

## ANALISA PENGARUH PERUBAHAN FASA TERHADAP KONSTANTA PADA COIL SPRING SHAPE MEMORY ALLOY (SMA)

- 1) Dosen Program Studi  
Teknik Mesin, Universitas  
17 Agustus 1945 Surabaya,  
Surabaya, Indonesia
- 2) Lecturer of Mechanical  
Engineering Department,  
University of 17 Agustus  
1945 Surabaya, Surabaya,  
Indonesia

Corresponding email <sup>1)</sup> :  
ekamarliana@untag-sby.ac.id

Received: 18-11-2019

Accepted: 05-12-2019

Published: 28-06-2020

©2020 Politala Press.

All Rights Reserved.

Eka Marliana <sup>1)</sup>, Edi Santoso <sup>2)</sup>

**Abstrak.** Shape Memory Alloy (SMA) memiliki fase transformasi yang unik dari Martensit menjadi Austenit, perubahan tersebut dapat terjadi dengan sedikit kenaikan temperature. Transformasi fasa yang terjadi tidak linear, namun secara histerisis. Sehingga penting untuk memahami bagaimana pengaruh perubahan fasa terhadap konstanta kekakuan SMA. SMA coil spring dengan jenis NiTi dipergunakan untuk melakukan eksperimen. Eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan test bench yang dibuat oleh penulis. Spesimen dipanaskan dengan variasi temperature dan beban statis, sehingga  $\Delta x$  dapat dihitung dan digunakan untuk menghitung nilai konstanta kekakuan pegas di setiap perubahan temperatur. SMA coil spring dimodelkan sebagai sistem massa- pegas- peredam dengan 1 DOF. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa perubahan fasa pada proses pemanasan NiTi terjadi mulai temperatur 45 °C sampai 62 °C. Nilai konstanta kekakuan bervariasi tergantung  $\Delta x$  NiTi. Variasi nilai konstanta kekakuan juga terjadi akibat perubahan fasa selama proses pemanasan, pada temperatur tertentu perubahan fasa tidak lagi terjadi, maka nilainya juga tidak mengalami perubahan. Hasil dari artikel ini dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut dari vibration control SMA sebagai aktuator.

**Kata Kunci:** Pegas, Aktuator, Control, Getaran, Material

**Abstract.** Shape Memory Alloy (SMA) has a unique phase transformation behavior from Martensite to Austenite, it can be changed only with a small increase in temperature. The phase transformation in SMA occurs in a hysteretic manner. So, it is important to understand how phase transformation affects the coil spring stiffness constant in the SMA. The NiTi SMA is used to construct an experiment. This experiment conducts using a test bench that developed by the author. The specimen will be heated using a variety of temperatures with a static load so that the  $\Delta x$  can be measured and used to compute the stiffness constant for every different temperature. The SMA coil spring is modeled as a spring-mass- damper system with 1 DOF. This paper concluded that the heating phase transformation of NiTi starts at 45 °C till 62 °C. The value of spring constant varies based on the  $\Delta x$  of NiTi and its phase transformation during heating. At some point, there is no more phase transformation, so that the value of spring constant will not change. The result of this paper can be used for further improvement in the vibration control of Shape Memory Alloy.

**Keywords:** Spring, Actuator, Control, Vibration, Material

To cite this article at <https://doi.org/10.34128/je.v7i1.106>

### 1. Pendahuluan

Dewasa ini seiring dengan berkembangnya teknologi material maju, semakin banyak jenis material baru yang telah ditemukan oleh para ilmuwan. Salah satu penemuan yang inovatif dalam bidang material maju adalah Shape Memory Alloy (SMA). SMA dikenal sebagai jenis material cerdas yang baru. SMA dapat mengalami perubahan bentuk secara mekanis pada temperatur yang cukup rendah, perubahan akan terjadi ketika SMA

dipanaskan sampai temperatur tertentu dan akan kembali ke bentuk semula setelah temperatur turun pada titik tertentu [1]. Kelebihan utama dari SMA adalah sifat *super-elasticity* (SE) yang dimilikinya (Mammano, dkk, 2011). Sejak ditemukannya SMA, khususnya paduan TiNi, banyak produk yang telah dikembangkan dalam dunia teknik. Beberapa contoh dari aplikasi SMA dalam dunia industri antara lain adalah sebagai aktuator yang digunakan pada katup transmisi tanpa roda gigi, katup oli otomatis di kereta Shinkansen dan miniatur robot. Bentuk SMA yang digunakan pada aplikasi tersebut adalah berupa *coil spring* (pegas gulung) dan kawat [2].

