

PENGARUH *SOLUTION ANNEALING* DAN AGING PADA KAWAT PADUAN *SHAPE MEMORY* Ni-Ti DAN Ni-Ti-Cu

Efendi Mabru¹⁾, Bambang Sriyono¹⁾, Bintang Adjiantoro¹⁾, D.N.Adnyana²⁾

¹⁾Pusat Penelitian Metalurgi-LIPI

²⁾Balai Besar Teknologi Kekuatan dan Struktur-BPPT

Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang 15314

E-mail : efendi_lipi@yahoo.com

Masuk tanggal : 07-10-2011, revisi tanggal : 09-07-2012, diterima untuk diterbitkan tanggal : 20-07-2012

Intisari

PENGARUH *SOLUTION ANNEALING* DAN AGING PADA KAWAT PADUAN *SHAPE MEMORY* Ni-Ti DAN Ni-Ti-Cu. Penelitian pengaruh *solution annealing* dan *aging* pada paduan *shape memory* NiTi dan NiTiCu telah dilakukan. Paduan dalam bentuk kawat dibuat dengan rangkaian proses peleburan vakum, pengepresan panas, pengerolan panas, penarikan kawat dan perlakuan panas (*solution annealing* dan *aging*). Pengujian yang dilakukan meliputi uji termal DSC, uji XRD dan uji tekuk panas untuk mengukur *shape memory effect* (SME). Hasil percobaan menunjukkan bahwa kawat paduan Ni-Ti-Cu (Ni-49,7Ti-9,2Cu) memiliki SME satu arah yang lebih tinggi dibandingkan dengan kawat Ni-Ti (Ni-48,8Ti) baik pada kondisi *solution annealing* maupun *aging*. Kawat NiTi pada kondisi *solution annealing* memiliki SME dua arah yang lebih besar dari pada kawat NiTi pada kondisi *aging*. Sedangkan pada kawat NiTiCu, kondisi paduan (*solution annealing* dan *aging*) relatif tidak berpengaruh terhadap SME dua arah. Penambahan Cu di dalam paduan Ni-Ti berpengaruh lebih besar terhadap SME dua arah pada kawat dalam kondisi *aging* dibandingkan pada kawat dalam kondisi *solution annealing*.

Kata kunci : Paduan *shape memory*, Nikel-titanium, Nikel-titanium-tembaga, *Solution annealing* dan *aging*, *Shape memory effect*

Abstract

THE INFLUENCE OF *SOLUTION ANNEALING* AND AGING ON Ni-Ti AND Ni-Ti-Cu *SHAPE MEMORY ALLOY WIRE*. The influence of *solution annealing* and *aging* on NiTi and NiTiCu *shape memory alloy* has been investigated. The alloys in wire form were fabricated through vacuum arc melting, hot pressing, hot rolling, wire drawing and finally heat treating of *solution annealing* dan *aging*). The alloy wire was characterized by thermal analysis (DSC), XRD and bending-heating test to measure the *shape memory effect* (SME). The experimental results showed that the Ni-Ti-Cu wire (Ni-49.7Ti-9.2Cu) exhibited one-way SME higher than that of the Ni-Ti wire (Ni-48.8Ti) in both conditions of *solution annealed* and *aged*. The two-way SME exhibited by *solution annealed* NiTi wire was larger than that exhibited by *aged* NiTi wire. With respect to NiTiCu wire, the alloy conditions (*solution annealed* and *aged*) relatively had no effect on the two-way SME of the alloy. Finally, it was found that the effect of Cu on two-way SME was larger in the *aged* Ni-Ti alloy than in *solution annealed* Ni-Ti alloy.

