

KARAKTERISASI SIFAT TERMOFISIKA PADUAN TITANIUM Ti6Al4V

Gusti Umindya Nur Tajalla

Dosen
Institut Teknologi Kalimantan
Program Studi Teknik Material dan
Metalurgi
gusti.unt@lecturer.itk.ac.id

Andi Idhil Ismail

Dosen
Institut Teknologi Kalimantan
Program Studi Teknik Mesin
a.idhil@lecturer.itk.ac.id

Manufacturers are pushed to use superalloys such as titanium alloys in the aerospace part due to environmental and economic issues. The refractory properties of titanium alloys result in rapid and premature wear of the cutting tools, especially by thermal diffusion. Therefore, the purpose of this paper is to focus on understanding the characterization of TiAl6V4 in thermo-physic properties. X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM), electrical resistivity against temperature test, and differential scanning calorimetry (DSC) were conducted to analyze the relationship of phase transformation to thermal properties. Phase analysis showed that TiAl6V4 is composed of two-phase α and β creating a duplex microstructure in which the surface fraction contains about 92,5 % and 7,5 %, respectively. Electrical resistivity against temperature test demonstrated the phase transformation of α to β occurred at 1017°C. This study revealed that the phenomena of phase transformation affected the thermal properties, i.e., thermal capacity, thermal diffusivity, and coefficient of thermal expansion.

Keywords: Characterization, Ti6Al4V, Microstructure, Thermo-Physic Properties

1. PENDAHULUAN

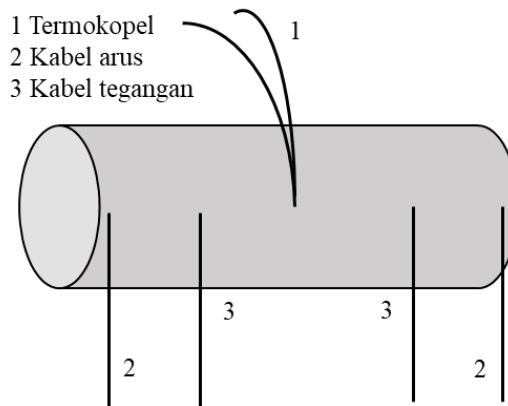
Paduan titanium secara umum memiliki karakteristik termal-fisik dan mekanik yang cocok untuk diaplikasikan di industri aeroangkasa, kesehatan, kimia, dan struktur. Peningkatan penggunaan logam titanium dan paduannya memicu peningkatan volume produksi material tersebut. Namun demikian, titanium memiliki sifat bawaan, yaitu konduktivitas panas rendah dan tangguh yang membatasi proses produksi terutama pada saat proses pemesinan. Fenomena utama yang sering terjadi adalah keausan pahat pemotong yang lebih cepat terjadi. Berbagai upaya dilakukan untuk mengkaji proses pemesinan paduan titanium dengan tujuan yang beragam diantaranya mencari parameter pemesinan optimum yang dapat meningkatkan umur pahat [1] dan memahami proses atau fenomena dasar yang terjadi selama proses pemesinan baik itu dari aspek simulasi [2] hingga eksperimental yang dapat menghasilkan mikrostruktur berbeda [3, 4]. Proses pemesinan paduan titanium dipengaruhi oleh mikrostruktur awal dan parameter-parameter pemesinan yang digunakan [5, 6]. Selama proses pemesinan, gesekan antara *tool* dan material akan mengakibatkan peningkatan temperatur secara drastis yang dapat melebihi temperatur transus beta yang mengakibatkan terjadinya adesi lapisan titanium pada permukaan pahat karbida [7]. Eksperimen merupakan hal yang wajib dilakukan oleh industri agar dapat mengerti perilaku pemesinan titanium dengan tujuan akhir meningkatkan produktivitas. Namun, banyaknya parameter yang terlibat serta kompleksitas faktor-faktor yang berpengaruh mengakibatkan eksperimen biasanya menjadi mahal dan memakan waktu yang lama. Untuk memahami perilaku mekanisme pemesinan titanium, permodelan mengambil peranan penting dalam menganalisa hal tersebut, karena metode ini memiliki beberapa keuntungan terutama dari segi waktu dan biaya. Salah satu parameter dasar yang diperlukan untuk mempelajari perilaku logam titanium adalah sifat-sifat termofisika. Sifat-sifat termofisika sangat tergantung dari berbagai aspek diantaranya mikrostruktur [8], [9], dan unsur paduan [10]. Selama proses produksi, komponen titanium terutama proses produksi yang melibatkan proses jauh dari titik kesetimbangan misalnya peningkatan temperatur secara drastis seperti yang terjadi pada proses pemesinan dan proses produksi menggunakan laser. Sifat-sifat termofisika sangat menentukan perilaku material selama proses tersebut dan juga berkaitan dengan mikrostruktur. Pada proses tersebut temperatur material dapat berubah drastis dari temperatur ruangan menjadi 1000°C atau di atasnya dalam waktu kurang dari dua detik, tergantung dari laju pemakanan dan kecepatan pemotongan [2].

