transformation temperatur*). Sifat SMA tersebut adalah efek ingat bentuk (*shape memory effect-SME*) dan superelastisitas (atau *pseudoelasticity*).

Keunikan dari *Shape Memory Alloys* yaitu perubahan dari satu struktur kristal ke bentuk yang lainnya melalui transformasi yang terjadi tanpa proses difusi (*transformation diffusionless*). Bentuk dari struktur kristal tersebut adalah struktur kristal BCC dari fasa austenit pada temperatur tinggi atau tekanan rendah dan struktur kristal HCP dari fasa martensit pada temperatur rendah atau tekanan tinggi. Pada paduan ingat bentuk mempunyai empat temperatur ketika fasa mulai terbentuk dan berakhir. Ini dikenal dengan transformasi temperatur. Transformasi temperatur ini adalah *Martensite Finish* (M_f), *Martensite Start* (M_s), *Austenite Finish* (A_f), dan *Austenite Start* (A_s), ($M_f < M_s < A_f < A_s$). Aliran fasa dari paduan logam ditentukan oleh temperatur dari paduan logam. Perubahan temperatur tergantung dari komposisi paduan logam.

Jika suatu spesimen paduan logam SMA dipanaskan di atas temperatur A_f , sepenuhnya paduan logam dalam fasa austenit. Ketika pendinginan di bawah temperatur M_s dari paduan logam, austenit secara berangsur-angsur mulai mengubah bentuk ke dalam martensit. Perubahan bentuk berakhir

¹¹ Ameendraraj Subramaniam, *loc.cit.*.

setelah pendinginan di bawah temperatur M_f . Sampai pendinginan terjadi di bawah M_f , beberapa bagian dari austenit akan tinggal sebagai contoh akan ditunjukkan pada Gambar 6. Perubahan bentuk dari austenit ke martensit dikenal sebagai perubahan bentuk maju.

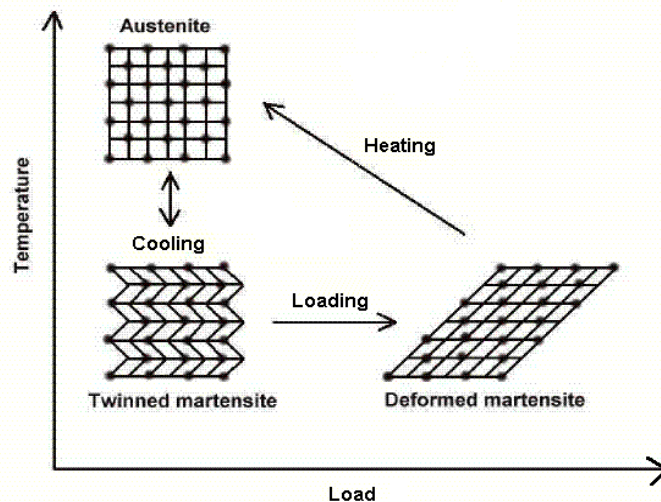


Gambar 6. Kurva transformasi dari paduan ingat bentuk.¹²

Jika paduan logam di dalam fasa martensit dipanaskan di bawah temperatur M_f , martensit mulai mengubah bentuk ke dalam austenit pada temperatur A_s . Perubahan bentuk akan berakhir ketika paduan logam dipanaskan pada suatu temperatur di atas temperatur A_f . Perubahan bentuk dari martensit ke austenit dikenal sebagai perubahan bentuk kebalikan (*reverse transformation*). Sepanjang proses pemanasan, pada suatu temperatur diantara A_s dan A_f , beberapa bagian dari martensit ditahan di dalam spesimen.

¹² *Ibid*, p. 16.