Salah satu alasan mengapa SMA banyak digunakan sebagai aktuator adalah beratnya yang relatif lebih ringan dibandingkan dengan jenis aktuator yang lain. Seiring dengan berkembangnya robot dan peralatan yang *compact*, aktuator jenis ini semakin banyak dibutuhkan. Tidak hanya ringan, SMA juga memiliki struktur yang tangguh, *dynamic behaviour* yang dapat menjamin ke-stabilan serta ke-akuratan, peredaman getaran untuk memastikan integritas struktural dan kenyamanan yang lebih baik [3].

Saat ini SMA banyak dikembangkan sebagai aktuator untuk *vibration control*. Namun karena sifat non-linear yang dimilikinya, proses *modelling* dan simulasi untuk SMA menjadi lebih kompleks dibandingkan jenis aktuator yang lain. Selain itu, proses pengendalian sistem (*System Control*) dapat dilakukan dengan mengatur konstanta pegas dan *damping ratio* yang ada pada sistem tersebut. Fasa pada SMA akan berubah menjadi Austenit jika temperaturnya dinaikan dan mengalami perubahan menjadi Martensit jika temperaturnya diturunkan kembali sampai titik tertentu. Selanjutnya karakter tersebut disebut sebagai karakter Termomekanik. Berdasarkan uraian diatas, maka dalam penelitian ini akan dibahas bagaimana korelasi antara perubahan fasa pada SMA dan perubahan nilai konstanta kekakuan (*k*) pada sebuah sistem pegas, massa dan peredam dengan 1 derajat kebebasan (DOF) serta pembenan harmonic.

## 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1 Karakteristik dan Sifat dari *Shape Memory Alloy* (SMA)

*Shape Memory Alloy* (SMA) dikenal dengan kemampuannya untuk mampu mengalami deformasi yang cukup besar, tetapi regangannya dapat dipulihkan kembali sehingga material dapat kembali kepada bentuk awalnya. Pemulihan regangan dapat dilakukan dengan pemanasan atau dengan pembebanan secara mekanis. Hal tersebut berkaitan dengan karakteristik dan efek *superelastic* pada SMA. Salah satu contoh aplikasi dari sifat SMA tersebut adalah penggunaan pegas SMA, yang dapat digunakan untuk kontrol vibrasi (*control vibration*) dan pengoperasian katup (*valve*). [4]

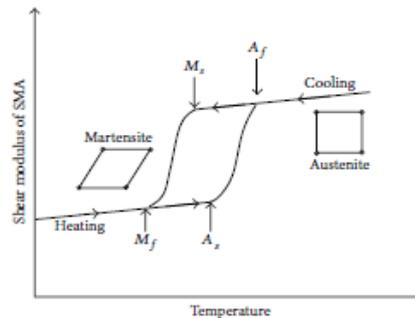
Pegas SMA paling banyak digunakan sebagai aktuator karena mampu menghasilkan perpindahan (*displacement*) yang cukup besar. Gaya yang dihasilkan oleh pegas akibat adanya perpindahan (*displacement*) dipengaruhi secara linear oleh modulus geser dari material yang digunakan. Pada SMA, temperatur akan sangat mempengaruhi modulus geser dari material. Hubungan antara modulus geser (*shear modulus*) dan temperatur pada SMA ditunjukkan pada Persamaan (1) dan secara grafis ditunjukkan oleh Gambar 1.

$$G = \begin{cases} G_M \text{ saat } T < M_f \text{ dan } T < A_s, \\ G_{(y,T)} \text{ saat } M_f \leq T \leq A_f, \\ G_A \text{ saat } T > A_f \text{ dan } T > M_s, \end{cases} \quad (1)$$

Keterangan:

|       |   |   |
|-------|---|---|
| $G$   | = | Modulus geser                           |
| $T$   | = | Temperatur SMA                          |
| $M_s$ | = | Temperatur saat Martensit <i>start</i>  |
| $M_f$ | = | Temperatur saat Martensit <i>finish</i> |
| $A_s$ | = | Temperatur saat Austenit <i>start</i>   |
| $A_f$ | = | Temperatur saat Austenit <i>finish</i>  |
| $G_M$ | = | Modulus geser Martensit                 |
| $G_A$ | = | Modulus geser Austenit                  |

Ketika nilai temperatur berada diantara  $M_f$  dan  $A_f$ , tanpa memperhitungkan tegangan ( $\gamma$ ), maka tegangan geser dari SMA dapat dinyatakan dengan Persamaan (2).



