

---

# Pengaruh Penuaan Terhadap Karakteristik Paduan Ingat Bentuk Nitinol

---

**Surian Pinem**

pinem@batan.go.id

---

## Penulis

Surian Pinem adalah staf pengajar di Jurusan Teknik Industri, Universitas Bunda Mulia, Jakarta. Kesehariannya, penulis adalah salah satu peneliti utama di Badan Tenaga Atom Indonesia (BATAN). Bidang peminatan: Fisika, Matematika, *Material Science*.

---

## Abstract

*Nitinol is a form of alloy used for shaping memory applications because of its good mechanical properties and stable shape memory effect. The microstructure and transformation temperature is influenced by aging treatment, composition, and addition of elements to the alloy. This study explained the effect of aging treatment on the characteristic of Nitinol. The shape memory alloy with Ti-50.04 % at Ni composition was solution treated at 1000 °C for 1 hour and quenched in water, then aged in temperature of 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C and 700 °C for 10 hours. The microstructure was investigated using Scanning Electron Microscopy and mechanical property such as Vickers method. Transformation temperature was measured using resistance measurement technique. The result of microstructure observation showed that the martensitic phase was arranged by lamellar plates which tend to be softer in aging temperature, and the hardness decreased in aging temperature near 600°C - 700°C. The martensitic transformation temperature increased about 4 °C after aging process at 500 °C for 10 hours, but while aging temperature was near 500 °C – 700 °C, there was no significant change of the transformation temperature.*

---

## Keywords

*shape memory alloy, aging, Nitinol, martensitic*

## PENDAHULUAN

Pada beberapa paduan jika diberi deformasi akan pulih kembali pada kondisi semula, saat paduan tersebut dipanaskan pada temperatur tertentu. Fenomena ini dikenal sebagai efek ingat bentuk (*shape memory effect*). Sifat ingat bentuk ditemukan pada sejumlah paduan logam seperti TiNi, CuZnAl dan CuAlNi yang sangat populer. Paduan ingat bentuk seperti CuZnAl dan CuAlNi mempunyai sifat kimia, fisika dan karakteristik mekanikal yang lebih buruk dibandingkan paduan NiTi, sehingga paduan TiNi yang disebut Nitinol lebih banyak digunakan untuk pemakaian ingat bentuk dan superelastis.

Paduan Nitinol mempunyai sifat-sifat tertentu yang sangat baik untuk digunakan dalam bidang industri dan kedokteran. Pada bidang industri, pemakaiannya jauh lebih pesat karena Nitinol memiliki sifat mekanis dan ketahanan terhadap korosi yang sangat baik (Miyazaki dan Otsuka, 1989). Untuk bidang kedokteran banyak digunakan untuk mengganti baja stainless karena Nitinol memiliki keunggulan sifat metalurgi dan mempunyai sifat superelastis sehingga menjadi aman dan mudah.

Sifat ingat bentuk tersebut dihasilkan sebagai akibat terjadinya perubahan struktur kristal di dalam logam yang dapat berlangsung secara bolak balik (*reversible*), apabila pada paduan logam tersebut diberikan siklus pemanasan dan pendinginan. Perubahan struktur tersebut terjadi pada temperatur tertentu yang sering disebut temperatur transformasi. Temperatur transformasi yang dimaksud adalah temperatur transformasi martensitik, dimana pada kondisi temperatur tersebut terjadi transformasi fasa martensit ke fasa austenit atau sebaliknya dari fasa austenit ke fasa martensit (Saburi, 1994).

Struktur mikro paduan Nitinol akibat perlakuan palarutan akan mengakibatkan terbentuknya struktur martensit. Efek perlakuan penuaan setelah perlakuan pelarutan mengakibatkan terbentuknya fasa baru yang mengendap pada paduan Nitinol, dengan semakin tinggi temperatur dan semakin lama penuaan akan menumbuhkan endapan fasa lain (presipitat). Presipitat mempengaruhi tingkat kemampuan efek ingat bentuk dan bila terbentuk presipitat  $Ti_3Ni_4$  memungkinkan terjadinya "*two-way shape memory effect*" (Miyazaki dan Otsuka, 1989; Saburi, 1994; Chen, Wu, dan Ko, 1993).

