

Kesan Tanpa Masa Pegangan Rawatan Haba ke Atas Sifat Mekanikal dan Mikrostruktur Pembuatan Aditif Aloi Titanium (Ti6Al4V) Melalui Proses Peleburan Laser Selektif (SLM)

(Effect of Zero Holding Time in Heat Treatment on the Mechanical and Microstructure Properties of Additive Manufactured Titanium Alloy (Ti6Al4V) through Selective Laser Melting (SLM) Process)

Farhana Mohd Foudzi^{a,b}, Moey Kah Min^{a,b}, Fathin Iliana Jamhari^{a,b}, Minhalina Ahmad Buhairi^{a,b,c}, Abu Bakar Sulong^{a,b}, Norhamidi Muhamad^{a,b}, Nabilah Afiqah Mohd Radzuan^{a,b}, Izhar Aziz^d & Kim Seah Tan^e

^aAdvanced Manufacturing Research Group, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

^bDepartment of Mechanical and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

^cDoctoral School on Materials Science and Technologies, Óbuda University, Nepszínház u. 8, 1081 Budapest, Hungary

^d3D Gens Sdn Bhd, No 18, Jalan Kerawang U8/108, Bukit Jelutong, 40150 Shah Alam, Selangor, Malaysia

^eOryx Advanced Materials Sdn Bhd, Plot 69(d) & (e), Lintang Bayan Lepas 6, Bayan Lepas Industrial Zone, Phase 4, Bayan Lepas, 11900 Penang, Malaysia

*Corresponding author: farhana.foudzi@ukm.edu.my

Received 8 Jan 2024, Received in revised form 15 March 2024

Accepted 17 April 2024, Available online 30 May 2024

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) or better known as 3D printing is a manufacturing method based on powder metallurgy technology that is able to produce a 3D component. Selective laser melting (SLM) is one of the AM methods capable of producing metal 3D components, however, residual stresses are often produced in such component due to repeated melting and solidification of metal during the printing process. The residual stresses can deteriorate the performance of the 3D components' mechanical properties if not removed or reduced. Heat treatment processes are often used to remove the residual stresses. The basic parameters of heat treatment are heating temperature, heating rate, cooling rate and holding time. Based on the basic parameters, the effect of holding time in heat treatment is still less reported for 3D components printed via SLM. Therefore, in this study, the effect of holding time on the mechanical properties and microstructure of 3D titanium alloy (Ti6Al4V) components was investigated. A total of 9 sets of cubic samples were printed on different processing parameters such as laser power (225W, 275W, 325W), scanning speed (800mm/s, 1100mm/s, 1400 mm/s), layer height (0.3mm) and hatching distance (0.10mm, 0.12mm, 0.14mm). It was found that hardness of 383 - 448 HV was obtained where samples P3, P9 and P5 gave the highest, medium and lowest hardness values. Based on the microstructure observation, $\alpha + \beta$ phase and martensite structures are produced due to the vanadium content of 4% and heat treated at 935°C. A critical review was also studied to compare previous studies that used different holding times on SLM-printed Ti6Al4V 3D components. It was found that different holding times did not have a significant effect on the mechanical properties of Ti6Al4V 3D components where the outcome of previous studies aligns with that of from this study. In addition, past works have also reported that heat treatment is able to lower the residual stresses in SLM-printed Ti6Al4V 3D components. Finally, the effectiveness of heat treatment in reducing the residual stresses in SLM-printed Ti6Al4V 3D components at different printing parameters should also be studied to understand the mechanism of microstructural changes during and after heat treatment.

Keywords: Laser selective melting (SLM); Titanium alloy (Ti6Al4V), Heat treatment; Microstructure; Hardness

Pembuatan aditif (AM) atau lebih dikenali sebagai pencetakan 3D merupakan kaedah pembuatan berasaskan teknologi metalurgi serbuk yang berupaya menghasilkan suatu komponen 3D. Peleburan laser selektif (SLM) adalah salah satu kaedah AM yang berupaya menghasilkan komponen logam 3D, namun, tegasan baki sering terhasil di dalam komponen 3D disebabkan oleh peleburan dan pemejalan logam yang berulang semasa proses percetakan dijalankan. Tegasan baki ini berupaya merosotkan prestasi sifat mekanikal komponen 3D sekiranya tidak dikeluarkan atau dikurangkan. Proses rawatan haba sering digunakan bagi mengeluarkan tegasan baki. Parameter asas rawatan haba adalah suhu pemanasan, kadar pemanasan, kadar penyejukan dan masa pegangan. Berdasarkan parameter pemprosesan rawatan haba, masa pegangan masih kurang dilaporkan bagi komponen 3D yang dicetak melalui SLM. Oleh itu, dalam kajian ini, kesan masa pegangan ke atas sifat mekanikal dan mikrostruktur komponen 3D aloi titanium (Ti6Al4V) dikaji. Sebanyak 9 set sampel kiub yang dicetak pada parameter pemprosesan yang berbeza seperti kuasa laser (225W, 275W, 325W), kelajuan pengimbasan (800mm/s, 1100mm/s, 1400 mm/s), ketinggian lapisan (0.3mm) dan jarak penetasan (0.10mm, 0.12mm, 0.14mm). Didapati julat kekerasan mikro yang diperolehi adalah 383 – 448 HV di mana sampel P3, P9 dan P5 memberikan nilai kekerasan mikro yang tertinggi, sederhana dan terendah. Berdasarkan pemerhatian mikrostruktur, fasa $\alpha + \beta$ serta struktur martensit terhasil disebabkan kandungan vanadium sebanyak 4% dan dirawat haba pada 935°C. Ulasan kritikal juga dilakukan bagi membandingkan kajian lepas yang telah merawat haba komponen 3D Ti6Al4V yang dicetak SLM pada masa pegangan yang berlainan. Didapati masa pegangan yang berbeza tidak memberi kesan yang ketara terhadap sifat mekanikal komponen 3D Ti6Al4V di mana hasil kajian lepas sejajar dengan hasil kajian ini. Di samping itu, kajian lepas juga melaporkan rawatan haba mampu mengurangkan tegasan baki dalam komponen 3D Ti6Al4V yang dicetak SLM. Akhir sekali, keberkesanan rawatan haba dalam mengurangkan tegasan baki dalam komponen Ti6Al4V 3D cetakan SLM pada parameter pencetakan yang berbeza juga perlu dikaji untuk memahami mekanisme perubahan mikrostruktur semasa dan selepas rawatan haba.