Keywords : *Shape memory alloys*, Nickel-titanium, Nickel-titanium-copper, *Solution annealing* dan *aging*, *Shape memory effect*

PENDAHULUAN

Paduan *shape memory* (*shape memory alloy*/SMA) mempunyai kemampuan merekoveri regangan pada saat dipanaskan sehingga dapat kembali ke bentuk awal

sebelum deformasi. Fenomena ini merupakan hasil dari perubahan fasa kristalin yang dikenal dengan transformasi martensitik thermoelastik^[1-2]. Sifat ingat bentuk ini (*shape memory effect*/SME) dapat digunakan untuk berbagai aplikasi

seperti kopeling (penyambung) sistem perpipaan, konektor listrik dan aktuatur. Penggunaan SMA sebagai aktuatur memberikan alternatif yang menarik untuk menggantikan metoda aktuasi konvensional. Aktuatur SMA merespon perubahan suhu dengan perubahan bentuk dengan kata lain dapat merubah energi panas menjadi energi mekanik. Aktuatur SMA memberikan perubahan gerakan yang besar dengan ukuran yang relatif kecil sehingga menghasilkan output kerja yang tinggi. Paduan SMA yang paling penting dan memungkinkan untuk aplikasi di industri adalah paduan NiTi. Paduan NiTi dapat dideformasi plastis sampai lebih dari 50% regangan, memiliki SME yang stabil dan NiTi dapat merecover bentuk awal (sampai regangan 8%) pada waktu dipanaskan di atas suhu transformasi atau dapat menghasilkan tegangan restorasi yang tinggi (sampai 700 Mpa)^[3-5].

Transformasi martensitik yang penting di dalam paduan NiTi adalah $B2 \leftrightarrow B19'$ di mana fasa B2 adalah struktur kubik suhu tinggi sedangkan B19' adalah struktur monoklin suhu rendah. Struktur intermediate seringkali muncul menyertai transformasi $B2 \leftrightarrow B19'$ khususnya pada paduan terner seperti $B2 \leftrightarrow B19' \leftrightarrow B19'$ di dalam paduan Ti-Ni-Cu dan Ti-Ni-Pd^[6-8] dan $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$ di dalam paduan Ti-Ni-Fe, Ti-Ni-Al dan Ti-Ni-Co^[9-10] di mana B19 adalah struktur orthorhombic intermediate dan R adalah struktur rhombohedral intermediate.

Dewasa ini, SMA berbasis NiTi digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi seperti otomotif, robotik, peralatan rumah tangga dan medis^[11-12]. Untuk aplikasi aktuatur, lebar histeresis paduan SMA diharapkan sekecil mungkin agar aktuatur dapat memberikan respon yang cepat terhadap perubahan suhu sistem. Penambahan Cu ke dalam paduan biner NiTi akan memperkecil lebar histeresis kurva suhu-regangan, sehingga NiTiCu merupakan paduan yang cocok untuk aplikasi aktuatur. Beberapa penelitian yang dilakukan oleh penulis sudah

dipublikasikan terkait fabrikasi kawat paduan NiTi^[13] dan pengaruh rasio Ni/Ti dan unsur ke empat pada paduan NiTiCu^[14] serta karakteristik SME paduan NiTiCuFe^[15]. Pada tulisan ini dilaporkan pengaruh *solution treatment* dan *aging* pada paduan *shape memory* NiTi dan NiTiCu.

PROSEDUR PERCOBAAN

Bahan baku pembuatan ingot paduan NiTi dan NiTiCu adalah logam Ni (99,9+%) dan logam Ti (99,9%) dan Cu (99,96%) yang dibeli dari NILACO Jepang. Bahan-bahan ini dilebur di dalam tungku busur listrik vakum (*vacum arc furnace*) untuk menghasilkan *button ingot*. Kemudian *button ingot* dimasukkan ke dalam *ampoule* gelas silika dan dilakukan homogenisasi di dalam tungku *muffle* pada suhu 1000 °C selama 24 jam dan didinginkan di udara. *Button ingot* yang sudah dihomogenisasi dilakukan pengepresan panas untuk menghancurkan struktur dendrit dan menyesuaikan ukuran untuk proses pengerolan panas. Proses pengerolan panas dilakukan beberapa kali sampai menghasilkan sampel berbentuk *rod* dengan diameter 3 mm. Untuk mendapatkan bentuk kawat, pada rod yang dihasilkan dari pengerolan panas yang memiliki diameter 3 mm kemudian dilakukan proses penarikan kawat secara bertahap (*multipass drawing*). Di antara tahapan penarikan kawat, sampel dianil (*intermediate annealing*) di dalam tungku *fluidized bed* yang dialiri gas argon. Kawat yang dihasilkan dari penarikan terakhir memiliki diameter akhir 1,4 mm. Pada kawat yang dihasilkan kemudian dilakukan pemanasan *solution treatment* pada suhu 900 °C selama 30 menit dan *aging* pada suhu 400 °C selama 30 menit di dalam tungku *fluidized bed*. Kemudian pada kawat yang telah mengalami *solution treatment* dan *aging* masing-masing dilakukan karakterisasi dengan EDS (*energy dispersive spectrometer*), uji tarik dan pengujian sifat *shape memory*.