Dalam tulisan ini dijelaskan karakteristik ingat bentuk paduan Nitinol akibat perlakuan penuaan. Paduan Nitinol yang digunakan dalam bentuk kawat dengan komposisi Ti-50,04% at.Ni. Perlakuan pelarutan dilakukan pada temperatur 1000 °C selama 1 jam kemudian dicelupkan ke dalam air dan setelah itu dilakukan proses penuaan pada temperatur 500°C, 550°C, 600°C, 650°C dan 700°C selama 10 jam.

Untuk mengamati struktur mikro akibat proses penuaan dilakukan dengan menggunakan scanning electron microscopy (SEM) dan sifat-sifat kekerasan secara mikro akibat penuaan dilakukan pengukuran kekerasan Vickers. Perubahan temperatur transformasi dilakukan dengan pengukuran perubahan resistansi elektrik dengan metode empat titik.

## MEKANISME INGAT BENTUK

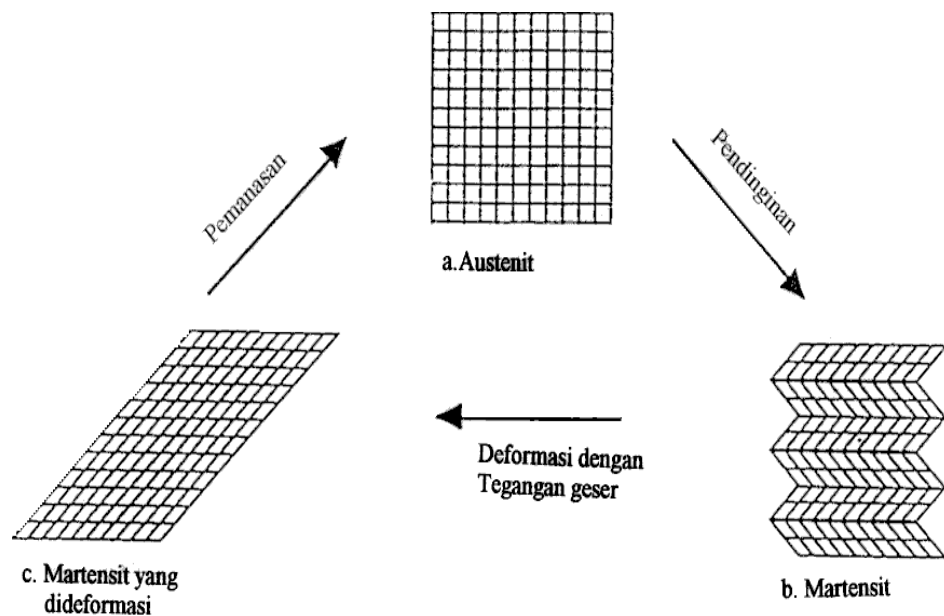
Paduan ingat bentuk adalah material yang dapat dibentuk pada satu temperatur tetapi bila dipanaskan atau didinginkan akan kembali ke bentuk semula. Pada temperatur tinggi paduan ingat bentuk dalam fase austenit dalam jangkauan yang sangat luas. Pada pendinginan di bawah temperatur transformasi, austenit dibentuk ke martensit thermoelastik yang strukturnya banyak varian dan jenisnya seperti pelat tajam bergantian. Temperatur ketika fasa induk mulai berubah menjadi martensit pada siklus pendinginan disebut  $M_s$ , sedangkan temperatur pada saat seluruh struktur kristal ditransformasikan ke martensit disebut  $M_f$ . Bila paduan dipanaskan maka fasa induk mulai terbentuk kembali disebut  $A_s$  dan akan berakhir secara

lengkap disebut Af (Saburi, 1994; Chen, Wu, dan Ko, 1993; dan Pinem, 1999). Mekanisme yang menunjukkan ingat bentuk hanya diatas pemanasan sekenal sebagai *one-way shape memory*.

Selain sifat tersebut, beberapa paduan ingat bentuk masih mempunyai sifat lainnya, dimana paduan dapat teringat kepada kedua bentuknya yaitu baik bentuk austenit maupun bentuk martensit dan perubahan dari satu bentuk ke bentuk lainnya ketika terjadi siklus pemanasan dan pendinginan, sifat dikenal sebagai *two-way shape memory* (Otsuka, 1994).