2. METODE DAN BAHAN

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan titanium Ti6Al4V dengan mikrostruktur duplex. Paduan tersebut diproduksi melalui proses casting 600-900°C. Pengamatan difraksi sinar X dilakukan dengan menggunakan mesin difraktometer (Bruker, US). Bentuk-bentuk difraksi diambil dengan menggunakan sumber radiasi tembaga (Cu K α). Perekaman dilakukan dalam rentang sudut 2 θ antara 20° – 90° dengan ukuran langkah 0.01 – 0.03 untuk mempercepat pengukuran. Identifikasi struktur dan fasa dilakukan dengan menggunakan program *powdercell*.

Analisis mikrostruktur dilakukan dengan teknik metalografi dimana material dipoles dalam beberapa tahap menggunakan kertas amplas dengan tingkat kekasaran 240 – 4000. Pemolesan selanjutnya dilakukan dengan memakai suspensi intan polikristal dengan diameter kristal 3 μm dan 1 μm . Tahap akhir pemolesan dilakukan dengan memanfaatkan larutan koloid silika dengan ukuran partikel 0.04 μm untuk mendapatkan kualitas permukaan yang menyerupai cermin.

Teknik pengukuran resistivitas listrik dilakukan untuk menentukan temperatur transformasi fasa. Eksperimen ini menggunakan spesimen berbentuk silinder padat dengan panjang 30 mm dan diameter 0.3 mm. Selain itu, pengukuran resistivitas juga dirangkaikan dengan teknik dilatometri yang diperlukan untuk analisis koefisien ekspansi panas material. Gambar 1 berikut memperlihatkan ilustrasi pengukuran tahanan listrik dan bentuk spesimen yang digunakan.



Gambar 1: Ilustrasi rangkaian pengukuran tahanan listrik

Metode yang digunakan untuk mengukur karakteristik termal-fisik adalah menggunakan *differential scanning calorimetry* (DSC). Teknik tersebut berfungsi untuk mendapatkan nilai kapasitas panas (C_p) dari material. Dalam eksperimen DSC, material dipanaskan sampai temperatur 1050°C dengan kecepatan pemanasan sangat lambat untuk menjaga material dalam kondisi setimbang. Karakteristik difusifitas panas diukur dengan menggunakan *laser flash apparatus* LFA dimana material dengan ketebalan 2 mm dan diameter 12 mm dimasukkan ke dalam ruangan sampel kemudian dipanaskan sampai temperatur 1000°C. Selama pengukuran, gas Argon dialirkan ke dalam ruangan untuk mengurangi kontaminasi yang dapat mempengaruhi difusifitas atom-atom.

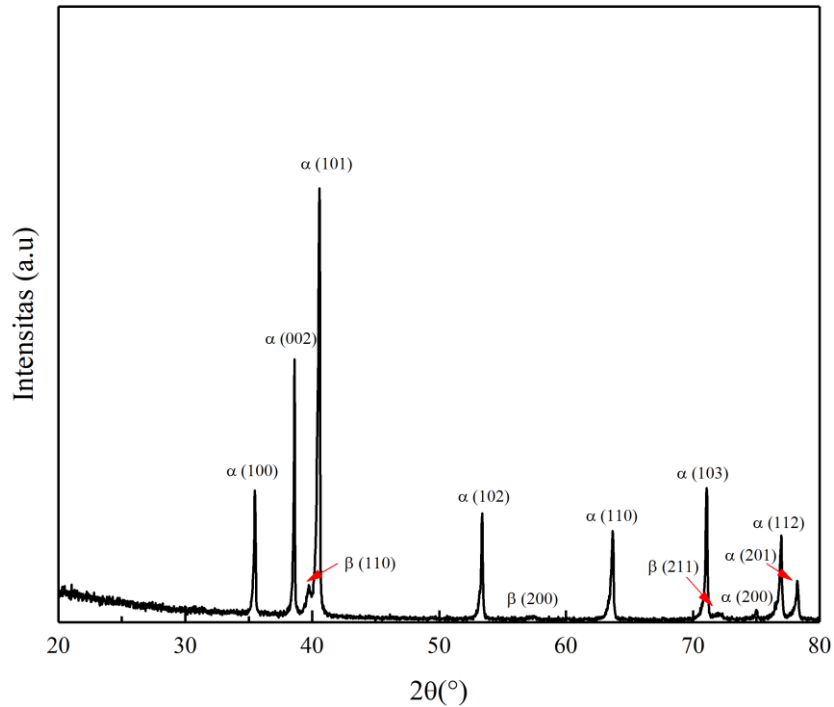
3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Analisis Fasa dan Mikrostruktur