**Gambar 1** Temperatur Transformasi dari Martensit dan Austenit

$$G(T) = G_M + \frac{G_A - G_M}{2} [1 + \sin \varphi (T - T_m)] \quad (2)$$

dimana untuk proses pemanasan,

$$T_m = \frac{(A_s + A_f)}{2} \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{(A_f - A_s)} \quad (4)$$

dan untuk proses pendinginan,

$$T_m = \frac{(M_s + M_f)}{2} \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{(M_s - M_f)} \quad (6)$$

Saat SMA dipanaskan atau didinginkan, maka akan terjadi keseimbangan kalor yang dapat dideskripsikan sesuai dengan persamaan (7).

$$\rho_1 c V \frac{dT}{dt} = -hA(T - T_f) \quad (7)$$

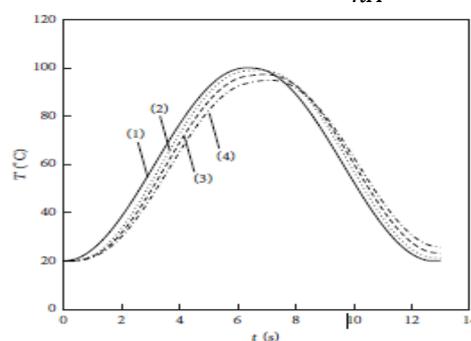
Keterangan:

- $\rho_1$  = Massa jenis dari SMA
- $c$  = Kalor jenis
- $V$  = Volume SMA yang terpapar udara
- $t$  = Waktu
- $h$  = Koefisien pertukaran kalor
- $A$  = Luas permukaan SMA
- $T_f$  = Temperatur udara

Jika  $T = T_0$ , ketika  $t = 0$ , maka variasi temperatur yang terjadi pada SMA terhadap fungsi waktu adalah

$$T = (T_0 - T_f)e^{-t/\sigma} + T_f \quad (8)$$

$$\sigma = \rho_1 c V / hA \quad (9)$$



- (1) The around airflow temperature
- (2) The temperature of SMA when the time constant is 1.5
- (3) The temperature of SMA when the time constant is 2.0
- (4) The temperature of SMA when the time constant is 2.5

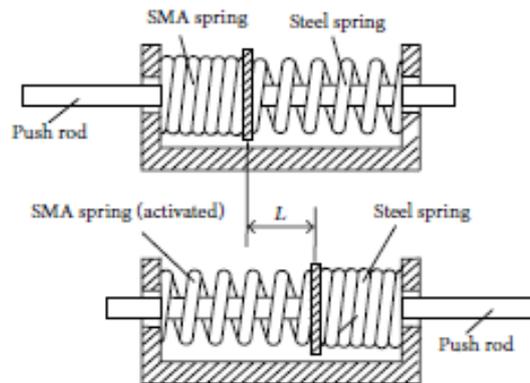
**Gambar 2** Variasi Temperatur dari SMA dan Temperatur Udara Sekitar terhadap 3 jenis koefisien pertukaran kalor yang berbeda

Jika jenis material dan struktur parameter dari SMA telah ditentukan sebelumnya dan konstanta waktu berbanding terbalik terhadap koefisien pertukaran kalor. Dengan tiga jenis koefisien pertukaran kalor yang berbeda, variasi temperatur pada SMA ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan gambar tersebut dapat

diketahui bahwa dengan dengan koefisien pertukaran kalor yang berbeda, maka temperatur dari SMA akan berubah lebih cepat jika konstanta waktu lebih cepat dan jeda waktu lebih cepat.

### 2.2 Prinsip Kerja SMA sebagai Aktuator

Aktuator dengan bahan dari SMA memanfaatkan properti dari *low yield stress* pada fase martensit dan kembali pada *high yield stress* pada fase austenit ketika temperatur dinaikan. Dengan demikian akan didapatkan pergerakan satu arah oleh SMA. Untuk mendapatkan pergerakan dua arah oleh SMA biasanya digunakan diferensial struktur dan bentuk bias yang ditunjukkan pada Gambar 3. Bentuk bias adalah kondisi