Paduan ingat bentuk mungkin menghasilkan termoelastik martensit. Dalam hal ini paduan mengalami transformasi martensitik yang mana paduan dibentuk dengan mekanisme *twinning* dibawah temperatur transformasi. Deformasi akan terjadi bolak-balik bila struktur *twin* kembali dipanaskan pada fasa induk.

Sifat ingat bentuk paduan dapat dilihat ketika material dibengkokkan atau diberi deformasi. Jika paduan ingat bentuk dipanaskan dan didinginkan akan terjadi transformasi austenit ke martensit dan fase baru akan tumbuh tanpa terjadi perubahan bentuk makroskopik paduan (Porter dan Eastering, 1981; dan Piao, et al., 1992). Mekanisme timbulnya ingat bentuk akibat deformasi ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Proses transformasi martensit  
Sumber: Porter dan Eastering (1981)

## PADUAN NITINOL

Paduan Nitinol umumnya paduan yang sederhana yang terdiri dari nikel dan titanium dengan perbandingan dua unsur pokok kira-kira 49 – 51 % at.Ni. Akan tetapi perbedaan komposisi didalam dua elemen tersebut dapat mengakibatkan perbedaan yang besar didalam sifat paduan Nitinol. Karena temperatur transformasi sangat peka terhadap komposisi paduan maka proses pembuatan paduan membutuhkan pengaturan dan pengontrolan komposisi kimia agar diperoleh temperatur transformasi sesuai dengan yang diinginkan.

Komposisi paduan sangat penting, penambahan sedikit Ni mengakibatkan penurunan  $M_s$  dan disarankan tidak lebih dari 51,6 % at.Ni untuk menghindari presipitat  $TiNi_3$  (Miyazaki dan Otsuka, 1989). Untuk menurunkan temperatur histerisis dan tegangan deformasi martensit dilakukan penambahan elemen lain seperti besi, cobalt dan chromium. Bila paduan terkontaminasi oleh oksigen dan karbon maka dapat mengubah temperatur transformasi dan menurunkan sifat mekanik sehingga kontaminasi elemen tersebut harus diminimumkan pada paduan Nitinol. Beberapa parameter sifat mekanik ingat bentuk paduan Nitinol disajikan dalam Tabel1.

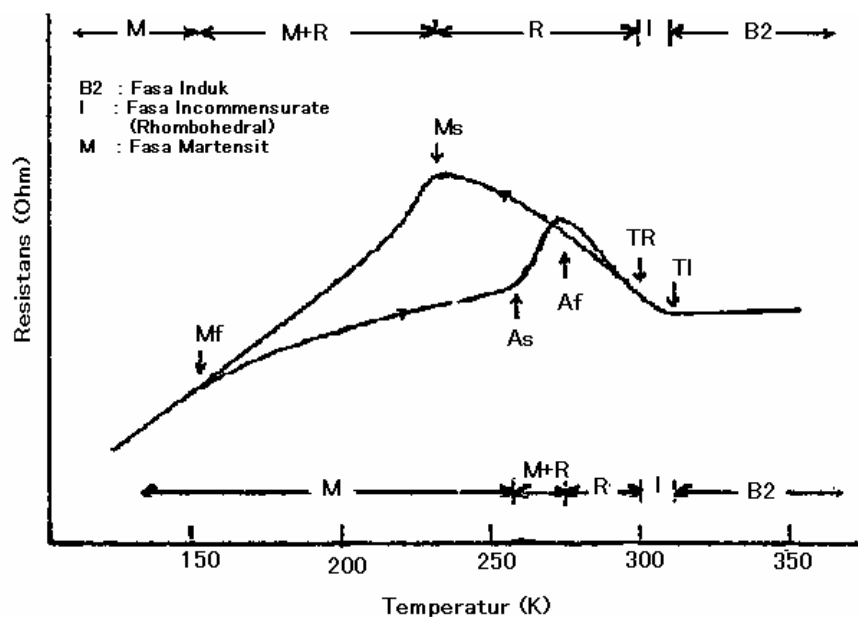
Tabel 1. Sifat utama dari paduan Nitinol