Komposisi paduan yang ditentukan dengan EDS dapat dilihat pada Tabel 1.

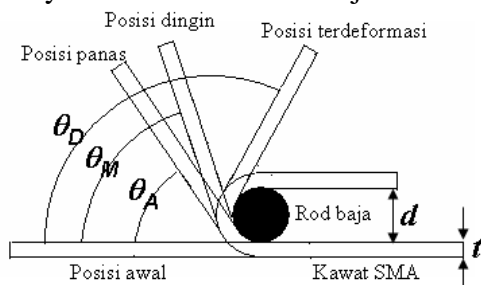
Tabel 1. Komposisi paduan Ni-Ti dan Ni-Ti-Cu yang digunakan dalam percobaan

No.	Paduan	Komposisi (% atom)		
		Ni	Ti	Cu
1.	Ni-Ti	51,2	48,8	-
2.	Ni-Ti-Cu	41,1	49,7	9,2

Evaluasi terhadap sifat *shape memory* dilakukan dengan mengukur persentasi bentuk dan regangan yang dapat dipulihkan atau direkoveri (rasio perubahan bentuk dan regangan rekoveri absolut). Pengujian dilakukan dengan metoda tekuk-panas yang terdiri dari proses penekukan kawat pada setengah lingkaran dari rod baja sehingga kawat terdeformasi plastis, proses pemanasan kawat yang terdeformasi sampai merekoveri regangan dan merestorasi bentuknya dan terakhir poses pendinginan kawat sampai suhu kamar. Pengujian tekuk-panas digambarkan secara skematis pada Gambar 1. Sudut-sudut posisi kawat pada setiap keadaan diukur yaitu sudut *spring back* θ_e (selisih antara sudut penekukan 180° dan sudut kawat dalam kondisi bengkok) dan sudut rekoveri θ_m (selisih sudut kawat bengkok sebelum dipanaskan dan sudut setelah dipanaskan). Rekoveri bentuk (r) dan regangan rekoveri absolut (ε_A) dihitung masing-masing dengan persamaan di bawah ini:

$$\varepsilon_A = r (t/d)$$

Dimana $r = \theta_m / (180 - \theta_e)$. Parameter t menyatakan diameter kawat dan d menyatakan diameter rod baja.