Kata kunci: Peleburan laser selektif (SLM); Aloi titanium (Ti6Al4V); Rawatan haba; Mikrostruktur; Kekerasan

PENGENALAN

Pembuatan aditif (AM) juga dikenali sebagai pencetakan 3D di mana ia merupakan suatu kaedah yang mampu menghasilkan komponen 3D yang memiliki geometri yang kompleks (Bandyopadhyay & Heer 2018). Kelebihan menggunakan AM berbanding kaedah pembuatan tradisional dalam bidang metalurgi serbuk seperti tuangan dan pengacuan suntikan adalah ia dapat menjimatkan bahan binaan kerana kaedah ini menggunakan bahan binaan yang diperlukan sahaja. Bagi kaedah pembuatan tradisional seperti pemesinan, pemotongan dan pengisaran, sisa-sisa logam yang terhasil adalah bahan buangan dan tidak dapat digunakan semula (Li et al. 2020). Oleh itu, AM dapat mengurangkan pembaziran kerana tiada sisa atau bahan buangan dihasilkan, malah lebih serbuk AM boleh diguna semula untuk proses pencetakan yang lain (Quintana et al. 2018). Dengan pembangunan teknologi AM, kaedah pembuatan ini telah menarik perhatian sektor perubatan, automotif, dan aeroangkasa (Karami et al. 2020; Wanying et al. 2017). Pada masa kini, proses percetakan 3D menggunakan logam sebagai bahan binaan merupakan kaedah keterhadapan berbanding kaedah AM konvensional yang menggunakan polimer sebagai bahan binaan. Ini disebabkan prestasi logam yang lebih menarik dengan kekuatan dan ketahanan yang lebih tinggi berbanding polimer atau plastik. Pelbagai jenis logam boleh digunakan

dalam bentuk serbuk seperti, keluli tahan karat, kobalt, aluminium dan titanium (M.A. Aripin et al. 2022; Brandt et al. 2013; Yu & Wang 2018).

Bagi proses percetakan AM berasaskan logam, kaedah yang lazim digunakan adalah proses pelakuran laser lapisan serbuk atau lebih dikenali sebagai *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF). Kaedah ini mengedarkan suatu lapisan serbuk logam dengan saiz partikel yang halus ke atas tapak pembinaan dan secara selektif, laser berkuasa tinggi akan mencairkan serbuk logam tersebut membentuk komponen 3D yang dikehendaki. Proses ini akan berulang secara lapisan demi lapisan serbuk logam yang telah diedarkan sehingga komponen 3D selesai dicetak. Terdapat beberapa kaedah di bawah LPBF iaitu Peleburan Laser Selektif atau *Selective Laser Melting* (SLM) dan Peleburan Rasuk Elektron atau *Electron Beam Melting* (EBM) (Milton et al. 2021).

Logam yang digunakan dalam kajian ini adalah aloi titanium (Ti6Al4V). Komposisi kimia Ti6Al4V adalah 90% titanium, 6% aluminium, 4% vanadium, 0.25% besi dan 0.2% oksigen. Ciri-ciri yang memberi Ti6Al4V sering digunakan adalah seperti kekuatan yang tinggi, modulus keanjalan yang rendah, rintangan hakisan dan calar yang tinggi, kebolehan kimpalan dan sifat mekanikal yang boleh dikawal dengan rawatan haba (Agius et al. 2018). Oleh itu, Ti6Al4V sering dijadikan sebagai bahan binaan dalam AM. Kekerasan aloi titanium juga tinggi berbanding aloi logam yang lain disebabkan oleh penambahan aluminium (Al) dan

vanadium (V). Ti6Al4V adalah antara bahan mentah titanium yang sering dikaji sifat mekanikalnya seperti ketumpatan, kemuluran, ketahanan hakisan dan kesesuaian digunakan dalam SLM. Kebolehan penggunaan pada suhu operasi yang tinggi dan tegasan yang tinggi membolehkan bahan ini sering digunakan. Kebolehan bahan Ti6Al4V untuk menghasil produk yang ringan dan kuat telah membuatnya sangat sesuai digunakan dalam industri automatif, perubatan dan aeroangkasa. Contoh kegunaannya bahan ini adalah dalam turbin gas, bingkai kapal terbang dan dalam pembuatan prostetik. Sifat mekanikal sesuatu bahan saling berkait rapat dengan mikrostruktur. Oleh itu, nisbah, saiz dan susunan fasa α dan β melalui pemerhatian mikrostruktur Ti6Al4V memainkan peranan penting dalam mendapatkan prestasi mekanikal yang dikehendaki (Reda et al. 2015). Ti6Al4V yang gred 23 telah digunakan dalam kajian ini merujuk kepada kandungan oksigen yang rendah di mana ia sesuai bagi aplikasi perubatan (Reda et al. 2013).