No.	Sifat	Besaran	Satuan
1.	Titik didih	1300	$^{\circ}C$
2.	Temperatur transformasi	-100 s/d 110	$^{\circ}C$
3.	Kerapatan	6,45	$g/cm^3$
4.	Konduktivitas termal austenit	18	$W/(m.k)$
5.	Konduktivitas termal martensit	8,6	$W/(m.k)$
6.	Resistivitas austenit	$1.10^{-6}$	Ohm. m
7.	Resistivitas martensit	$0,8.10^{-6}$	Ohm. m
8.	Modulus Young austenit	83	G Pa
9.	Modulus Young martensit	28 s/d 41	G Pa
10.	Diameter butir	50 s/d 100	Micron

Sumber: (Miyazaki dan Otsuka, 1989; Saburi, 1994)

#### Karakteristik Perubahan Fasa Nitinol

Salah satu yang menarik tentang transformasi martensit paduan Nitinol adalah transisi premartensit dimana muncul sebelum transformasi martensit. Hal ini terjadi jika diberikan perlakuan termomekanikal atau ditemukan presipitat  $Ti_3Ni_4$ . Ada beberapa jenis presipitat didalam equatomik paduan Nitinol yang mana presipitat  $Ti_3Ni_4$  sangat kuat mempengaruhi fasa R dan transformasi martensit. Hasil transformasi seperti ini ditunjukkan dalam Gambar 2.



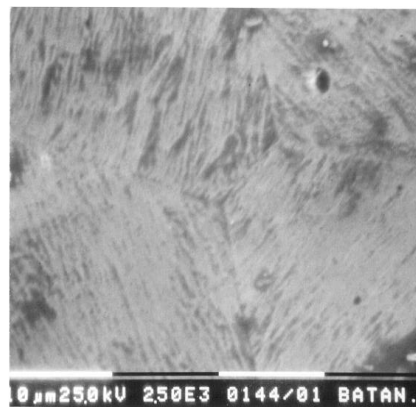
Gambar 2. Resistansi - Temperatur untuk Nitinol  
 Sumber: Miyazaki dan Otsuka (1989)

Resistansi elektrik mulai naik saat pendinginan pada temperatur kritikal  $T_1$  dan pada pendinginan selanjutnya laju kenaikan resistansi menjadi agak perlahan-lahan. Pada temperatur kritikal  $T_1$ , fasa yang dihasilkan pertama adalah fasa *incommensurate*. Fasa *incommensurate* akan berubah menjadi *commensurate* pada  $T_R$ . Fasa *commensurate* disebut fasa R, untuk itu transformasi paduan Nitinol yang mempunyai dislokasi atau presipitasi akan menghasilkan urutan proses B2  $\rightarrow$  fasa *incommensurate*  $\rightarrow$  fasa R  $\rightarrow$  martensit. Akan tetapi perlakuan pelarutan paduan Nitinol tidak menunjukkan fasa R. Perlakuan equiatomik paduan Nitinol menunjukkan tidak ada kenaikan resistansi elektrik dan memperlihatkan transformasi akibat pendinginan seperti B2  $\rightarrow$  martensit (Miyazaki dan Otsuka, 1989; Porter dan Eastering, 1981).

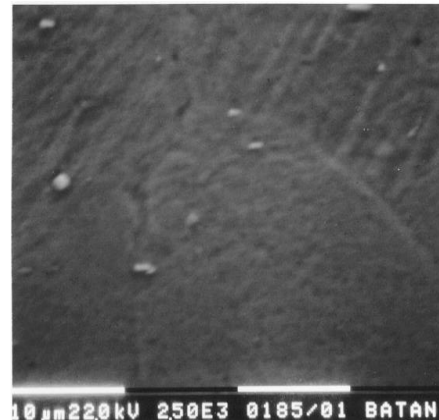
Ada beberapa faktor yang efektif untuk menekan transformasi martensit seperti, menambah persentase Ni, penuaan setelah perlakuan pelarutan, annealing pada temperatur dibawah temperatur rekristalisasi setelah pengerjaan dingin, dan penambahan elemen ketiga. Faktor yang cukup efektif adalah penuaan setelah dilakukan perlakuan pelarutan dan penambahan elemen ketiga untuk menampakkan transisi fasa R.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur mikro hasil perlakuan pelarutan pada temperatur 1000°C selama 1 jam diikuti dengan pencelupan kedalam air diamati dengan menggunakan SEM dengan perbesaran 2500 kali ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3 terlihat bahwa paduan memiliki struktur martensit berupa pelat lamelar yang sangat halus. Dengan terjadinya pelat-pelat martensit menunjukkan bahwa temperatur transformasi paduan berada diatas temperatur kamar.