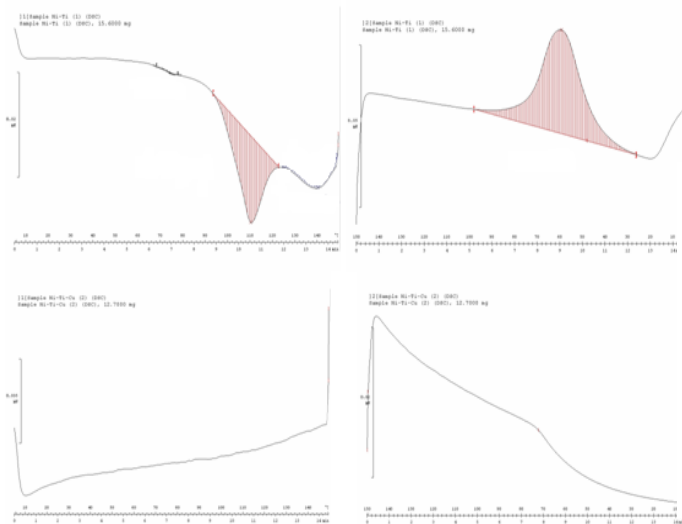
Gambar 1. Skematik pengujian tekuk-panas untuk mengevaluasi sifat *shape memory*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 menunjukkan kurva pengukuran DSC terhadap sampel kawat NiTi dan NiTiCu dalam kondisi anil (*solution treatment*). Dari kurva DSC dapat ditentukan suhu transformasi fasa dari puncak-puncak yang terjadi pada pemanasan dan pendinginan. Suhu transformasi fasa yang terukur ditampilkan pada Tabel 2. Untuk paduan NiTiCu tidak terlihat puncak yang berarti bahwa suhu transformasinya berada di luar selang suhu tersebut dan tidak dapat ditentukan dari kurva DSC pada Gambar 2. Sedangkan untuk paduan NiTi, ada dua suhu transformasi yang terukur yaitu transformasi fasa austenit (A_s dan A_f) pada pemanasan dan fasa martensit (M_s dan M_f) pada pendinginan. Suhu transformasi austenit pada paduan NiTi relatif cukup tinggi yaitu $96,3^\circ\text{C}$ untuk A_s dan $120,2^\circ\text{C}$ untuk A_f dengan selang histerisis transformasi yang cukup lebar yaitu 24°C ($A_s - A_f$). Sedangkan suhu transformasi martensit adalah $74,6^\circ\text{C}$ untuk M_s dan $42,6^\circ\text{C}$ untuk M_f dengan selang histerisis transformasi yang sedikit lebih lebar dari histerisis austenit yaitu 32°C . Suhu transformasi fasa paduan NiTi dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu kandungan Ni dan aging terutama pada paduan NiTi kaya Ni, penambahan unsur ketiga, annealing, dan siklus termal^[16].

Tabel 2. Suhu transformasi fasa yang ditentukan dari kurva DSC. Suhu transformasi untuk paduan NiTiCu tidak dapat ditentukan pada selang suhu pengujian DSC yang dilakukan

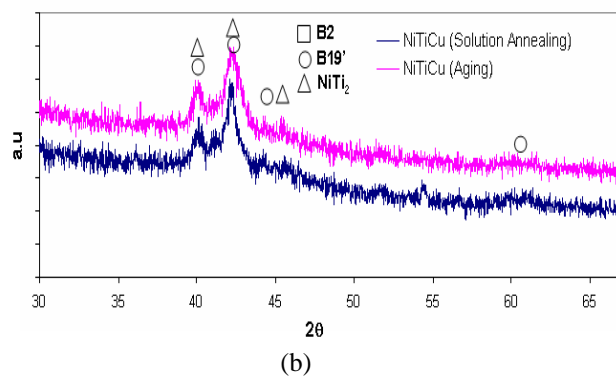
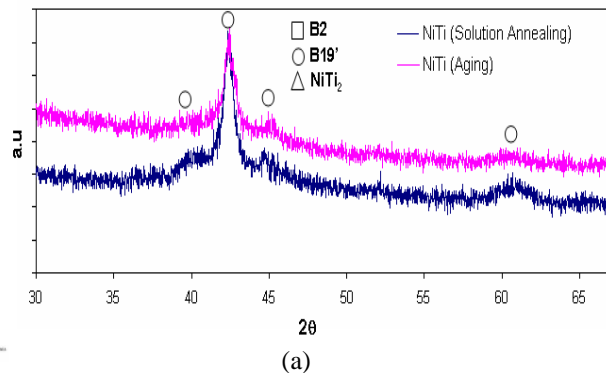
No.	Paduan	Suhu Transformasi ($^\circ\text{C}$)			
		A_s	A_f	M_s	M_f
1.	Ni51,2-Ti48,8	96,3	120,3	74,6	42,6
2.	Ni41,1-Ti49,7-Cu9,2	-	-	-	-



Gambar 2. Kurva pemanasan dan pendinginan hasil pengujian DSC pada sampel kawat NiTi dan NiTiCu