Efek ingat bentuk (*shape memory effect*) diamati ketika temperatur pada sebuah paduan didinginkan di bawah temperatur M_f (*martensit finish*). Pada bagian ini sepenuhnya paduan logam dalam fasa martensit sehingga mudah untuk dibentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Setelah SMA dibengkokkan akan kembali pada bentuknya semula seperti sebelum dibengkokkan dengan cara memanaskan di atas temperatur A_f (*austenite finish*). Panas yang diberikan akan menjadi tenaga pendorong penyusunan kembali atom-atom dari paduan logam, tetapi paduan logam tetap padat. Fasa martensit yang telah terdeformasi kini berubah menjadi fasa austenit, yang mana sudah dalam bentuk aslinya.¹³



Gambar 7. Diagram mikroskopik dari efek ingat bentuk.¹⁴

E. *Shape Memory Alloys Cu-Zn-Al*

Paduan Cu-Zn-Al adalah SMA yang menarik untuk aplikasi rancang bangun jika dibandingkan dengan paduan SMA lain. Dari Tabel dapat dilihat

¹³ www.us.ualberta.ca/~database/MEMS/sma-mems/shape_memory_effect.html (26 Desember 2007)

¹⁴ Oulu University - <http://herkules.oulu.fi/isbn9514252217/html/x317.html> (29 Desember 2007)

sifat dari paduan Cu-Zn-Al, walaupun paduan ini memiliki sifat kekuatan dan sifat kelelahan yang kurang dari SMA yang lain tapi paduan ini mudah dalam proses pemesinan dan murah dalam hal biaya jika dibandingkan dari semua SMA.

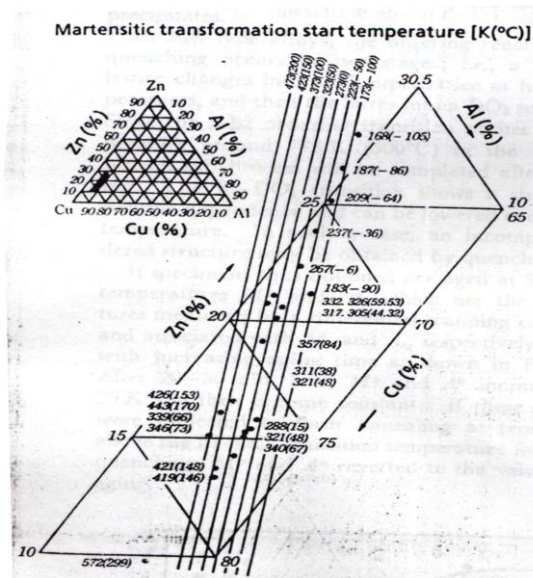
Tabel.4. Sifat-sifat dari SMA Cu-Zn-Al¹⁵

Sifat ingat bentuk (<i>shape memory properties</i>)	
<i>One-way strain (%)</i>	7.64
<i>Two-way strain (%)</i>	8.5 - 9.7
<i>Hysteresis (°K)</i>	10 - 25
<i>Melting temperature (°C)</i>	950 - 1020
Sifat mekanik	
<i>Young's modulus (GPa)</i>	
<i>β- phase</i>	72
<i>Martensite</i>	70
<i>Anisotrope ratio</i>	15
<i>Yield strength (MPa)</i>	
<i>Austenite</i>	350
<i>Martensite</i>	80
<i>Ultimate tensile strength (MPa)</i>	600
Sifat fisik	
<i>Density (gr/cm³)</i>	7.64
<i>Resistivity (μΩ.cm)</i>	8.5 - 9.7
<i>Thermal conductivity (J/m.s.°K)</i>	120
<i>Heat capacity (J/kg.°K)</i>	400

Batas komposisi Cu-Zn-Al yang biasa digunakan dalam paduan ingat bentuk adalah daerah yang memiliki fasa β pada temperatur tinggi, sturktur kristal dari fasa β adalah *Body Centered Cubic* (BCC). Diagram fasa dan transformasi martensit dari paduan Cu-Zn-Al, umumnya sama dengan sistem biner Cu-Zn. Dengan adanya penambahan unsur Al pada paduan Cu-Zn, daerah fasa β sebagian besar bergeser pada konsentrasi Zn yang rendah. Dari

¹⁵ T.W.Duerig, K.N. Melton, D. Stockel, C.M. Wayman, *Enginering Aspects of Shape Memory Alloys* (London: Butterwort-Heinemann.1990). hal.83.