Merujuk kepada kajian Do & Li (2016), komponen 3D Ti6Al4V yang dicetak SLM mempunyai kekerasan mikro (Vickers) yang lebih tinggi iaitu sebanyak 392HV – 452HV berbanding komponen yang sama yang dihasilkan dengan kaedah pembuatan konvensional dengan nilai 375HV (Liu et al. 2020). Walaupun fasa martensit dapat meningkatkan sifat kekerasan, tetapi ia dapat juga akan mengurangkan kemuluran komponen 3D tersebut. Kekerasan aloi Ti6Al4V yang dicetak SLM mampu meningkat dengan penggunaan tenaga laser yang lebih tinggi semasa proses pencetakan dijalankan. Jangkaan ini disebabkan oleh apabila input tenaga yang lebih tinggi digunakan, keliangan yang dihasilkan adalah lebih rendah dan ukuran beroti martensit yang lebih besar akan dihasilkan. Berdasarkan kajian Hutasoit et al. (2018), beliau menyatakan rawatan haba pada suhu 850°C (suhu di bawah suhu transformasi transus β) selama 2 jam ke atas komponen SLM yang dirawat melalui relau biasa (sampel B) dan melalui relau argon (sampel C). Pada suhu ini, penguraian fasa α' ke $\alpha + \beta$ akan berlaku. Sekiranya rawatan haba kurang dari suhu ini dijalankan, hanya sebahagian kecil fasa α' jejarum yang bertukar dan mengakibatkan campuran fasa $\alpha' + \alpha + \beta$ terhasil. Campuran mikrostruktur fasa $\alpha + \beta$ ini akan menyumbang kepada tegangan akhir (UTS) dan kekerasan yang lebih rendah, namun kemuluran yang lebih tinggi.

Yan et al. (2018) telah membuat kajian kesan suhu rawatan haba yang berbeza ke atas kekerasan komponen SLM yang dicetak pada parameter pemprosesan seperti kuasa laser 280W, jarak penetasan 0.05mm, ketinggian lapisan pada 0.05mm dan kelajuan pengimbasan pada 1200mm/s. Berdasarkan pemerhatian mikrostruktur, komponen SLM tersebut mengandungi fasa martensit fasa α' dengan nilai kekerasan sekitar 385HV. Melalui kajian beliau, trend kekerasan yang diperoleh adalah 367 HV pada

suhu rawatan haba 800°C, menurun ke 344HV pada suhu rawatan haba 900°C dan kemudian meningkat ke nilai kekerasan tertinggi iaitu 421HV pada 1080°C. Dengan peningkatan suhu, martensit fasa α berubah menjadi fasa β sehingga melebihi suhu transus (T_β) iaitu dalam sekitar suhu 955°C sehingga 1020°C. Keseluruhan struktur akan terdiri daripada suhu tinggi fasa β (Reda et al. 2013) (Jovanović et al. 2006). Aloi titanium Ti6Al4V yang mempunyai fasa $\alpha + \beta$ mempunyai julat fasa (Lin et al. 2003). Fasa dari batas fasa α dengan $\alpha + \beta$ sehingga ke persimpangan garis M_s dengan suhu bilik, sehingga aloi $\alpha + \beta$ berubah menjadi martensit pada penyejukan pantas dari suhu martensit fasa β sehingga suhu bilik. Struktur lamela dapat dibentuk dengan penyejukan dalam kadar yang rendah dari fasa β (Keshava Murthy dan Sundaresan 1998). Kewujudan transformasi α dan β bermaksud bahawa pelbagai mikrostruktur dan kombinasi sifat dapat dicapai dalam aloi titanium Ti6Al4V melalui rawatan haba sehingga memperolehi sifat yang diperlukan keatas aplikasi baru (Reda, Nofal, & A.H. Hussein 2013).

Komponen Ti6Al4V yang dicetak oleh SLM mempunyai ketumpatan, kekuatan tegangan yang tinggi manakala kemuluran yang lebih rendah berbanding komponen Ti6Al4V yang dihasilkan melalui proses pembuatan konvensional. Ini disebabkan mikrostruktur martensit fasa α' jejarum yang terhasil akibat kadar penyejukan kolam peleburan yang tinggi (Yang et al. 2016), dan peningkatan suhu proses pencetakan semasa proses SLM dijalankan (Mugwagwa et al. 2018). Oleh itu, rawatan haba perlu dijalankan ke atas komponen Ti6Al4V yang dicetak SLM bagi menghasilkan struktur martensit yang sekata. Perubahan struktur martensit fasa α' kepada fasa $\alpha + \beta$ dapat mengurangkan tegasan baki yang terhasil dalam proses pencetakan SLM (Vrancken et al. 2012). Liu et al. (2020) melaporkan pada permukaan planar-S, Ti6Al4V menunjukkan ira teturus martensit fasa β yang kasar di sepanjang arah pembinaan dengan lebar ira kira-kira 200 μm . Ira teturus didapati selari antara satu sama lain. Ira fasa β didapati saling menghalang dalam bijiran-bijiran lain. Kejadian ini disebabkan oleh kadar penyejukan yang cepat dalam proses pencetakan SLM, komponen yang dicetak mempunyai perbezaan kecerunan terma yang besar semasa proses pencetakan SLM (Wang et al. 2015). Kejadian ini akan menghasilkan sebilangan besar jejarum α/α' yang halus dengan lebar ira kira-kira 1.0 μm . Ira teturus fasa β awal terdiri daripada martensit fasa α' dalam struktur kristalnya. Mikrostruktur ini dapat dikaitkan dengan input tenaga yang tinggi atau lebih dikenali sebagai ketumpatan tenaga semasa proses pencetakan SLM dijalankan. Dalam proses SLM, kadar pepadatan yang mampu mencapai adalah sebanyak $10^2 - 10^6$ K/S di mana isu pepadatan ini mampu diselesaikan melalui pertumbuhan *epitaxial* (Lin et al. 2003).