Pola XRD paduan *shape memory* NiTi dan NiTiCu pada kondisi *solution annealing* dan *aging* diperlihatkan masing-masing pada Gambar 3a dan 3b. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa paduan Ni-48,8Ti dalam kondisi *solution annealing* menampilkan puncak-puncak difraksi untuk fasa B19' (martensit) and B2 (austenit). Substitusi kisi Ni oleh Cu dalam paduan Ni-49,7Ti-9,2Cu kondisi *solution annealing* menampakkan puncak-puncak difraksi untuk Ti_2Ni dan mempertahankan puncak-puncak untuk B19' and B2. Presipitasi Ti_2Ni di dalam paduan ini dapat dipahami dengan menurunnya rasio Ni/Ti di dalam komposisi paduan. Peningkatan rasio komposisi Ni/Ti akan menghilangkan fasa Ti_2Ni dan memunculkan fasa baru $Ti_{0,4}Ni_{0,565}Cu_{0,035}$ yang getas^[14]. Sedangkan untuk pengaruh perlakuan aging, dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa aging pada suhu 400 °C selama 30 menit yang dilakukan pada paduan dalam kondisi *solution annealing* sedikit merubah puncak-puncak difraksi untuk paduan NiTi tetapi relatif tidak merubah pola difraksi paduan NiTiCu. Pada paduan NiTi perlakuan aging menurunkan intensitas puncak difraksi fasa B19'. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat sebagian

kecil fasa B19' yang tidak stabil pada paduan Ni-48,8Ti akibat proses *quenching* setelah *solution annealing*, yang akan menghilang pada proses *aging*.



Gambar 3. Profil XRD paduan NiTi dan NiTiCu masing-masing dalam kondisi *solution annealing* (a) dan *aging* (b)

Shape memory effect terdiri dari dua macam yaitu SME satu arah dan SME dua arah. SME satu arah berkaitan dengan terjadinya perubahan bentuk paduan hanya pada saat pemanasan (transformasi martensit-austenit). Sedangkan SME dua arah berkaitan dengan perubahan bentuk pada saat pemanasan (transformasi martensit-austenit) dan pada saat pendinginan (transformasi martensit-austenit). Paduan dengan SME satu arah memiliki regangan rekoveri yang lebih besar daripada yang dimiliki paduan dengan SME dua arah. SME dua arah diperoleh dengan pelatihan yang terdiri dari siklus perlakuan termomekanik dan perlakuan panas.

Shape memory effect satu arah dan dua arah paduan NiTi dan NiTiCu dievaluasi dengan menentukan regangan rekoveri

mutlak (ϵ_A) dari pengujian tekuk-panas. Parameter SME hasil pengujian tekuk-panas ditampilkan pada Tabel 3. Dari tabel tersebut terlihat bahwa kawat paduan terner Ni-49,7Ti-9,2Cu memiliki regangan rekoveri mutlak satu arah ϵ_A yang lebih tinggi dibandingkan dengan kawat biner Ni-48,8Ti. Ini menunjukkan bahwa penambahan Cu dapat meningkatkan *sifat shape memory* paduan NiTi. Kondisi pengaruh perlakuan panas memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kedua jenis kawat. Pada paduan NiTi, kawat dalam kondisi aging memiliki regangan rekoveri yang lebih besar dibandingkan kawat dalam kondisi *solution treatment*. Peningkatan SME pada kawat Ni-48,8Ti (termasuk Ni-rich NiTi alloy) ini berkaitan dengan adanya presipitasi fasa intermetalik Ti_3N_4 ^[4]. Sedangkan pada paduan NiTiCu, kawat dalam kondisi *solution treatment* yang memiliki regangan rekoveri yang lebih tinggi dari pada kawat dalam kondisi aging. Lebih kecilnya SME satu arah pada kawat NiTiCu dalam kondisi aging ini berkaitan dengan adanya fasa *intermediate* B19 selama transformasi martensit pada paduan NiTiCu^[17] yang dilakukan aging, sedangkan pada kondisi anil (*solution treatment*) NiTiCu tidak menunjukkan adanya fasa *intermediate* ini^[14].