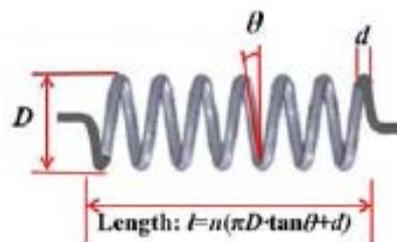


Gambar 3 Prinsip Operasional dari SMA sebagai Aktuator

dimana pegas SMA bekerja berlawanan dengan pegas baja biasa. Pada temperatur yang relatif rendah, pegas baja biasa akan mampu mendefleksikan pegas SMA hingga sepenuhnya mengalami kompresi. Ketika temperatur cukup tinggi, maka pegas SMA akan mengalami ekspansi dan pegas baja biasa akan terkompresi, sehingga akan menggerakkan *push rod* [5].

### 2.3 Coil Spring SMA sebagai Aktuator

Secara umum aktuator *coil spring* memiliki tiga desain parameter, terlepas dari apapun jenis materialnya.



Gambar 4 Parameter Desain dari Coil Spring SMA sebagai Aktuator

Ketiga parameter tersebut adalah; diameter kawat ( $d$ ), diameter *coil* ( $D$ ) dan jumlah *coil* ( $n$ ). Indeks pegas ( $C$ ) adalah nilai dari diameter *coil* dibagi dengan diameter kawat ( $\frac{D}{d}$ ). Indeks pegas merepresentasikan seberapa kaku *coil spring* tersebut. Semakin besar indeks pegas *coil* maka akan semakin banyak pula udara yang mengalir untuk proses konveksi, sehingga akan lebih cepat dingin saat terjadi proses pendinginan [6].

Konstanta kekakuan *coil spring* SMA dapat dimodelkan berdasarkan model matematika yang telah disusun pada penelitian sebelumnya, yaitu Model Ikuta [7]. Berdasarkan Model Ikuta, kekakuan *coil spring* SMA dapat dihitung dengan persamaan (10) dan (11).

$$k_{SMA-A} = k_{min} + \left( (k_{max} - k_{min}) - \frac{(k_{max} - k_{min})}{1 + e^{\left( \frac{6.2}{(A_f - A_s)} \right) \left( T \left( \frac{A_f + A_s}{2} \right) \right)}} \right) \quad (10)$$

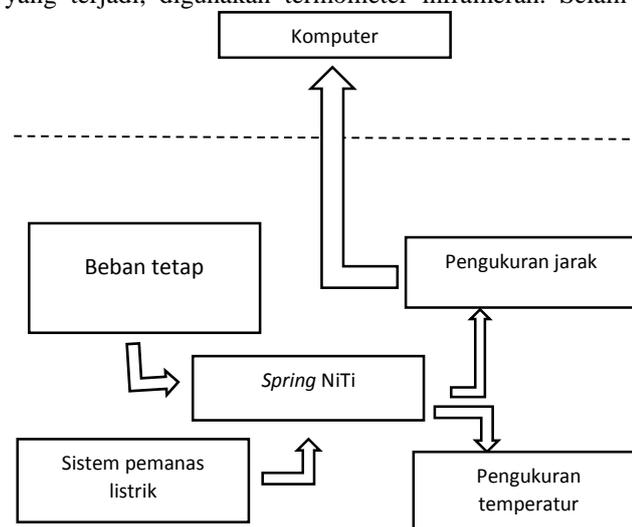
$$k_{SMA-M} = k_{min} + \left( (k_{max} - k_{min}) - \frac{(k_{max} - k_{min})}{1 + e^{\left( \frac{6.2}{(M_s - M_f)} \right) \left( T \left( \frac{M_f + M_s}{2} \right) \right)}} \right) \quad (11)$$

Keterangan:

|             |   |   |
|-------------|---|---|
| $k_{SMA-A}$ | = | Kekakuan <i>coil spring</i> SMA saat proses pemanasan   |
| $k_{SMA-M}$ | = | Kekakuan <i>coil spring</i> SMA saat proses pendinginan |
| $k_{min}$   | = | Kekakuan minimum <i>coil spring</i> SMA                 |
| $k_{max}$   | = | Kekakuan maksimum <i>coil spring</i> SMA                |