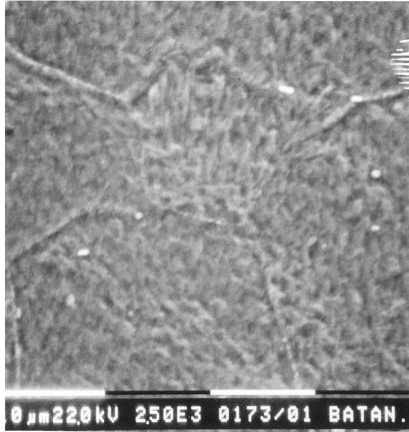


Gambar 3. Struktur martensit dengan perlakuan pelarutan

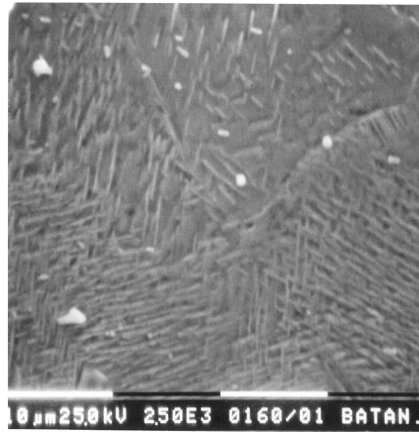


Gambar 4. Struktur martensit hasil penuaan 500 °C

Struktur mikro setelah dilakukan penuaan pada temperatur 500°C selama 10 jam ditunjukkan dalam Gambar 4 dimana terlihat adanya pelat lamelar terputus-putus dan cenderung lamelar. Hasil penuaan pada temperatur 550°C hampir sama dengan hasil penuaan 500°C dimana pelat lamelar terputus-putus, cenderung lamelar. Untuk itu belum kelihatan pengaruh temperatur pada struktur morfologi.



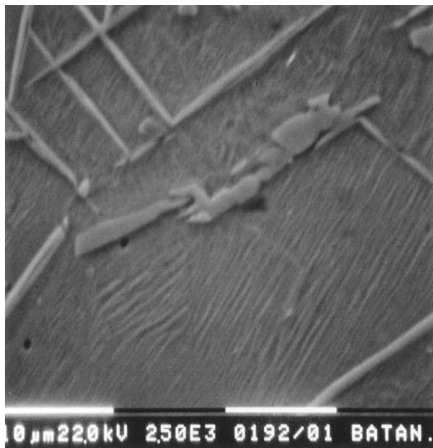
Gambar 5. Struktur martensit hasil penuaan 550 °C



Gambar 6. Struktur martensit hasil penuaan 600 °C

Gambar 6 menunjukkan struktur martensit setelah dilakukan penuaan 600°C dimana terjadi pelat lamelar penuh dan ada daerah pelat lamelar diskontinu pada batas butir. Selain itu pelat lamelar diskontinu tidak hanya dihasilkan kedepan melalui migrasi batas butir tetapi juga kesamping.

Struktur mikro yang dituakan pada temperatur 650°C ditunjukkan dalam Gambar 7, terlihat pada struktur pelat lamelar penuh dan dilengkapi dengan daerah diskontinu dan kontinu. Selain itu ada pertumbuhan pelat lamellar pada batas butir dengan orientasi yang sama. Akan tetapi penuaan pada temperatur 700°C seperti ditunjukkan dalam Gambar 8 menunjukkan pelat lamelar penuh. Jarak antara pelat lamelar semakin besar dan juga terdapat daerah kontinu dan diskontinu.