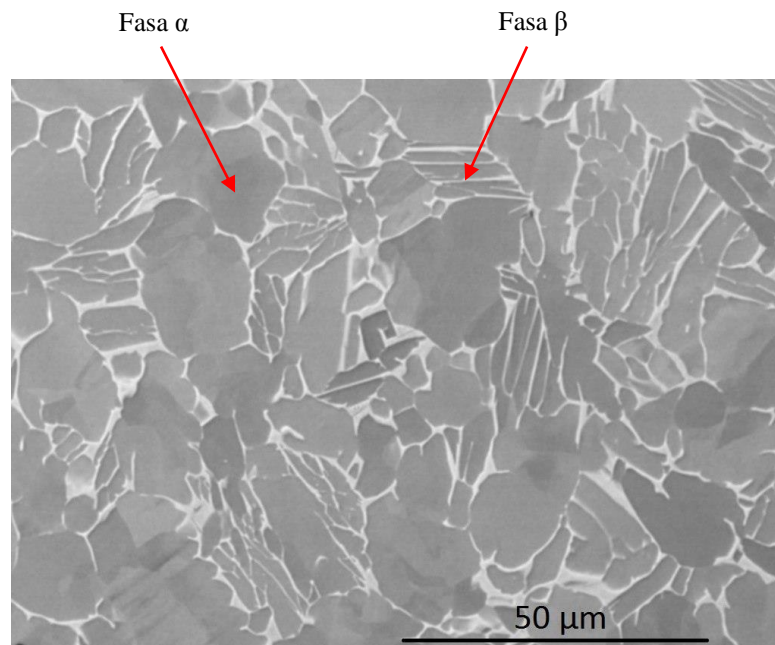
Hasil difraksi paduan titanium ditunjukkan oleh gambar 2. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat adanya fasa alfa (α) dan beta (β) di dalam paduan tersebut. Pada temperatur ruang, dominasi fasa α terlihat dari intensitas puncak difraksi yang tinggi dibanding dengan fasa beta. Selain dari intensitas puncak, analisa Rietveld juga menunjukkan persentase α yang sangat tinggi, yaitu 92,5% dibandingkan dengan β sebesar 7,5%

Mikrostruktur material (*as-received*) dianalisis menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Gambar 3 memperlihatkan mikrostruktur material paduan Ti6Al4V. Ti6Al4V memiliki dua fasa utama, yaitu fasa titanium α dan β . Fasa α ditunjukkan oleh warna abu-abu gelap dan fasa β ditunjukkan oleh warna terang. Perbedaan warna ini dikarenakan kandungan vanadium yang tinggi pada fasa β dibandingkan dengan fasa α . Mode *backscattered electron* (BSE) digunakan di dalam penelitian ini. Mode ini sangat sensitif terhadap massa atom. Semakin berat atom tersebut, efek *backscattering* yang ditimbulkan menyebabkan elektron terpenetrasi lebih dalam. Vanadium memiliki massa atom yang lebih besar (50,94 u) dari aluminium

(26,98 u). Dengan massa atom yang tinggi, volume interaksi dengan elektron semakin tinggi, sehingga warna yang dihasilkan akan menjadi lebih terang. Selain itu, berdasarkan gambar 3 fasa α mempunyai morfologi nodular dan lamela yang dikelilingi oleh fasa β . Fenomena ini menunjukkan bahwa material tersebut memiliki mikrostruktur duplex. Menurut analisa gambar melalui software ImageJ, didapatkan fraksi permukaan sebagai berikut, yaitu α nodular 60%, α lamela 31%, dan fasa β 9%.



Gambar 2: Hasil *x-ray diffraction* (XRD) Ti6Al4V



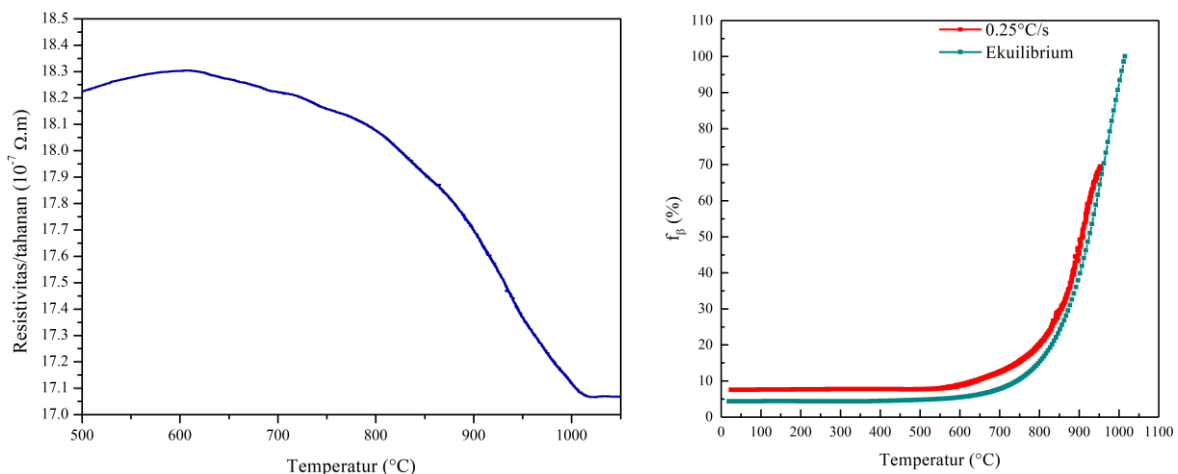
Gambar 3: Mikrostruktur Ti6Al4V

3.2 Temperatur β transus

Temperatur beta transus adalah temperatur dimana terjadi transformasi fasa dari α ke β . Temperatur ini hanya dimiliki oleh paduan titanium yang secara umum hanya memiliki dua jenis fasa, yaitu α dan β . Fasa α bstruktur kristal *body centered cubic* (BCC) dan merupakan fasa temperatur tinggi. Temperatur beta transus dapat dianalisis melalui tahanan listrik dan/atau in-situ difraksi sinar-x. Resistifitas listrik diukur selama