### 3. Metodologi

Dalam penelitian ini pengambilan data dilakukan dengan menggunakan *test bench* yang dibuat oleh penulis. *Test bench* yang dibuat terdiri dari sistem pemanas elektrik, termometer infra merah, sensor jarak ultrasonik, beban tetap dan spesimen berupa *coil spring* SMA (NiTi). Pada proses eksperimen tersebut didapatkan data berupa perubahan jarak ( $\Delta x$ ), yang nantinya akan digunakan untuk menghitung konstanta kekakuan pegas gulung (*coil spring*) SMA. Pegas gulung yang digunakan memiliki diameter gulungan (D) sebesar 12.7 mm, diameter kawat pegas (d) sebesar 1 mm dan panjang pegas sebesar 25 mm. Pegas gulung diberikan beban statis sebesar 20 gram dan digantung pada *test bench*, kemudian pada ujung-ujung pegas tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan dan arus yang dapat menimbulkan efek pemanasan pada pegas gulung SMA tersebut. Pemanasan dilakukan dengan variasi arus dan tegangan, yang akan menyebabkan terjadinya variasi temperatur pemanasan yang terjadi pada pegas gulung tersebut. Untuk mengetahui temperature yang terjadi, digunakan termometer inframerah. Selain data temperatur, nilai



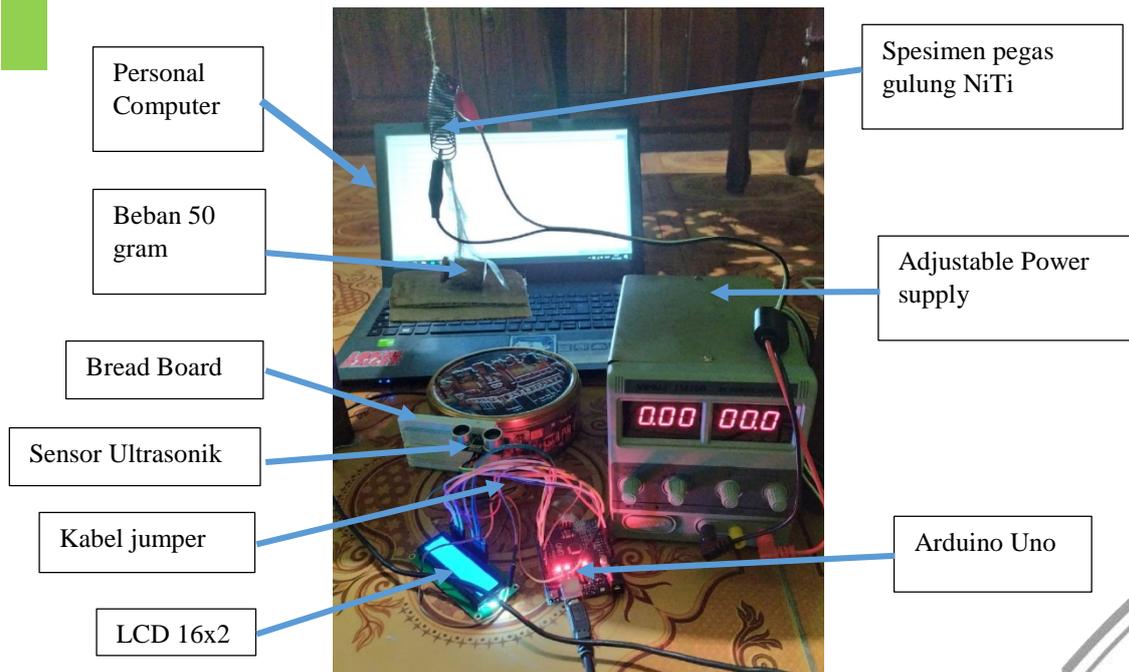
Gambar 5 Skema Test Bench

perubahan panjang pegas ( $\Delta x$ ) didapatkan dari sensor jarak ultrasonic yang dipasang pada *test bench*. Secara umum, skema *test bench* dapat dilihat seperti pada Gambar 5. Selain itu, untuk mengetahui perubahan fasa yang terjadi pada spesimen, dilakukan pula pengujian DSC (*Differential Scanning Calorimetry*). Data yang didapatkan dari pengujian tersebut adalah grafik perubahan *heat flux* terhadap temperatur. Temperatur pengujian yang digunakan adalah antara 25<sup>o</sup> C (temperatur ruangan) hingga 100<sup>o</sup> C, dengan kenaikan temperatur sebesar 5<sup>o</sup> C.