Gambar 7. Struktur martensit hasil penuaan 650 °C

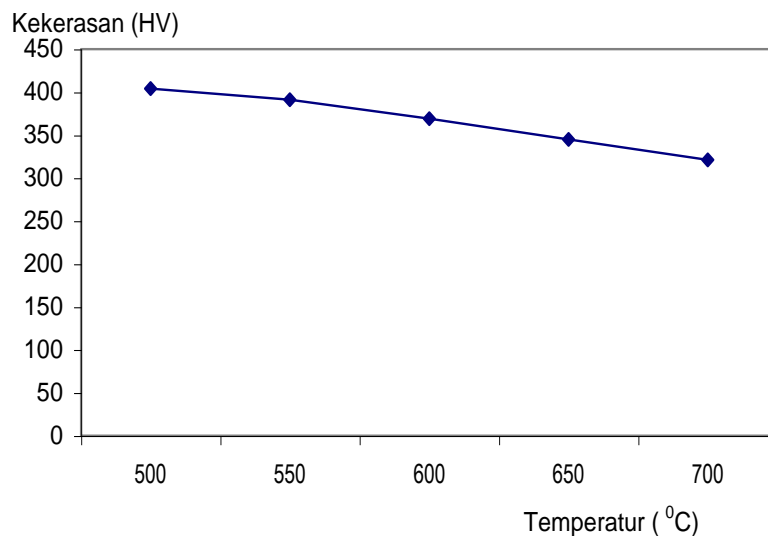


Gambar 8. Struktur martensit hasil penuaan 700 °C

Morfologi struktur Nitinol pada temperatur penuaan 500 °C dan 550 °C menunjukkan pelat lamelar yang terputus-putus dan cenderung mengkasar. Sementara itu pada penuaan 600°C, 650°C dan 700°C menunjukkan pelat-pelat lamelar penuh dan mempunyai orientasi kontinu dan diskontinu. Hal ini disebabkan oleh karena temperatur penuaan diatas temperatur rekristalisasi sehingga terjadi proses pembentukan kristal baru yang diikuti oleh pembentukan pelat martensit. Jadi pelat martensit mengalami perubahan akibat proses penuaan.

Untuk mengetahui lebih lanjut pengaruh paduan akibat proses penuaan maka dilakukan pengukuran kekerasan secara mikro dengan menggunakan Leitz Micro Hardness untuk Vickers. Beban yang digunakan sebesar 200 g. Pengukuran dilakukan pada tiga posisi yang berbeda. Hasil pengukuran disajikan dalam Gambar 9.

Hasil pengukuran kekerasan dengan berbagai temperatur penuaan dari 600 °C– 700 °C sedikit menurun dengan kenaikan temperatur penuaan. Hal ini juga terlihat dalam pelat martensit dimana selama proses penuaan tersebut mengalami pembesaran. Dengan semakin membesarnya pelat martensit maka semakin kecil tingkat rintangan yang terjadi terhadap dislokasi, sehingga semakin kecil energi yang dibutuhkan untuk mendeformasi cuplikan atau dengan kata lain semakin besar pelat martensit akan semakin turun kekerasannya.

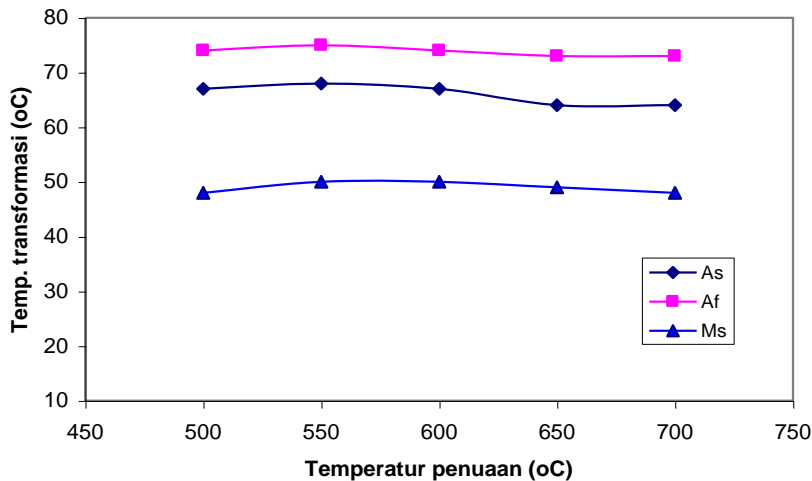


Gambar 9. Kekerasan – Temperatur penuaan

Hasil pengukuran resistansi – temperatur dengan perlakuan dan berbagai temperatur penuaan ditunjukkan dalam Tabel 2. Dalam penelitian ini temperatur transformasi martensit,  $M_f$  tidak dapat ditentukan karena alat yang digunakan mulai dari temperatur 26°C. Untuk lebih mengerti pengaruh proses penuaan terhadap temperatur transformasi maka hasil pada Tabel 2 digambarkan kembali pada Gambar 10.