pemanasan yang sangat lambat dengan laju $2^{\circ}\text{C}/\text{detik}$ dari temperatur 20°C hingga 1100°C yang dapat dilihat gambar 4. Dapat diamati melalui gambar grafik tersebut, resistivitas listrik meningkat dari temperatur ruang hingga 400°C . Penurunan hingga 400°C teramati selama proses isothermal selama 1 jam dimana terjadi proses *aging* mikrostruktur terjadi. Hal ini dilakukan untuk desorpsi kandungan oksigen secara maksimum. Ketika temperatur meningkat lagi, resistifitas listrik meningkat lebih tinggi hingga temperatur 600°C . Di atas temperatur 600°C , resistivitas listrik menurun sedikit diikuti dengan penurunan yang tajam pada temperatur yang lebih tinggi. Pada temperatur tinggi, resistifitas listrik meningkat lagi.

Dari pengamatan tersebut, temperatur β transus (T_{β}) dan transformasi $\alpha+\beta$ menjadi β mendekati kondisi equilibrium. Temperatur β transus ditentukan dengan mengambil garis tangen dari kurva di atas pada tahap akhir perubahan. Dalam kasus ini titik transus terjadi pada temperatur sekitar 1017°C . Titik ini juga sebenarnya dipengaruhi oleh laju pemanasan yang dapat mengubah kinetika transformasi fasa seperti yang telah diteliti oleh Wijayanti dkk [11].



Gambar 4: Transus β Ti6Al4V secara ekpermental (kiri) dan perhitungan termodinamika (kanan)

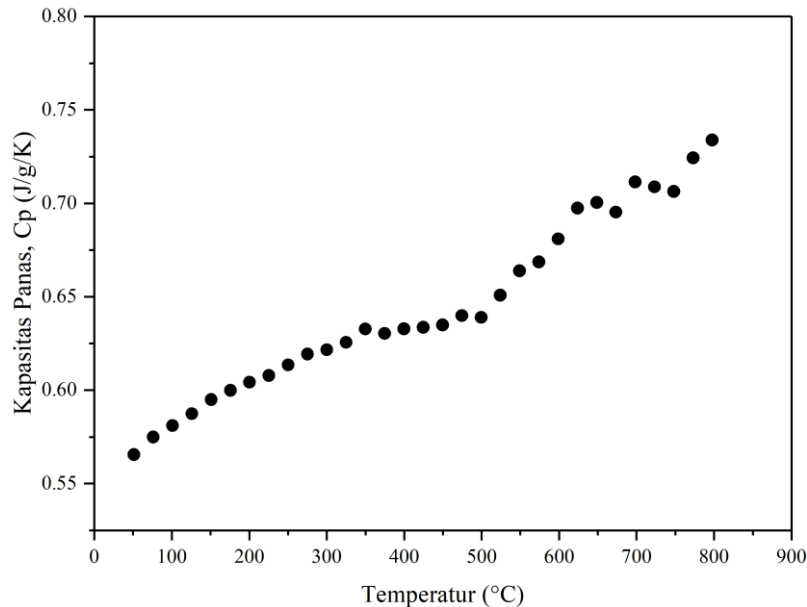
Hal ini juga telah dikonfirmasi melalui perhitungan termodinamika material yang menghasilkan temperatur sekitar 1014°C . Terdapat perbedaan titik transus antara hasil pengukuran resistivitas dan perhitungan termodinamika dalam kondisi setimbang. Hal ini dapat dijelaskan karena adanya perbedaan kandungan oksigen real pada material terukur dan kandungan oksigen yang berada di dalam *database* material untuk perhitungan termodinamika. Dibandingkan dengan literatur yang ada, nilai temperatur transus yang diperoleh dalam penelitian ini hampir sama baik itu dengan hasil perhitungan [12], maupun hasil eksperimen [13, 14]. Seperti telah diketahui, titik transus beta dipengaruhi oleh material stabilisator α dan β . Elemen-elemen stabilisator α seperti oksigen, aluminium akan cenderung meningkatkan temperatur transus, sedangkan elemen-elemen stabilisator β , misalnya besi, vanadium, cenderung menurunkan titik beta transus. Sehingga perbedaan hasil pengukuran titik transus dapat disebabkan oleh perbedaan komposisi elemen-elemen stabilisator α dan β yang terkandung dalam paduan titanium. Perbedaan tersebut sangat mungkin disebabkan oleh kontrol parameter dan lingkungan pada saat pembuatan material.