Daripada kajian Vrancken et al. (2012), masa pegangan pada suhu tinggi boleh mempengaruhi pertumbuhan ira. Masa pegangan yang lebih lama akan menyebabkan pertumbuhan ira menjadi lebih besar. Kedua-dua fasa α dan β akan menjadi lebih kasar dan akan saling menghalang pertumbuhan ira. Kesan ini akan berkurangan apabila suhu rawatan haba meningkat menghampiri suhu transus β . Vrancken et al. (2012) juga telah mengkaji kesan masa pegangan rawatan haba yang berbeza iaitu dari 2 jam sehingga 20 jam pada suhu rawatan haba sebanyak 940°C. Suhu 940°C berada di bawah transus β . Didapati, pada masa pegangan yang panjang, ira globular mulai tumbuh di beberapa lokasi dan ira jejarum yang lebih panjang dan lebar dapat dilihat berbanding mikrostruktur yang dipegang masa selama 2 jam. (Stefansson et al. 2002) telah melaporkan untuk mencapai 50% fasa globular pada suhu 955°C, masa pegangan selama 8 jam diperlukan.

Yan et al. (2018) telah mengkaji kesan suhu rawatan haba yang berbeza ke atas mikrostruktur yang dihasilkan di bawah suhu transus β . Didapati, pada suhu rawatan 800°C, keseragaman mikrostruktur adalah lebih baik berbanding mikrostruktur tanpa rawatan haba. Sementara itu, lebar ira teturus tidak berubah setelah dirawat haba pada suhu 800°C dengan saiz ira didapati lebih kurang 100 μ m. Di samping itu, mikrostruktur ini terutamanya terdiri daripada martensit α' yang bukan sehalus seperti yang dibina dan tersembunyi di antara fasa $\alpha + \beta$ yang lebih stabil. Hasil rawatan haba pada suhu ini juga tidak memberi perubahan yang ketara ke atas ukuran dan morfologi ira. Bagi sampel yang telah dirawat haba pada suhu 900°C, jarum halus dari struktur martensit telah berubah dalam campuran fasa $\alpha + \beta$, di mana fasa α dikenali sebagai corak lath dan beberapa ira globular. Untuk sampel yang dirawat haba pada suhu 920°C, mikrostruktur yang terdiri daripada platelet fasa α' dalam matrik $\alpha + \beta$, dan sempadan ira β yang sedikit dapat dilihat. Platelet fasa α' ini berubah menjadi campuran fasa $\alpha + \beta$ pada suhu rawatan ini. Bagi sampel yang dirawat pada suhu 950°C, platelet α' menjadi lebih halus dan pendek. Martensit fasa α akan menjadi lebih kasar dan signifikan pada suhu rawatan haba yang lebih tinggi, sama seperti yang dilaporkan oleh Vrancken et al. (2012).

Vrancken et al. (2014) melaporkan bahawa tegasan baki dalam komponen Ti6Al4V yang dicetak oleh SLM dihasilkan pada arah pembinaan yang berbeza iaitu xz, zx dan xy. Didapati tegasan baki merupakan faktor utama dalam tingkah laku anisotropik bahan yang dihasilkan oleh SLM. Vrancken juga menyatakan bahawa pengaruh sifat terma dalam komponen dicetak SLM adalah kompleks tanpa mengira parameter pemprosesan dan juga strategi pengimbasan. Kajian oleh Yadroitsava et al. (2015) menyatakan disebabkan SLM, komponen yang dicetak mempunyai beberapa keunikan iaitu anisotropi sifat

mekanikal, kekasaran permukaan tinggi, dan komplikasi saluran bersaiz kecil. Kecerunan suhu tinggi yang terhasil daripada ketumpatan tenaga yang tinggi menyebabkan tegasan baki yang tinggi terhasil. Tegasan baki yang dihasilkan semasa proses percetakan SLM boleh menyebabkan pengubahan bentuk pada bahagian komponen yang dicetak, persempadanan semula dan retakan untuk terhasil semasa proses menanggalkan komponen yang selesai dicetak dari platform pembinaan.

Tegasan baki yang paling ketara adalah tegasan baki yang bervariasi di seluruh bahagian komponen 3D yang dikenali sebagai tegasan baki jenis I, dan bukannya yang berlaku pada tahap atom (Mercelis & Kruth 2006). Seperti yang dijelaskan dalam kajian Mercelis dan Kruth, dan Knowles (Knowles et al. 2012), tegasan baki ini boleh berkembang semasa proses percetakan disebabkan pengembangan dan pengecutan antara lapisan yang dihasilkan oleh pemanasan dan penyejukan semasa percetakan berlaku. Kesan tegasan baki dalam komponen Ti6Al4V yang dicetak SLM juga banyak dilaporkan (Jamhari et al. 2023; Leuders et al. 2013; Shiomi et al. 2004; Simonelli et al. 2014; Srinivas & Babu 2017) Kajian-kajian ini telah melaporkan bahawa pembentukan tegasan baki adalah bergantung dengan parameter pengimbasan laser. Manakala Klingbeil et al. (2002) menunjukkan bahawa geometri komponen juga boleh memainkan peranan penting dalam penghasilan tegasan baki dalam sesebuah komponen. Dalam kajian (Casavola et al. 2009), didapati tegasan baki yang berbeza boleh terhasil mengikut ketebalan komponen 3D yang dicetak.

Walau bagaimanapun, terdapat kemungkinan bahawa tegasan baki boleh mampu dikurangkan semasa proses pencetakan dijalankan. Sebagai contoh, langkah pengurangan penghasilan tegasan baki telah dicadangkan oleh Ali et al. (2017) dimana beliau mencadangkan peningkatan suhu pemanasan serbuk bahan binaan iaitu dengan mengurangkan suhu secara efektif kecerunan terma. Ada juga yang melaporkan bahawa simulasi numerik pada pemindahan haba boleh diggunakan untuk menambah baik strategi pengimbasan supaya dapat dioptimumkan untuk mengurangkan tegasan baki dalam pembuatan SLM untuk Ti6Al4V (Masoomi et al. 2017).