Tabel 4 hal. 16 bahwa temperatur lebur dari paduan Cu-Zn-Al sekitar 950°C dan massa jenisnya 7,64 g/cm³. Transformasi temperatur pada paduan ingat bentuk adalah sangat tergantung pada komposisinya. Perubahan sedikit di dalam komposisinya akan mengakibatkan perubahan besar di dalam transformasi temperatur paduan Cu-Zn-Al. Gambar 8, menunjukkan temperatur M_s sebagai fungsi dari komposisi paduan ingat bentuk Cu-Zn-Al. Keuntungan yang didapat pada transformasi temperatur dengan mengubah komposisi dari material yaitu untuk mencapai fasa yang diinginkan pada temperatur aplikasi. Fasa yang berbeda memiliki sifat yang berbeda juga. Sebagai contoh, secara umum, Di dalam paduan ingat bentuk fasa martensit adalah lebih lunak dibandingkan fasa austenit.



Gambar 8. Hubungan antara komposisi kimia dan M_s pada Cu-Zn-Al¹⁶

¹⁶ Shuici Miyazaki dan Kazuhiro Otsuka, "Development of Shape Memory Alloys", ISIJ International, Vol.29 (No.5), Institute of Material Science, University of Tsukuba, Japan, 1989. hal.16

F. Proses perlakuan panas paduan Cu-Zn-Al

Proses perlakuan panas pada paduan Cu-Zn-Al yaitu paduan yang sebelumnya terdiri atas fasa α dan fasa β . Fasa α dengan sel satuan *face centered cubic* (fcc) sifatnya yaitu lunak dan memiliki kekerasan yang rendah sedangkan fasa β dengan sel satuan *body centered cubic* (bcc) memiliki kekerasan yang tinggi tapi getas. kemudian dipanaskan agar spesimen seluruhnya dalam fasa β dengan sel satuan bcc.

Untuk meningkatkan sifat material terutama kekerasan dengan cara mencelup cepat (*quenching*), spesimen yang sudah dipanaskan ke dalam suatu media *quenching* bisa dengan air, oli, dll. Karena pada proses *quenching* pendinginan yang terjadi berlangsung cepat, sehingga atom dari fasa β tak sempat berdifusi akhirnya membentuk fasa martensit dengan struktur kristal *hexagonal closed packed* (hcp) dan fasa β dengan struktur kristal bcc. Sifat dari fasa martensit adalah keras dibandingkan fasa β . Transformasi fasa dari fasa β ke fasa martensit ini terjadi akibat adanya atom yang terjebak dan tidak sempat berdifusi, maka pada proses *quenching* terjadi transformasi dari fasa β menjadi fasa martensit. Pembentukan martensit didasari pada proses pergeseran atom yang melibatkan penyusutan dari struktur kristal.

Transformasi dari fasa austenit ke fasa martensit biasanya dihubungkan sebagai transformasi yang tidak membutuhkan panas (*athermal transformation*). Temperatur yang mengawali transformasi tersebut dinamakan temperatur M_s (*martensite start*) dan selanjutnya

transformasi tersebut lengkap sampai M_f (*martensite finish*) yang biasanya sedikit di bawah temperatur kamar. Martensit start tergantung pada laju pendinginan.

Pada proses penuaan (*aging*), spesimen paduan Cu-Zn-Al dipanaskan di atas temperatur M_s paduan Cu-Zn-Al, hal ini dilakukan agar menghasilkan martensit termo-elastis dan terjadi dari temperatur tinggi yaitu fasa β . Termo-elastis merupakan istilah yang diberikan terhadap kesetimbangan antara pengaruh termal dan elastis. Setelah kesetimbangan tercapai, jika spesimen dipanaskan atau didinginkan atau diberi gaya luar maka kesetimbangan termal ini akan terganggu dan kesetimbangan kristal dari fasa martensit akan tumbuh lagi jika paduan didinginkan atau akan menyusut jika dipanaskan. Fasa yang terjadi pada proses *aging* yaitu fasa martensit dan fasa austenit.