3.3 Panas spesifik (C_p)

Panas spesifik material menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur sebanyak satu derajat dari satu satuan massa. Gambar 4 menunjukkan transformasi panas spesifik (C_p) Ti6V4Al yang diukur pada temperatur kamar hingga 1050°C . Secara umum, dapat kita lihat bahwa nilai panas spesifik tadi material tersebut cenderung meningkat pada saat mengalami pemanasan. Tren peningkatan tersebut juga dialami oleh paduan titanium yang sudah mengalami perlakuan panas dalam beberapa siklus. Pada temperatur ruang, C_p Ti6V4Al berkisar 0.58 J/g/K [15]. Seiring dengan meningkatnya temperatur, C_p Ti6Al4V meningkat secara linier. Namun, pada temperatur $380, 500$ dan $700\text{-}800^{\circ}\text{C}$, terjadi perubahan kemiringan grafik. Fenomena ini dimungkinkan karena terjadi perubahan fasa selama peningkatan temperatur, terutama pada temperatur antara 700°C dan 900°C yang berhubungan dengan larutnya fasa α . Pada kisaran temperatur ini, nilai C_p dapat diidentifikasi karena pengukurannya mengikutsertakan perubahan entalpi pelarutan. Di atas temperatur Beta transus, nilai C_p lebih rendah dan nilainya dapat dibandingkan dengan nilai C_p pada temperatur rendah.

Jika dibandingkan dengan literatur yang ada, nilai panas spesifik yang didapat dalam penelitian ini

sebanding dengan nilai-nilai yang dilaporkan oleh Boivineau dkk dan Basak dkk [15, 16] terutama untuk domain temperatur rendah, lebih khusus lagi pada nilai yang dilaporkan oleh Basak dkk. Meskipun demikian, Boivineau dkk menunjukkan nilai kapasitas panas yang bervariasi di temperatur antara 450 °C – 600 °C. Variasi tersebut tidak dapat dijelaskan dari sudut pandang transformasi fasa, namun penjelasan empiris yang dapat ditawarkan adalah kapasitas panas dan tahanan listrik sangat tergantung dari rekam jejak perlakuan panas sebuah material. Lebih jauh lagi, perilaku material tersebut dipengaruhi oleh laju pemanasan akibat dari pemanasan berlanjut dari DSC.

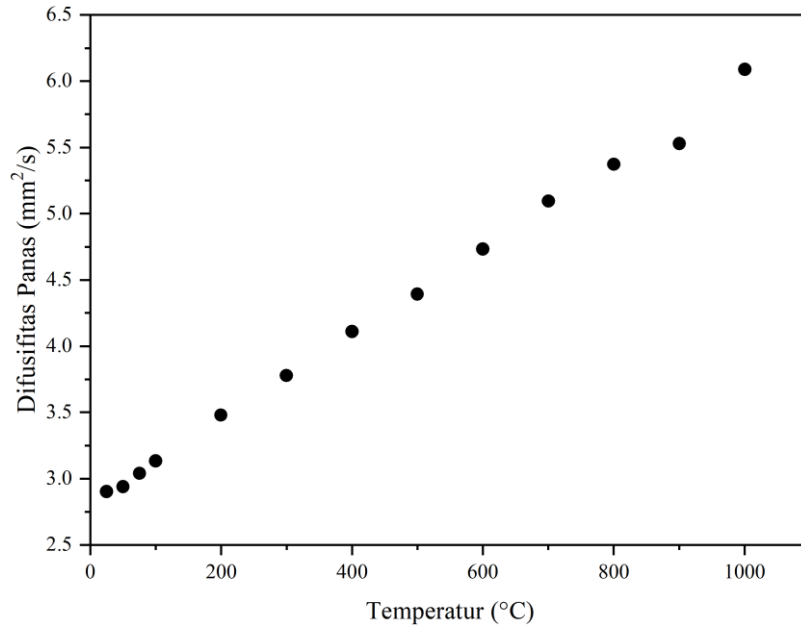


Gambar 5: Panas spesifik (C_p) Ti6Al4V

3.4 Difusifitas panas (D)

Difusifitas panas (D) menunjukkan kemampuan material dalam mentransmisikan panas seiring dengan perubahan temperatur dan waktu. Diffusifitas panas merupakan salah satu karakteristik yang vital pada paduan titanium, karena sifat ini bertanggung jawab dalam transfer panas selama proses pemesinan yang pada akhirnya mempengaruhi keausan pahat pemotong [17, 18]. Saat ini data tentang difusifitas panas material Ti6Al4V belum banyak dilaporkan, sehingga data-data yang menyangkut difusifitas panas biasanya didapatkan melalui perhitungan hubungan antara konduktivitas panas dan panas spesifik [19]. Hasil pengukuran difusifitas termal pada Ti6V4Al dapat dilihat pada Gambar 5. Secara garis besar, paduan titanium menunjukkan karakteristik yang seragam dalam merespon panas. Pada temperatur rendah, nilai D berkisar 2,8 mm²/s dan meningkat hampir linear hingga 1000°C dengan nilai D kira-kira 6,1 mm²/s. Fenomena ini diakibatkan oleh *heat thermal transient* berubah menjadi lebih efektif pada temperatur yang lebih tinggi. Perubahan sedikit pada lereng dapat diamati pada temperatur 900°C. Hal ini dikarenakan adanya perubahan fasa dari α ke β .