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa SME dua arah memiliki nilai yang jauh lebih kecil dari pada SME satu arah baik rasio perubahan bentuk maupun regangan rekoveri absolut. SME satu arah terjadi apabila martensit dideformasi sehingga terjadi reorientasi martensit dan sebagai penggerak terjadinya perubahan ke bentuk awal pada saat dipanaskan ke suhu austenit. Pada SME dua arah, tegangan eksternal tidak diberikan dan penggerak perubahan bentuk disebabkan oleh mekanisme reorientasi varian martensit yang terorientasi secara preferensial^[18]. Varian martensit yang terorientasi preferensial ini dapat terbentuk dengan adanya medan tegangan sisa yang diberikan dengan proses termomekanik yang berulang yang disebut pelatihan

(*training*). Jadi SME dua arah tidak bersifat intrinsik yang berarti akan terbentuk setelah prosedur pelatihan tertentu^[19]. Selama proses pelatihan, medan tegangan terarahkan terbentuk di dalam paduan. Medan tegangan sisa yang dihasilkan ini menghantarkan pembentukan dan pertumbuhan varian martensit yang terorientasi preferensial^[18]. Terjadinya SME dua arah pada kawat paduan NiTi dan NiTiCu berkaitan dengan wire drawing bertahap dan *intermediate annealing* selama proses pembuatan kawat yang dapat dikorelasikan dengan salah satu teknik pelatihan dengan melakukan pengujian SME satu arah yang berulang-ulang^[20].

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa kawat NiTi pada kondisi anil 900 °C selama 30 menit memiliki SME dua arah yang lebih besar dibandingkan kawat NiTi dalam kondisi aging 400 °C. Perlakuan aging tahap awal pada NiTi menginduksi terbentuknya presipitat koheren Ni_4Ti_3 dengan ukuran yang halus (< 150 nm)^[21] yang akan meningkatkan SME dua arah. Penurunan SME dua arah pada kawat NiTi dalam kondisi aging 400 °C selama 30 menit mengindikasikan bahwa presipitat Ni_4Ti_3 mengalami pertumbuhan dan regangan koherensi menghilang yang menyebabkan turunnya SME dua arah. Sedangkan pada kawat NiTiCu, kondisi paduan (*solution treatment* dan *aging*) terlihat tidak berpengaruh terhadap SME dua arah. Penambahan Cu di dalam paduan Ni-Ti berpengaruh lebih besar terhadap SME dua arah pada kawat dalam kondisi *aging* dibandingkan pada kawat dalam kondisi *quenching*.

Tabel 3. Parameter *shape memory effect* yang ditentukan dari pengujian tekuk-panas

No.	Sampel	Regangan Rekoveri Absolut Satu Arah ϵ_{A1} (%)	Regangan Rekoveri Absolut Dua Arah ϵ_{A2} (%)
1.	NiTi Solution Annealing	7,2	1,5
2.	NiTi Aging	8,4	0,6
3.	NiTiCu Solution Annealing	9,7	1,2
4.	NiTiCu Aging	9,3	1,2

KESIMPULAN

Telah dilakukan penelitian pengaruh *solution annealing* dan *aging* pada paduan *shape memory* NiTi dan NiTiCu. Beberapa kesimpulan dari penelitian ini adalah:

- Kawat paduan Ni-Ti-Cu (Ni-49,7Ti-9,2Cu) memiliki SME satu arah yang lebih tinggi dibandingkan dengan kawat Ni-Ti (Ni-48,8Ti) baik pada kondisi *solution annealing* maupun *aging*.
- Kawat NiTi pada kondisi *solution annealing* memiliki SME dua arah yang lebih besar dari pada kawat NiTi pada kondisi *aging*.
- Pada kawat NiTiCu, kondisi paduan (*solution annealing* dan *aging*) relatif tidak berpengaruh terhadap SME dua arah.
- Penambahan Cu di dalam paduan Ni-Ti berpengaruh lebih besar terhadap SME dua arah pada kawat dalam kondisi *aging* dibandingkan pada kawat dalam kondisi *solution annealing*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia yang telah membiayai penelitian ini melalui Program Kompetitif Bidang Material Maju dan Nano Teknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B.C.Chang, J.A. Shaw, M.A.Iadicola. 2006. *Continuum Mech. Thermodyn.* :18, 83–118.
- [2] M. Mertmann and G. Vergani. 2008. *Eur. Phys. J. Special Topics.* : 158, 221–230.
- [3] R.A. Sanguinetti Ferreira, E.P. Rocha Lima, A. Aquino Filho, N.F. de Quadros, O. Olimpio de Araújo, Y.P. Yadava. 2000. *Materials Research.* : 3, (4) 119-123.
- [4] J.I.Kim and S.Myazaki. 2005. *Met. Mat. Trans. A.* : 36A, 3301-3310.
- [5] G.B.Cho, Y.H.Kim, S.G.Hur, C.A.Yu, and T.H.Nam. 2006. *Met. Mat. Int.:* 12 (2), 181-187.
- [6] C.M. Hwang, M. Meichle, M.B. Salamon, C.M. Wayman. 1983. *Philos.Mag.* : 47A.
- [7] C.M. Hwang, C.M. Wayman. 1983. *Script. Metall.* : 17, 1345-1449.
- [8] H.R. Edmonds, C.M. Hwang. 1986. *Script. Metal* : 20, 733.
- [9] Y.C. Lo, S.K. Wu, H.E. Horng. 1993. *Acta Metall. Mater* : 41, 747.
- [10] N.M. Matveeva, Yu.K. Kovneristy, A.S. Savinov, V.P. Sivokha, V.N.Khachin. 1982. *J. Phys.* : 43, C4-249.
- [11] N.B. Morgan, Mater. 2004. *Sci. Eng. A.* : 378, 16–23.
- [12] K. Otsuka, T. Kakeshita. 2002. *MRS Bull.* : 27, 91–100.
- [13] E.Mabruri, B.Sriyono, B.Adjiantoro, D.N.Adnyana. 2010. „Fabrikasi Kawat Shape Memory Alloy Ni-Ti Skala Laboratorium”. *Pros. Seminar Material Metalurgi, Serpong, Indonesia.*
- [14] E.Mabruri, B.Sriyono, B.Adjiantoro, D.N.Adnyana. 2011. „Phase Identification and Microstructure of Ni-Ti-Cu and Ni₃₅Ti₅₀Cu₁₀X₅ (X= Fe, Sn, Cr, Nb, Co, Mo) Shape Memory Alloys”. *Proc. The 12th International Conference on QiR (Quality in Research)*, Bali.
- [15] Efendi Mabruri, Bambang Sriyono, Bintang Adjiantoro, D.N.Adnyana. 2011. „Shape Memory Characteristics of Ni-Ti-Cu and Ni-Ti-Cu-Fe Alloys”. *Proceeding of The 3rd International Seminar on Applied Technology, Science and Arts-APTECS, Surabaya.*
- [16] Kiyohide Wada, Yong Liu. 2008. *Journal of Alloys and Compounds.* : 449, 125–128.
- [17] K. Harikrishnan, K. Chandra, P. S. Misra, V.S. Agarwala. 2009. *ESOMAT.* : 02020.

- [18] C.Y.Chang, D. Vokoun, C.T,Hu. 2001. *Met. Mat. Trans. A.* : 32A, 1629-1634.
- [19] X.M. Zhang, J. Fernandez. 2006. *Mater. Sci. Eng. A.* :438–440, 431–435.
- [20] C.M.Wayman. 1988. *Abstracts of the Engineering with Shaped Memory Alloy Conf.* Michigan State Univ., Lansing, MI, Aug. 15-17.
- [21] J.J. Wang, T. Omori, Y. Sutou, R. Kainuma, K. Ishida. 2005. *Scripta Materialia.* : 52, 311–316.

RIWAYAT PENULIS

Efendi Mabruhi, Lulus Sarjana Teknik Pertambangan ITB tahun 1995, Master Teknik Material ITB tahun 2002 dan Doctor of Engineering bidang Materials Science and Engineering dari Nagoya University, Jepang lulus tahun 2008. Bekerja sebagai peneliti sejak tahun 1996 dan sekarang menjabat sebagai Kepala Bidang Konservasi Bahan di Pusat Penelitian Metalurgi LIPI.