### 4. Hasil dan Pembahasan

#### 4.1 Test Bench

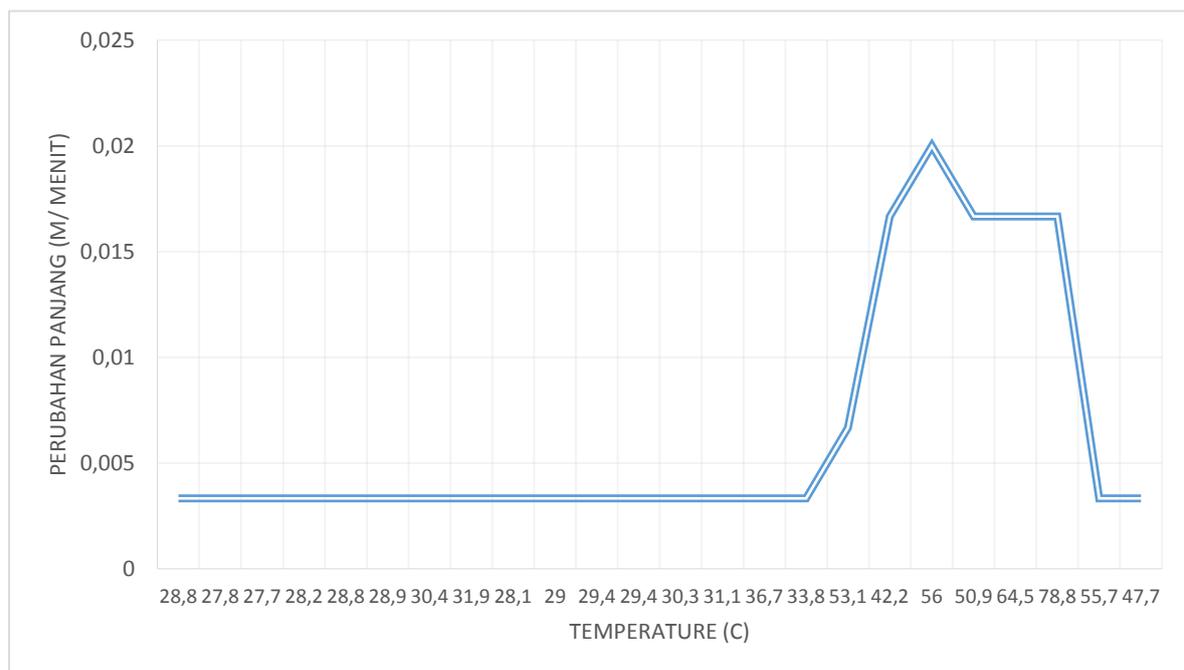
Dalam rangka menunjang penelitian ini, penulis membuat peralatan pengujian (*test bench*) yang digunakan untuk proses pengambilan data. *Test bench* ini terdiri dari beberapa komponen utama, meliputi *adjustable power supply*, Arduino Uno, sensor jarak berbasis ultrasonic HC SR-04, LCD 16x2, spesimen berupa pegas gulung NiTi, personal komputer, kabel *jumper*, termometer infra merah, beban 50 gram dan *bread board*, seperti pada Gambar 6. *Adjustable power supply* digunakan untuk memanaskan spesimen, pengaturan temperatur dilakukan dengan meningkatkan arus dan tegangan. Dalam percobaan ini pengambilan data dilakukan mulai dari temperatur 28.8<sup>o</sup> C sampai 78.8<sup>o</sup> C. Pada percobaan ini, pegas gulung mendapat beban sebesar 50 gram pada temperatur ruangan. Selanjutnya spesimen akan dipanaskan pada temperature 28.8<sup>o</sup> C selama 3 menit. Setelah 3 menit, sensor jarak akan mengukur perubahan posisi beban, yang juga merepresentasikan perubahan panjang pegas dari posisi semula. Pengambilan data diulangi kembali hingga temperatur 78.8<sup>o</sup> C. Data hasil percobaan ini ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 6 Test Bench

Pada Gambar 7, berdasarkan gambar ini dapat diketahui bahwa perubahan panjang pegas yang terjadi setiap menitnya mengalami peningkatan yang cukup drastis saat temperatur spesimen menyentuh angka 33.8 °C, namun kemudian nilai perubahan panjang pegas akan turun saat temperatur mencapai 64.5 °C.