Difusifitas panas adalah sifat termodinamika material yang sangat dipengaruhi oleh ragam mikrostruktur, komposisi material, dan rekam jejak pemrosesan yang dilalui. Jika dibandingkan dengan pengukuran difusifitas panas untuk logam titanium murni, pada temperatur 600°C – 700°C, nilai difusifitas panas mencapai 7.5 mm²/s [20], jauh di atas nilai difusifitas Ti6Al4V. Hal ini dapat dipahami karena komposisi paduan Ti6V4Al jauh lebih heterogen. Pada temperatur ruang, difusifitas panas paduan ini juga lebih rendah dibandingkan baja, dimana beberapa kelompok baja seperti SS304 menunjukkan angka difusifitas panas sekitar 3.5 mm²/s. Nilai difusifitas baja akan semakin meningkat apabila kadar komposisi karbon semakin rendah [21, 22]. Untuk menganalisis lebih jauh, difusifitas panas paduan Ti6V4Al juga dapat dibandingkan dengan material paduan nikel yang juga banyak digunakan di industri. Dari referensi yang ada, nilai difusifitas panas antara paduan titanium tidak jauh berbeda dengan angka yang dimiliki oleh paduan super berbasis nikel. Nilai tersebut berkisar antara 2.5 – 3 mm²/s [23]. Di sisi lain, paduan super berbasis nikel juga dikenal memiliki kemampuan mesin buruk, yang juga dimiliki oleh paduan titanium.

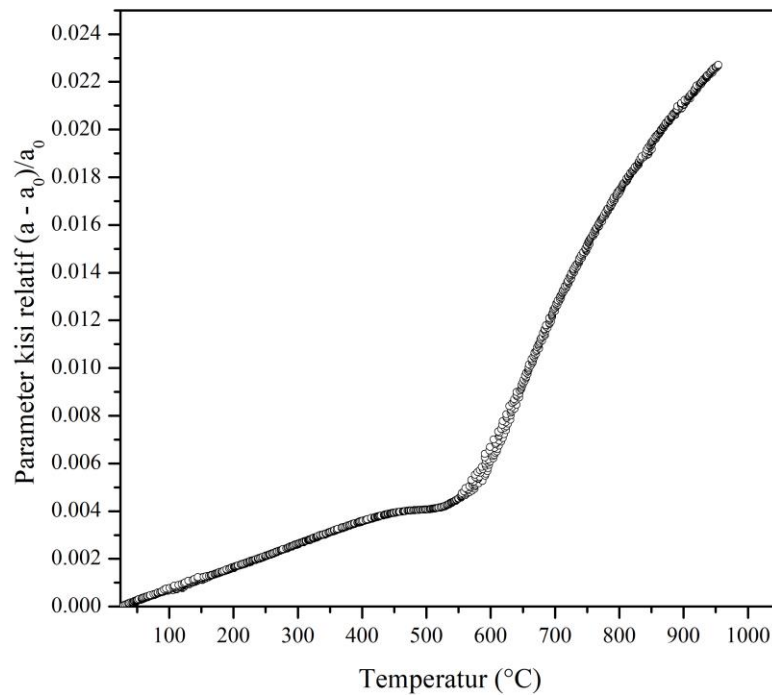


Gambar 6: Difusifitas panas (D) Ti6Al4V

3.5 Koefisien ekspansi panas (α)

Koefisien ekspansi panas adalah salah satu parameter termofisika yang penting dalam pengembangan material. Parameter ini dibutuhkan karena setiap material akan memberikan respon yang berbeda pada saat material tersebut terkena panas. Hal ini mengakibatkan perbedaan perubahan panjang, lebar, luas permukaan, dan volume. Selama pemanasan kontinyu pada $0,25^{\circ}\text{C}/\text{s}$ pada dilatometer, perubahan panjang spesimen dan temperatur dianalisa sebagai fungsi waktu atau temperatur. Gambar 7 di bawah memperlihatkan perubahan panjang parameter kisi untuk fasa alfa pada saat dipanaskan sampai temperatur 1000°C . Jika diperhatikan lebih detail, evolusi panjang kisi akibat pemanasan dapat dibagi menjadi tiga bagian. Pertama, peningkatan panjang kisi terjadi secara gradual sampai pada temperatur sekitar 450°C . Peningkatan ini diikuti oleh plateau dimana parameter kisi menjadi konstan dalam rentan temperatur $450^{\circ}\text{C} - 550^{\circ}\text{C}$. Hal ini dapat diakibatkan oleh relaksasi tegangan internal atau tegangan sisa akibat perlakuan panas sebelumnya [24]. Peningkatan panjang kisi secara drastis terjadi setelah plateau yang dapat diasosiasikan dengan transformasi fasa alfa ke beta. Grafik perubahan parameter kisi dapat digunakan untuk menghitung koefisien ekspansi panas dari paduan titanium. Dari hasil pengukuran tersebut, hal ini dimungkinkan untuk menggambar grafik parameter kisi relatif melalui persamaan sederhana $\Delta a/a_0$ (a_0 adalah parameter kisi awal pada kondisi temperatur ruang) sebagai fungsi temperatur atau waktu.