Tabel 2. Temperatur transformasi Nitinol

No.	Temperatur penuaan (°C)	As (°C)	Af (°C)	Ms (°C)
1.	Tanpa penuaan	67	75	44
2.	500	67	74	48
3.	550	68	75	50
4.	600	67	74	50
5.	650	64	73	49
6.	700	64	73	48



Gambar 10. Kurva temperatur transformasi - temperatur penuaan paduan Nitinol.

Dari gambar kurva resistansi – temperatur yang telah mengalami proses penuaan pada berbagai temperatur terlihat bahwa resistans turun dengan turunnya temperatur, ini berarti paduan tidak menunjukkan adanya fasa R, hal ini mungkin karena Nitinol yang digunakan mempunyai komposisi 50,04 % at.Ni. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Saburi (1994), menunjukkan bahwa sifat paduan Nitinol yang mempunyai komposisi Ni antara 50 sampai 50,5 % at.Ni tidak sensitif terhadap perlakuan panas karena tidak ada presipitat  $Ti_3Ni_4$  yang terjadi dalam paduan ini.

Temperatur transformasi Ms dari proses pelarutan ke proses penuaan pada temperatur 500°C selama 10 jam terjadi kenaikan sekitar 4 °C, hal ini kemungkinan disebabkan oleh proses penuaan sehingga fasa martensit menjadi lebih setabil. Dengan setabilnya fasa martensit membutuhkan energi termal atau temperatur yang lebih tinggi untuk memulai transformasi ke fasa austenit Akan tetapi temperatur transformasi austenit tidak mengalami perubahan akibat proses penuaan, ini berarti proses penuaan tidak mengubah temperatur transformasi austenit.

Harga temperatur transformasi secara keseluruhan tidak menunjukkan perubahan yang berarti setelah dilakukan proses penuaan seperti ditunjukkan dalam Gambar 10. Hal ini mungkin karena dalam proses penuaan ini tidak terjadi fasa R sehingga temperatur transformasi tidak mengalami perubahan. Dengan tidak terjadinya perubahan temperatur transformasi maka temperatur histerisis juga tidak mengalami perubahan yang berarti.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang diperoleh dapat diambil kesimpulan bahwa morfologi struktur setelah mengalami proses penuaan menunjukkan bahwa pola struktur lamelar cenderung memperlihatkan pelat lamelar penuh dengan meningkatnya temperatur penuaan. Pada batas butir terjadi orientasi pelat lamelar meliputi kontinu dan diskontinu. Kekerasan akibat proses penuaan menunjukkan perubahan pada temperatur penuaan 600°C – 700°C. Temperatur transformasi tidak menunjukkan kenaikan yang berarti. Hal ini berarti bahwa proses penuaan dari temperatur 500°C - 700°C dengan waktu konstan 10 jam tidak efektif untuk mengubah temperatur transformasi.

## REFERENSI

- Miyazaki, S., dan K. Otsuka *Development of Shape Memory Alloy*. Institute of Material Science. University of Tsukuba, Japan, 56, 353 – 337, 1989
- Saburi, Toshio. *New Development of TiNi Shape Memory Alloy*. Departement of Material Science and Engineering, Osaka University, Japan, 18B, 997 – 1002, 1994
- Chen, Q., X.F. Wu, dan T. Ko. *The Effects of  $Ti_3Ni_4$  Precipitates on the R-Phase Transformation*. Scripta Metallurgica, 29, 49 – 53, 1993
- Pinem, Surian. *Pengaruh Proses Laku Panas Terhadap Struktur Mikro dan Karakteristik Sifat Ingat Bentuk Paduan Nitinol* [tesis]. Universitas Indonesia, Jakarta, 1999
- Otsuka, K. *Recent Developments of Ti-Ni and Ti-Ni Base Ternary Shape Memory Alloys*. Proceedings of the International Symposium on Shape Memory Materials, Beijing-China, pp: 129 – 135, 1994
- Porter, D.A., dan K. E.Eastering. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1981
- Piao, Min, et al.. *Characteristic of Deformation and Transformation in  $Ti_{44}Ni_{47}Nb_9$  Shape Memory Alloys*. Materials Transaction, JIM, 33, 346-353, 1992