Lantas sejajar dengan dapatan hasil kajian yang lepas, untuk kajian ini, kaedah SLM digunakan untuk menghasilkan komponen 3D aloi titanium Ti6Al4V. Kajian lepas banyak melaporkan kesan masa pegangan rawatan haba yang digunakan, namun kurang melaporkan kesannya ke atas sifat mekanikal dan juga mikrostruktur sekiranya masa pegangan tidak digunakan. Parameter pemprosesan bagi proses percetakan diubahsuai bagi memastikan komponen 3D yang dihasilkan berkualiti dan tidak mempunyai sebarang kecacatan. Merujuk kepada tegasan baki yang sering terhasil semasa pencetakan komponen

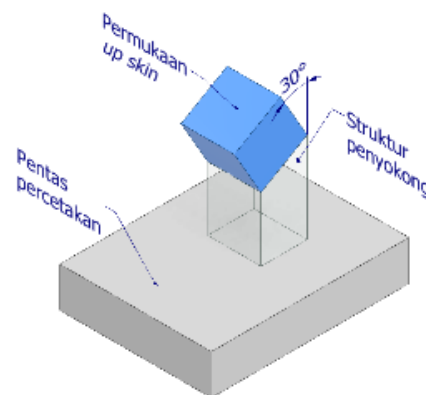
3D Ti6Al4V melalui kaedah SLM, kesan masa pegangan ke atas sifat mekanikal khususnya kekerasan dan mikrostruktur dikaji.

METODOLOGI

Serbuk aloi titanium Ti6Al4V gred 23 dengan julat saiz zarah antara 25 μm hingga 60 μm telah digunakan dalam kajian ini. Pencirian yang lebih teliti terhadap serbuk aloi titanium telah dilaporkan dalam kajian terdahulu (Foudzi et al. 2022). Komposisi kimia Ti6Al4V mengandungi 90% titanium, 6% aluminium, 4% vanadium, 0.25% besi dan 0.2% oksigen. Kelebihan Ti6Al4V seperti kekuatan baik, rintangan kakisan tinggi, modulus keanjalan rendah,

kebolehan rawat haba menjadikan Ti6Al4V salah satu bahan pembuatan aditif yang sering digunakan dalam SLM.

Sampel kiub dengan isipadu 1cm³ dalam kajian ini telah dicetak pada sembilan (9) set parameter pemprosesan yang berlainan. Sampel ini dicetak menggunakan mesin SLM 280^{HL} yang dimiliki oleh Contraves Advanced Devices Sdn. Bhd. Rajah 1 menunjukkan sudut dan arah pembinaan sampel kiub. Struktur sokongan yang berongga perlu digunakan bagi membantu pemegangan sampel dan juga penyebaran haba semasa proses pencetakan dijalankan. Sudut pembinaan yang sesuai sebanyak 30° telah dikenalpasti. Sudut ini adalah untuk mendapatkan pencetakan yang paling baik yang mampu memberi kesan tegasan baki yang terbaik dengan penggunaan perisian (Aripin et al. 2022).



RAJAH 1. Permukaan dan sudut yang digunakan

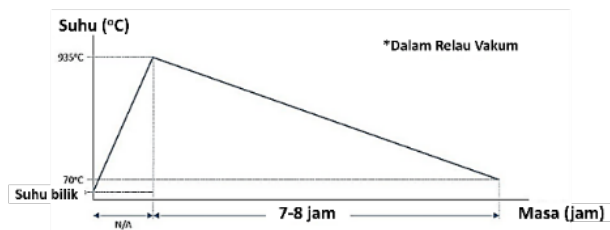
Parameter pemprosesan yang lazim digunakan bagi proses SLM adalah terdiri dari kuasa laser (W), kelajuan pengimbasan (mm/s), jarak hac (mm) dan ketinggian lapisan. Kesemua parameter pemprosesan ini berkait rapat dalam memberikan nilai ketumpatan tenaga (J/mm^3) yang sesuai supaya sampel 3D yang berkualiti tinggi dapat dihasilkan. Bagi memvariasikan parameter pemprosesan, kaedah DOE Taguchi L_9 telah digunakan dimana sembilan

(9) set parameter pemprosesan telah dibangunkan (Rajah

2). Kaedah ini mampu menjimatkan bahan binaan yang digunakan selain dari mampu mengkaji kesan dan pengoptimuman secara menyeluruh. (Agboola et al. 2020; Arifin et al. 2017; Foudzi et al. 2020). Sampel yang telah dicetak SLM kemudiannya telah dirawat haba menggunakan relau vakum dengan persekitaran gas Argon pada suhu 935°C tanpa masa pegangan. Rajah 3 menunjukkan profil rawatan haba yang digunakan dalam kajian ini.

Sampel	Kuasa laser (W)	Ketinggian lapisan (mm)	Kelajuan pengimbasan (mm/s)	Jarak Penetasan (mm)	Ketumpatan tenaga (J/mm^3)
P1	225	0.03	800	0.10	93.75
P2	275	0.03	1100	0.12	69.44
P3	325	0.03	1400	0.14	55.27
P4	325	0.03	1100	0.10	98.48
P5	225	0.03	1400	0.12	44.64
P6	275	0.03	800	0.14	81.85
P7	275	0.03	1400	0.10	65.48
P8	325	0.03	800	0.12	112.85
P9	225	0.03	1100	0.14	48.70

RAJAH 2. Parameter pemprosesan



RAJAH 3. Profil rawatan haba tanpa masa pegangan

KEKERASAN MIKRO

Ujian kekasaran mikro (Vickers) ini dijalankan dengan menggunakan mesin Zwick Roell (medel ZHV μ) yang berada di makmal ZWICK, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia. Setiap sampel diuji menggunakan peralatan yang sama untuk mendapatkan nilai kekerasan yang jitu. Kekerasan setiap sampel kiub 1cm³ Ti6Al4V telah diukur sebanyak 9 kali pada posisi kiri, tengah dan kanan permukaan 'upskin'. Beban yang digunakan dalam kajian ini adalah 300g dengan masa pelekukan selama 15s.