Grafik regangan dan temperatur paduan Ti6Al4V dapat dilihat pada Gambar 7 pada rentang temperatur ruang hingga 1050°C . Berdasarkan grafik tersebut ekspansi termal selama pemanasan hampir linear hingga temperatur 450°C . Sehingga koefisien ekspansi panas mengikuti persamaan linier $9 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$, sedangkan koefisien ekspansi panas di atas 600°C meningkat signifikan menjadi $5.9 \times 10^{-5} /^{\circ}\text{C}$. Nilai koefisien ekspansi panas pada temperatur rendah sedikit lebih tinggi dibanding dengan nilai yang telah dilaporkan dalam literatur yaitu berkisar antara $8.5 - 8.6 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$. Perlu diketahui bahwa proses perlakuan panas, dan konsekuensinya, mikrostruktur memiliki efek terhadap koefisien ini, sehingga perbedaan antara hasil yang didapatkan dalam penelitian ini dan literatur mungkin disebabkan oleh mikrostruktur. Jika dibandingkan dengan baja, paduan nikel, maka titanium mempunyai koefisien ekspansi panas yang jauh lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa paduan titanium akan memberikan respon yang lambat jika panas diberikan pada material tersebut. Koefisien ekspansi termal meningkat secara kontinyu hingga temperatur 1100°C . Nilai regangan didapat kisaran $1,1 - 1,2\%$. Tidak terdapat perubahan yang signifikan yang terjadi sebelumnya. Dari grafik tersebut juga memperlihatkan koefisien ekspansi panas yang cukup konsisten pada domain temperatur rendah sebelum transformasi fasa terjadi.



Gambar 7: Koefisien ekspansi panas Ti6Al4V

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil melakukan pengukuran dan investigasi terhadap beberapa sifat-sifat termofisika dasar yang dimiliki oleh paduan titanium. Hasil analisis data investigasi memberikan kesimpulan bahwa:

1. Hasil difraksi logam paduan titanium, Ti6Al4V, terdiri dari dua fasa, yaitu α dan β . Hasil observasi visual menunjukkan bahwa fasa α mempunyai fraksi permukaan 91% dan sisanya adalah fasa β . Data ini juga didukung oleh analisa Ritveld.
2. Temperatur transus β didapatkan sebesar 1017°C. Temperatur ini dikonfirmasi melalui teknik pengukuran in-situ difraksi sinar X, tahanan listrik, dan perhitungan termodinamika material dalam kondisi setimbang.
3. Kapasitas panas spesifik dari paduan titanium juga mengalami peningkatan pada saat dipanaskan sampai temperatur di atas 1000 °C. Pada temperatur rendah, nilai C_p adalah 0.58 J/g.K. Pengukuran C_p juga mengungkapkan terjadinya perubahan *slope* pada temperatur sekitar 500°C, 650°C, dan 750°C. Hal ini diakibatkan oleh kinetika dissolusi fasa α ke fasa β .
4. Analisis difusifitas panas juga mengungkapkan terjadinya peningkatan difusifitas pada saat pemanasan. Pengukuran ini juga menginformasikan bahwa difusifitas panas paduan titanium lebih rendah dibanding dengan material-material yang sering digunakan dalam industri terutama baja. Meski demikian, nilai difusifitas panas logam titanium hampir sebanding dengan paduan super berbasis nikel yang juga diketahui memiliki kemampuan permesinan yang sulit.
5. Pengukuran koefisien ekspansi panas menghasilkan nilai $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Terdapat sedikit perbedaan dengan angka koefisien ekspansi panas di literatur, yang diakibatkan oleh perbedaan komposisi dan morfologi mikrostruktur.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. KHANNA and K. S. SANGWAN, "Comparative machinability study on Ti54M titanium alloy in different heat treatment conditions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 227, no. 1, pp. 96-101, 2012.
- [2] A. JAIN, N. KHANNA, and V. BAJPAI, "FE simulation of machining of Ti-54M titanium alloy for industry relevant outcomes," *Measurement*, vol. 129, pp. 268-276, 2018.
- [3] Y. D. SHANE Y. HONG, "Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 41, p. 21, 2001.
- [4] V. KRISHNARAJ, S. SAMSUDEENSADHAM, R. SINDHUMATHI, and P. KUPPAN, "A study on