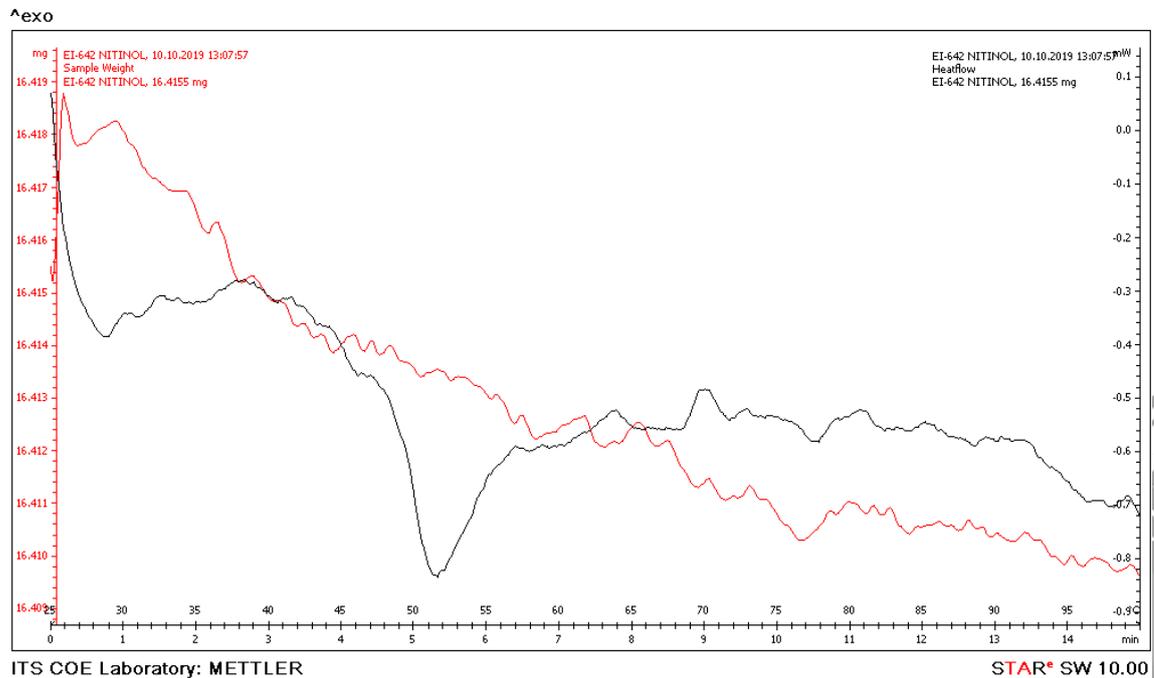
Perbedaan perubahan panjang pegas ( $\Delta x$ ) yang terjadi bervariasi terhadap temperatur pegas. Hal ini terjadi karena perubahan fasa pada pegas gulung NiTi pada proses pemanasan. Pada NiTi, perubahan fasa dari Martensit menjadi Austenit, terjadi pada temperatur 45°C. Pada fasa Austenit, pegas akan mengalami perubahan bentuk sesuai dengan kenaikan temperaturnya, dan sifat *ductility*-nya akan berkurang pada temperature yang cukup tinggi.



Gambar 7 Grafik Perubahan Panjang vs Temperatur

#### 4.2 Hasil Pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC)

Perubahan fase *temperature* didapatkan dengan menggunakan pengujian *Differential Scanning Calorimeter*. Peralatan yang digunakan adalah alat uji DSC dengan merek Mettler yang terdapat di laboratorium COE ITS Suarabaya. Hasil pengujian DSC terhadap pegas gulung NiTi digambarkan oleh Gambar 8. Pada gambar tersebut terdapat grafik perubahan massa dan *heat flux* terhadap kenaikan temperatur.



**Gambar 8** Perubahan temperatur dari pengujian DSC

Pengambilan data dilakukan pada temperatur 25 °C hingga 100 °C dengan kenaikan temperatur sebesar 5 °C/min. Pengujian dilakukan dalam waktu 15 menit dan massa spesimen sebesar 16.4155 mg. Berdasarkan grafik pada Gambar 9, diketahui bahwa perbandingan antara jumlah *heat flux* dan perubahan massa spesimen menunjukkan adanya perubahan fasa pada material tersebut. Perubahan fasa dari Martensit menjadi Austenit mulai terjadi pada temperature 45° C dan berakhir pada temperatur 62 ° C. Pada proses perubahan fasa tersebut, secara fisik pegas NiTi juga mengalami perubahan panjang, dengan variasi perubahan panjang terhadap temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