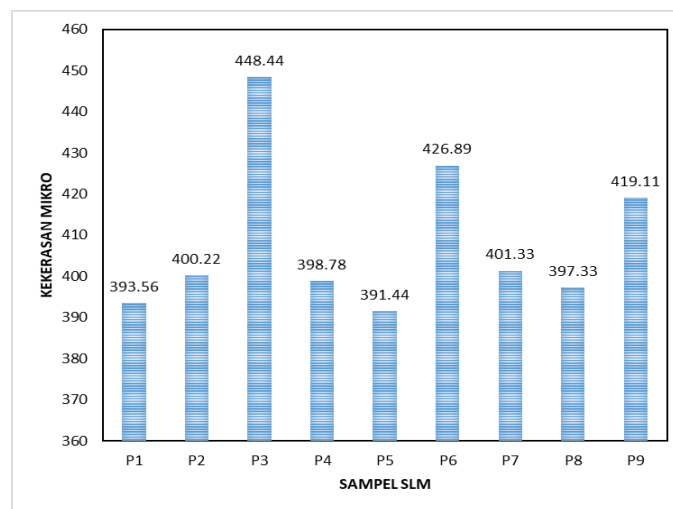
MIKROSTRUKTUR

Ujian mikrostruktur dijalankan dengan menggunakan mikroskop optik (Olympus model BX51) yang berada di makmal Metalografi, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia. Setiap sampel dari 9 set parameter pemprosesan telah melalui proses pencanaan dan penggilapan sehingga proses punaran bagi mendapatkan pemerhatian mikrostruktur yang terbaik. Pemerhatian mikrostruktur juga dijalankan pada permukaan sampel yang sama seperti ujikaji kekerasan iaitu permukaan 'upskin'.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

KEKERASAN MIKRO

Rajah 4 menunjukkan hasil dapatan ujikaji kekerasan pada setiap set parameter pemprosesan (P1 – P9). Didapati, P3 mempunyai nilai kekerasan yang tertinggi sebanyak 448.44HV berbanding P5 dengan purata kekerasan yang terendah sebanyak 391.44HV.

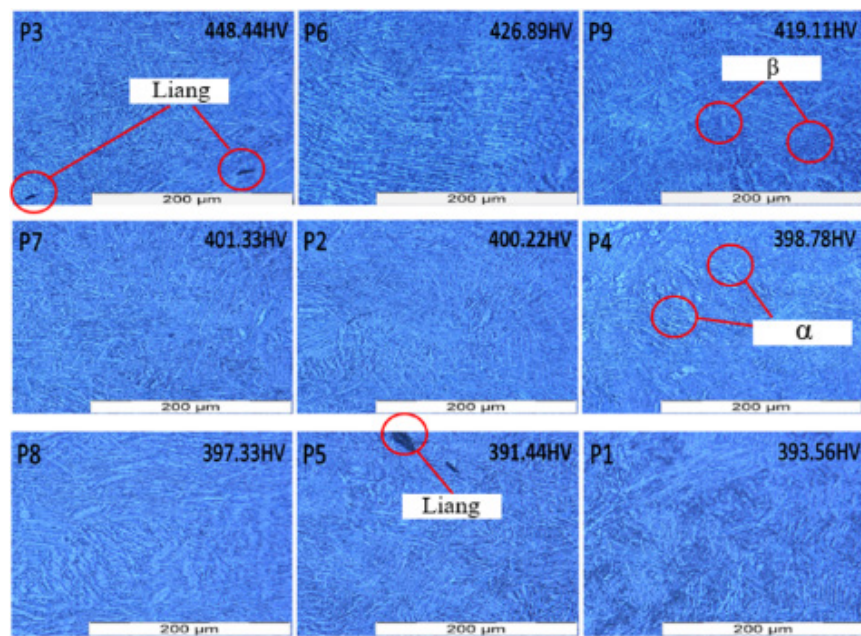


RAJAH 4. Purata kekerasan mikro pada setiap set parameter pemprosesan (P1 – P9)

MIKROSTRUKTUR

Rajah 5 pula menunjukkan pemerhatian mikrostruktur untuk setiap sampel (P1-P9). Didapati, semua mikrostruktur menunjukkan kewujudan fasa $\alpha + \beta$ dimana pemerhatian tersebut sejajar dengan hasil dapatan kajian lepas yang menjalankan rawatan haba pada suhu 935°C. Selain itu, kewujudan fasa yang sama pada setiap set P adalah disebabkan oleh kandungan vanadium sebanyak 4%. Ini bermakna walaupun tiada masa pegangan dikenakan semasa proses rawatan haba, campuran α dan β masih mampu dihasilkan. Mikrostruktur di dalam Rajah 4 juga

disusun dari nilai kekerasan tertinggi ke nilai kekerasan terendah. Berdasarkan susunan kekerasan ini, didapati walaupun P3 mempunyai liang yang mampu merosotkan nilai kekerasan, namun disebabkan pembetulan martensit yang lebih ketara, P3 tetap mempunyai nilai kekerasan yang tertinggi berbanding sampel P yang lain. Selain daripada itu, kekerasan juga berkait rapat dengan komposisi fasa β di mana komposisi tersebut didapati semakin berkurangan seperti yang ditunjukkan oleh mikrostruktur P1. Didapati, fasa α lebih mendominasi berbanding fasa β , dimana nilai kekerasan yang terendah diperolehi.



RAJAH 5. Pemerhatian mikrostruktur mengikut nilai kekerasan tertinggi (P3) ke nilai kekerasan terendah (P1)

KESIMPULAN

Ujikaji kekerasan dan juga analisa mikrostruktur ke atas komponen 3D aloi titanium (Ti6Al4V) berbentuk kiub yang telah dirawat haba pada suhu 935°C tanpa dikenakan sebarang masa pegangan telah berjaya dikaji. Didapati, fasa $\alpha + \beta$ dan juga struktur martensit masih berjaya dihasilkan walaupun tiada masa pegangan yang dikenakan. Pemerhatian mikrostruktur ini juga sejajar dengan hasil dapatan kajian lampau yang menggunakan parameter pemprosesan, bahan dan suhu rawatan haba yang sama. Julat kekerasan yang diperolehi adalah sebanyak 393HV – 448HV.