- High Speed End Milling of Titanium Alloy," *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 251-257, 2014/01/01/2014.
- [5] M. ARMENDIA, A. GARAY, L. M. IRIARTE, and P. J. ARRAZOLA, "Comparison of the machinabilities of Ti6Al4V and TIMETAL® 54M using uncoated WC–Co tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 2, pp. 197-203, 2010.
- [6] R. B. DA SILVA, Á. R. MACHADO, E. O. EZUGWU, J. BONNEY, and W. F. SALES, "Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti–6Al–4V alloy with PCD tools under various coolant pressures," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 8, pp. 1459-1464, 2013.
- [7] R. A. RAHMAN RASHID, S. PALANISAMY, S. SUN, and M. S. DARGUSCH, "Tool wear mechanisms involved in crater formation on uncoated carbide tool when machining Ti6Al4V alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, no. 9-12, pp. 1457-1465, 2015.
- [8] M. LÖBEL, T. LINDNER, T. MEHNER, and T. LAMPKE, "Influence of Titanium on Microstructure, Phase Formation and Wear Behaviour of AlCoCrFeNiTi_x High-Entropy Alloy," *Entropy*, vol. 20, no. 7, p. 505, 2018.
- [9] B. K. JANG and Y. SAKKA, "Influence of microstructure on the thermophysical properties of sintered SiC ceramics," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 463, no. 1-2, pp. 493-497, 2008.
- [10] C.-W. KIM, J.-I. CHO, S.-W. CHOI, Y.-C. KIM, and C.-S. KANG, "The Effect of Alloying Elements on Thermal Conductivity and Casting Characteristic in High Pressure Die Casting of Aluminum Alloy," Cham, 2016, pp. 237-242: Springer International Publishing.
- [11] W. WIJAYANTI, "Identifikasi Efek Heating Rate terhadap Laju Kinetika Reaksi Pirolisis Kayu Mahoni dengan Thermal Analysis dan Termogravimetri," *Rekayasa Mesin; Vol 10, No 1 (2019) DOI - 10.21776/ub.jrm.2019.010.01.9*, 05/30/ 2019.
- [12] E. ROGOFF, M. ANTONY, and P. MARKLE, "Calculating Ti-6Al-4V β Transus Through a Chemistry-Based Equation Derived from Combined Element Binary Phase Diagrams," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 27, no. 10, pp. 5227-5235, 2018.
- [13] J. I. QAZI, J. RAHIM, F. H. FORES, O. N. SENKOV, and A. GENÇ, "Phase transformations in Ti-6Al-4V-xH alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 32, no. 10, pp. 2453-2463, 2001.
- [14] J. W. ELMER, T. A. PALMER, and J. WONG, "In situ observations of phase transitions in Ti–6Al–4V alloy welds using spatially resolved x-ray diffraction," *Journal of Applied Physics*, vol. 93, no. 4, pp. 1941-1947, 2003.
- [15] M. BOIVINEAU *et al.*, "Thermophysical Properties of Solid and Liquid Ti-6Al-4V (TA6V) Alloy," *International Journal of Thermophysics*, vol. 27, no. 2, pp. 507-529, 2006.
- [16] R. A. O. D. BASAK, D. WANG, "Measurement of Specific Heat Capacity and Electrical Resistivity of Industrial Alloys Using Pulse Heating Techniques," *International Journal of Thermophysics*, vol. 24, no. 6, 10 March 2003 2003.
- [17] X. CHUANGWEN, D. JIANMING, C. YUZHEN, L. HUAIYUAN, S. ZHICHENG, and X. JING, "The relationships between cutting parameters, tool wear, cutting force and vibration," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 1, p. 168781401775043, 2018.
- [18] J. C. MINLI ZHENG, ZE LI, WEI ZHANG , PENGFEI LI, HAIHE XIE, "Experimental study on elements diffusion of carbide tool rake face in turning stainless steel," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 12, no. 4, 2018.
- [19] Y. S. KENNETH C. MILLS, ZUSHU LI and ROBERT F. BROOKS, "Equations for the Calculation of the Thermo-physical Properties of Stainless Steel", *ISIJ International*, vol. 44, no. 10, 2004.
- [20] A. SOMER *et al.*, "Effects of thermal oxidation on the effective thermal diffusivity of titanium alloys," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 47, no. 38, p. 385306, 2014.
- [21] A. I. SALAZAR, "On thermal diffusivity," *EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS*, vol. 24, 2003.
- [22] R. H. BOGAARD, P. D. DESAI, H. H. LI, and C. Y. HO, "Thermophysical properties of stainless steels," *Thermochimica Acta*, vol. 218, pp. 373-393, 1993/05/03/ 1993.
- [23] P. N. QUESTED, R. F. BROOKS, L. CHAPMAN, R. MORRELL, Y. YOUSSEF, and K. C. MILLS, "Measurement and estimation of thermophysical properties of nickel based superalloys," *Materials Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 154-162, 2013.
- [24] J. W. ELMER, T. A. PALMER, S. S. BABU, and E. D. SPECHT, "In situ observations of lattice expansion and transformation rates of α and β phases in Ti–6Al–4V," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 391, no. 1-2, pp. 104-113, 2005.