#### 4.3 Perubahan Fasa dan Perhitungan Konstanta Kekakuan

Berdasarkan hasil pengujian *Differential Scanning Calorimeter* (DSC) yang telah dilakukan, diketahui bahwa perubahan fasa saat proses pemanasan, dari Martensit menjadi Austenit terjadi mulai temperature 45° C dan berakhir pada temperatur 62 ° C. Seiring dengan perubahan fasa yang terjadi akibat perubahan temperatur, konstanta kekakuan dari NiTi juga berubah. Perubahan konstanta kekakuan yang terjadi dapat digambarkan seperti pada tabel 1. Berdasarkan data pada tabel 1, dapat disimpulkan bahwa konstanta kekakuan pegas berbanding terbalik dengan nilai  $\Delta x$ , hal ini dikarenakan adanya perubahan fase Austenit yang sedang terjadi pada pegas.

**Tabel 1** Perhitungan Konstanta Pegas

| $\Delta x$ (m) | m (Kg) | g (m/s <sup>2</sup> ) | F (N)  | K (N/m) | T ( C ) |
|----------------|--------|-----------------------|--------|---------|---------|
| 0,01           | 0,05   | 9,81                  | 0,4905 | 49,05   | 28,8    |
| 0,01           | 0,05   | 9,81                  | 0,4905 | 49,05   | 27,8    |
| 0,01           | 0,05   | 9,81                  | 0,4905 | 49,05   | 27,7    |
| 0,01           | 0,05   | 9,81                  | 0,4905 | 49,05   | 28,2    |
| 0,01           | 0,05   | 9,81                  | 0,4905 | 49,05   | 28,8    |
| 0,01           | 0,05   | 9,81                  | 0,4905 | 49,05   | 28,9    |
| 0,01           | 0,05   | 9,81                  | 0,4905 | 49,05   | 30,4    |

|      |      |      |        |        |      |
|------|------|------|--------|--------|------|
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 31,9 |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 28,1 |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 29   |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 29,4 |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 29,4 |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 30,3 |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 31,1 |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 36,7 |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 33,8 |
| 0,02 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 24,525 | 53,1 |
| 0,05 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 9,81   | 42,2 |
| 0,06 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 8,175  | 56   |
| 0,05 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 9,81   | 50,9 |
| 0,05 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 9,81   | 64,5 |
| 0,05 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 9,81   | 78,8 |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 55,7 |
| 0,01 | 0,05 | 9,81 | 0,4905 | 49,05  | 47,7 |

## 5. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah, bahwa perubahan fasa dari pada proses pemanasan NiTi terjadi pada temperatur 45<sup>o</sup> C hingga 62<sup>o</sup> C. Seiring dengan berubahnya fasa, perubahan panjang pegas juga terjadi, yang mengindikasikan adanya perubahan konstanta kekakuan pegas selama proses pemanasan NiTi.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya yang telah memberikan pendanaan untuk melaksanakan penelitian ini.

## Daftar Pustaka

- [1] Yu, P., Kang, G., Song, D., Kan, Q. (2012), "Micromechanical Constitutive Model Considering Plasticity for Super-elastic NiTi shape memory alloy", *Computational Material Science*, Vol. 56, pp.1-5, 2012.
- [2] Ishii, T. *Design of shape memory alloy (SMA) coil springs for actuator applications*. Sogo Spring Mfg Co. Ltd., Japan, 2011.
- [3] Yan, Y. J., Ham, L. H. (2002), "A synthetic analysis on design of optimum control for an optimized intelligent structure", *Journal of Sound and Vibration*, Vol .249, No. 4, pp. 775-784, 2002.
- [4] Zaki, W., Viet, N. V. (2018), "Analytical model of shape memory alloy helical springs", *Proceedings of the ASME 2018*, 2018.
- [5] Ma, J., Huang, H., Huang, J. (2013), "Characteristic Analysis and Testing of SMA Spring Actuator", *Research Article Advances in Materials Science and Engoneering*, Hindawi Publishing Corporation, 2013.
- [6] Koh, J. S., Lee, D. Y., Cho, K. J. "Design of the shape memory alloy coil spring actuator for the soft deformable wheel robot", *Internasional Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, IEEE, Vol. 9, hal. 641-642, 2012.
- [7] Ikuta, K., Tsukamoto, M., Hirose, S. "Mathematical Model and Experimental Verivication of Shape Memory Alloy for Designing Micro Actuator", *Proceeding of the IEEE on Micro Electromechanical Systems, an Investigation of Microstructures, Sensors, Actuators, Machines and Robots*, pp- 103.108, 1991.