Berdasarkan ulasan kritikal, tegasan baki tidak dapat dielakkan sepenuhnya semasa proses pencetakan SLM dijalankan disebabkan peleburan dan penyejukan logam yang berulang. Namun, tegasan baki dapat dikurangkan semasa proses pencetakan dijalankan dengan beberapa strategi seperti pemanasan platform pembinaan. Parameter pemprosesan seperti kuasa laser, jarak penetasan, kelajuan pengimbasan, dan ketinggian lapisan bergantung kepada saiz komponen 3D yang dicetak kerana ia memainkan peranan besar dalam mempengaruhi pembentukan tegasan baki yang terhasil.

Selain dari suhu rawatan haba yang digunakan bagi mengurangkan tegasan baki, masa pegangan juga dilihat mampu mengurangkan tegasan baki tersebut. Menurut kebanyakan kajian lampau, semakin lama masa pegangan

dikenakan, semakin banyak tegasan baki yang dapat dikeluarkan. Masa pegangan yang banyak dilaporkan adalah selama 8 jam bagi mendapatkan prestasi komponen 3D yang baik. Sekiranya masa pegangan lebih dari 8 jam dikenakan, kecacatan mampu terhasil di dalam komponen 3D tersebut.

PENGHARGAAN

Penghargaan buat Pusat Pengurusan Penyelidikan & Instrumentasi (CRIM) Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) melalui Geran Universiti Penyelidikan (GUP) dengan kod projek GUP-2021-015 dan juga Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia (MOHE) melalui dana geran Fundamental Research Grant Scheme (FRGS) dengan kod projek (FRGS/1/2019/TK03/UKM/02/5) kerana telah memberi sokongan kewangan bagi melengkapkan projek ini. Selain itu, penghargaan juga diberikan kepada 3D Gens Sdn Bhd dan Oryx Advanced Materials Sdn Bhd di atas bantuan kemudahan dan kepakaran untuk melengkapkan projek ini.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada

RUJUKAN

- Amir Arifin, Gunawan, Irsyadi Yani, Muhammad Yanis & Raka Pradifta. 2017. Optimization of stir casting method of aluminum matrix composite (AMC) for the hardness properties by using taguchi method. *Jurnal Kejuruteraan* 29(1): 35–39.
- Agboola, O., Ikubanni, P., Adeleke, A., Adediran, A.A., Adesina, O.S., Aliyu, S.J. & Olabamiji, T.S. 2020. Optimization of heat treatment parameters of medium carbon steel quenched in different media using taguchi method and grey relational analysis. *Heliyon* 6(7).
- Agius, D., Kourousis, K.I. & Wallbrink, C. 2018. A review of the as-built SLM Ti-6Al-4V mechanical properties towards achieving fatigue resistant designs. *Metals* 8(75): 1–25.
- Aripin Mohammad Azlan, Zainuddin Sajuri, Syarif Junaidi, Amirhossein Baghdadi & Intan Fadhlina Mohamed. 2022. Evaluation of microstructure and porosity for 3D printed stainless steel. *Materials Today: Proceedings* 66: 3082–3086.
- Aripin Mohammad Azlan, Zainuddin Sajuri, Nashrah Hani Jamadon, Amirhossein Baghdadi, Syarif Junaidi, Intan Fadhlina Mohamed & Ahmad Muhammad Aziz. 2022. Effects of build orientations on microstructure evolution, porosity formation, and mechanical performance of selective laser melted 17-4 ph stainless steel. *Metals* 12(11): 1968.
- Bandyopadhyay, A. & Heer, B. 2018. Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: Reports* 129: 1–16.
- Brandt, M., Shoujin Sun, Leary, M., Feih, S., Elambasseril, J. & Qiachu Liu. 2013. High-value SLM aerospace components: From design to manufacture. *Advanced Materials Research* 633: 135–147.
- Casavola, C., Campanelli, S.L. & Pappalettere, C. 2009. Preliminary investigation on distribution of residual stress generated by the selective laser melting process. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 44(1): 93–104.
- Farhana Mohd Foudzi, Minhalina Ahmad Buhairi & Fatin Iliana Jamhari. 2020. Influence of processing parameters of selective laser melting (SLM) on additive manufactured titanium alloy (Ti6Al4V). *Proceedings of Mechanical Engineering Research Day 2020* (December): 55–57.
- Farhana Mohd Foudzi, Minhalina Ahmad Buhairi & Fatin Iliana. 2022. Pencirian dan perbandingan serbuk aloi titanium (Ti6Al4V) yang digunakan dalam peleburan laser selektif (SLM). *Sains Malaysiana* 51(6): 1885–1894.
- Fathin Jamhari, Farhana Mohd Foudzi, Minhalina Ahmad Buhairi, Abu Bakar Sulong, Nabilah Afiqah Mohd Radzuan, Norhamidi Muhamad, Intan Fadhlina Mohamed et al. 2023. Influence of heat treatment parameters on microstructure and mechanical performance of titanium alloy in LPBF: A brief review. *Journal of Materials Research and Technology* 24: 4091–4110.
- Fulin Liu, Chao He, Yao Chen, Hong Zhang, Qingyuan Wang & Yongjie Liu. 2020. Effects of defects on tensile and fatigue behaviors of selective laser melted titanium alloy in very high cycle regime. *International Journal of Fatigue* 140.
- Haider Ali, Le Ma, Hassan Ghadbeigi & Kamran Mumtaz. 2017. In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering A* 695: 211–220.
- Jingjing Yang, Hanchen Yu, Jie Yin, M. Gao, Zemin Wang & Xiaoyan Zeng. 2016. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting. *Materials and Design* 108: 308–318.
- Jovanović, M.T., Tadić, S., Zec, S., Mišković, Z. & Bobić, I. 2006. The effect of annealing temperatures and cooling rates on microstructure and mechanical properties of investment cast Ti-6Al-4V alloy. *Materials and Design* 27(3): 192–199.
- Karami, K., Blok, A., Weber, L., S.M. Ahmadi, Petrov, R., Nikolic, K., Borisov, E.V. et al. 2020. Continuous and pulsed selective laser melting of Ti6Al4V lattice structures: Effect of post-processing on microstructural anisotropy and fatigue behaviour. *Additive Manufacturing* 36: 101433.
- Keshava M.K. & Sundaresan, S. 1998. Phase transformations in a welded near- α titanium alloy as a function of weld cooling rate and post-weld heat treatment conditions. *Journal of Materials Science* 33(3): 817–826.
- Khoa Do & Peifeng Li. 2016. The effect of laser energy input on the microstructure, physical and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys by selective laser melting. *Virtual and Physical Prototyping* 11(1): 41–47.
- Klingbeil, N.W., Beuth, J.L., Chin, R.K. & Amon, C.H. 2002. Residual stress-induced warping in direct metal solid freeform fabrication. *International Journal of Mechanical Sciences* 44(1): 57–77.
- Knowles, C.R., Becker, T.H. & Tait, R.B. 2012. Residual stress measurements and structural integrity implications for selective laser melted Ti-6Al-4V. *South African Journal of Industrial Engineering* 23(2): 31–39.
- Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H.A. & Maier, H.J. 2013. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue* 48: 300–307.
- Liu Wanying, Lin Yuanhua, Chen Yuhai, Shi Taihe & Ambrish Singh. 2017. Effect of different heat

- treatments on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V titanium alloy. *Rare Metal Materials and Engineering* 46(3): 634–639.
- Mengze Li, Yang Yang, Iacopi, F., Nulman, J. & Chappel-Ram, S. 2020. 3D-printed low-profile single-substrate multi-metal layer antennas and array with bandwidth enhancement. *IEEE Access* 8(99): 217370–217379.
- Mercelis, P. & Kruth, J.P. 2006. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* 12(5): 254–265.
- Milton, S., Rigo, O., LeCorre, S., Morandea, A., Siriki, R., Bocher, P. & Leroy, R. 2021. Microstructure effects on the machinability behaviour of Ti6Al4V produced by selective laser melting and electron beam melting process. *Materials Science and Engineering A* 823.
- Mugwagwa, L., Dimitrov, D., Matope, S. & Yadroitsev, I. 2018. Influence of process parameters on residual stress related distortions in selective laser melting. *Procedia Manufacturing* 21: 92–99.
- Novana Hutasoit, S.H. Masood, K.S. Pogula, M.A.H Shuva & M.A. Rhamdhani. 2018. Tensile properties of vacuum heat-treated Ti6Al4V alloy processed by selective laser melting. *International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy* 377(1): 1–9.
- Quintana, O.A., Alvarez, J., Mcmillan, R., Tong, W. & Tomonto, C. 2018. Effects of reusing Ti-6Al-4V Powder in a selective laser melting additive system operated in an industrial setting. *JOM* 70(9): 1863–1869.
- Reham Reda, Abdel-Hamid Hussein, A. Nofal, M. Sobih & El-Sayed M. El-Banna. 2015. Effect of welding processes and postweld heat treatment on the mechanical properties of Ti-6Al-4V castings. *International Journal of Materials Engineering and Technology* 13(1): 1–21.
- Reham Reda, Adel A. Nofal, A. & Abdel-Hamid A. Hussein. 2013a. Effect of quenching temperature on the mechanical properties of cast Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science, Engineering* 2(1): 48–54.
- Reham Reda, Adel A. Nofal. & Abdel-Hamid A. Hussein. 2013b. Effect of single and duplex stage heat treatment on the microstructure and mechanical properties of cast Ti-6Al-4V alloy. *Metallography, Microstructure, and Analysis* 2(6): 388–393.
- Shiomi, M., Osakada, K., Nakamura, K., Yamashita, T. & Abe, F. 2004. Residual stress within metallic model made by selective laser melting process. *CIRP Annals: Manufacturing Technology* 53(1): 195–198.
- Simonelli, M., Tse, Y.Y. & Tuck, C. 2014. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V. *Materials Science & Engineering A* 616: 1–11.
- Srinivas, M. & Babu, B.S. 2017. A critical review on recent research methodologies in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings* 4(8): 9049–9059.
- Stefansson, N., Semiatin, S.L. & Eylon, D. 2002. The kinetics of static globularization of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* 33(11): 3527–3534.
- Tao Wang, Yanyan Zhu, S.Q. Zhang, H.B. Tang & H.M Wang. 2015. Grain morphology evolution behavior of titanium alloy components during laser melting deposition additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds* 632: 505–513.
- Vrancken, B., Cain, V., Knutsen, R. & Van Humbeeck, J. 2014. Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting. *Scripta Materialia* 87: 29–32.
- Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. & Humbeeck, J. Van. 2012. Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds* 541: 177–185.
- Xianglong Yu & Lianfeng Wang. 2018. T6 heat-treated AlSi10Mg alloys additive-manufactured by selective laser melting. *Procedia Manufacturing* 15: 1701–1707.
- Xin Lin, Yanmin Li, Meng Wang, Liping Feng, Jing Chen & Weidong Huang. 2003. Columnar to equiaxed transition during alloy solidification. *Science in China, Series E: Technological Sciences* 46(5). DOI:10.1360/02ye0337.
- Xingchen Yan, Shuo Yin, Chaoyue Chen, Chunjie Huang, Bolot, R., Lupoi, R., Min Kuang et al. 2018. Effect of heat treatment on the phase transformation and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds* 764: 1056–1071.
- Yadroitsava, I., Grewar, S., Hattingh, D. & Yadroitsev, I. 2015. Residual stress in SLM Ti6Al4V alloy specimens. *Materials Science Forum* 828–829: 305–310.