

Pencirian dan Perbandingan Serbuk Aloi Titanium (Ti6Al4V) yang Digunakan dalam Peleburan Laser Selektif (SLM)

(Characterisation and Comparison of Titanium Alloy (Ti6Al4V) Powders Used in Selective Laser Melting (SLM))

FARHANA MOHD FOUZDI*, FATHIN ILIANA JAMHARI & MINHALINA AHMAD BUHAIRI

Jabatan Kejuruteraan Mekanikal dan Pembuatan, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

Diserahkan: 28 Ogos 2021/Diterima: 30 Oktober 2021

ABSTRAK

Ciri serbuk aloi titanium (Ti6Al4V) yang digunakan dalam pembuatan aditif logam (MAM) amat penting dalam menjamin mutu produk yang dihasilkan. Salah satu teknologi dalam MAM adalah Peleburan Laser Selektif (SLM). Mesin pencetakan SLM telah dibangunkan oleh beberapa syarikat seperti SLM Solutions Group AG dan Renishaw PLC. Bagi menjamin kualiti produk mesin masing-masing, setiap syarikat menghasilkan serbuk logam tersendiri. Hal ini membataskan potensi penggunaan SLM kerana pengguna tidak boleh menggunakan serbuk logam mereka sendiri. Maka, kajian ini bertujuan untuk mengkaji perbezaan antara serbuk Ti6Al4V yang dihasilkan oleh SLM Solutions dan Renishaw, dan juga menentukan ciri serbuk Ti6Al4V yang sesuai untuk kaedah SLM. Pencirian sampel serbuk telah dilakukan bagi mengkaji bentuk dan saiz zarah, rencaman kimia dan struktur kristalografi. Sampel serbuk Ti6Al4V daripada SLM Solutions dan Renishaw masing-masing ditandakan sebagai S1 dan S2. Analisis SEM menunjukkan sampel S2 mempunyai bentuk sfera yang lebih sempurna berbanding sampel S1. Analisis rencaman kimia menunjukkan kedua-dua sampel mempunyai taburan unsur kimia yang serupa dengan nilai kajian lampau. Selain itu, analisis taburan saiz zarah menunjukkan saiz zarah S1 dan S2 adalah kurang daripada 45 µm dengan nilai tersebut masih dalam lingkungan yang boleh diterima dalam MAM iaitu 10 hingga 60 µm. Analisis XRD menunjukkan kedua-dua sampel mempunyai puncak keamatan dan struktur kristal berbentuk heksagon yang serupa. Diharapkan makalah ini dapat dijadikan panduan bagi mereka yang ingin menghasilkan sendiri serbuk Ti6Al4V bagi penggunaan proses fabrikasi SLM.

Kata kunci: Peleburan laser selektif (SLM); pencirian serbuk logam; Ti6Al4V

ABSTRACT

Properties of titanium alloy (Ti6Al4V) powder used in Metal Additive Manufacturing (MAM) is critical to finished product's performance. MAM technologies include Selective Laser Melting (SLM) method. Several companies in the industry, including SLM Solutions Group AG and Renishaw PLC, have developed the SLM printing machine. To guarantee the quality of their goods, the companies created their own unique Ti6Al4V powders. Due to end-users not permitted to utilise their own powders, the potential for SLM usage is limited. Thus, the aim of this study was to compare the Ti6Al4V powders made by SLM Solutions and Renishaw, and determine the suitable range of Ti6Al4V powder properties needed for SLM method. Powder samples were characterised to determine their particle shape and size, chemical composition, and crystal structure. The Ti6Al4V powders from SLM Solutions and Renishaw are denoted as S1 and S2, respectively. SEM analysis showed that S2 sample contains nearly spherical particles compared to S1. Analysis of chemical composition showed that both samples correspond to previously reported values. Moreover, the particle size distributions of both samples are within the permissible range of MAM which is 10 to 60 µm. XRD analysis proved that both samples have the same Bragg's peaks and hexagonal crystal structure. It is hoped that this article may help those who aim to manufacture their own Ti6Al4V powders for SLM fabrication method.

Keywords: Powder characterisation; selective laser melting (SLM); Ti6Al4V

PENGENALAN

Proses penghasilan serbuk logam yang hendak digunakan dalam pembuatan aditif logam (MAM) adalah berbeza dengan serbuk logam yang dihasilkan melalui proses

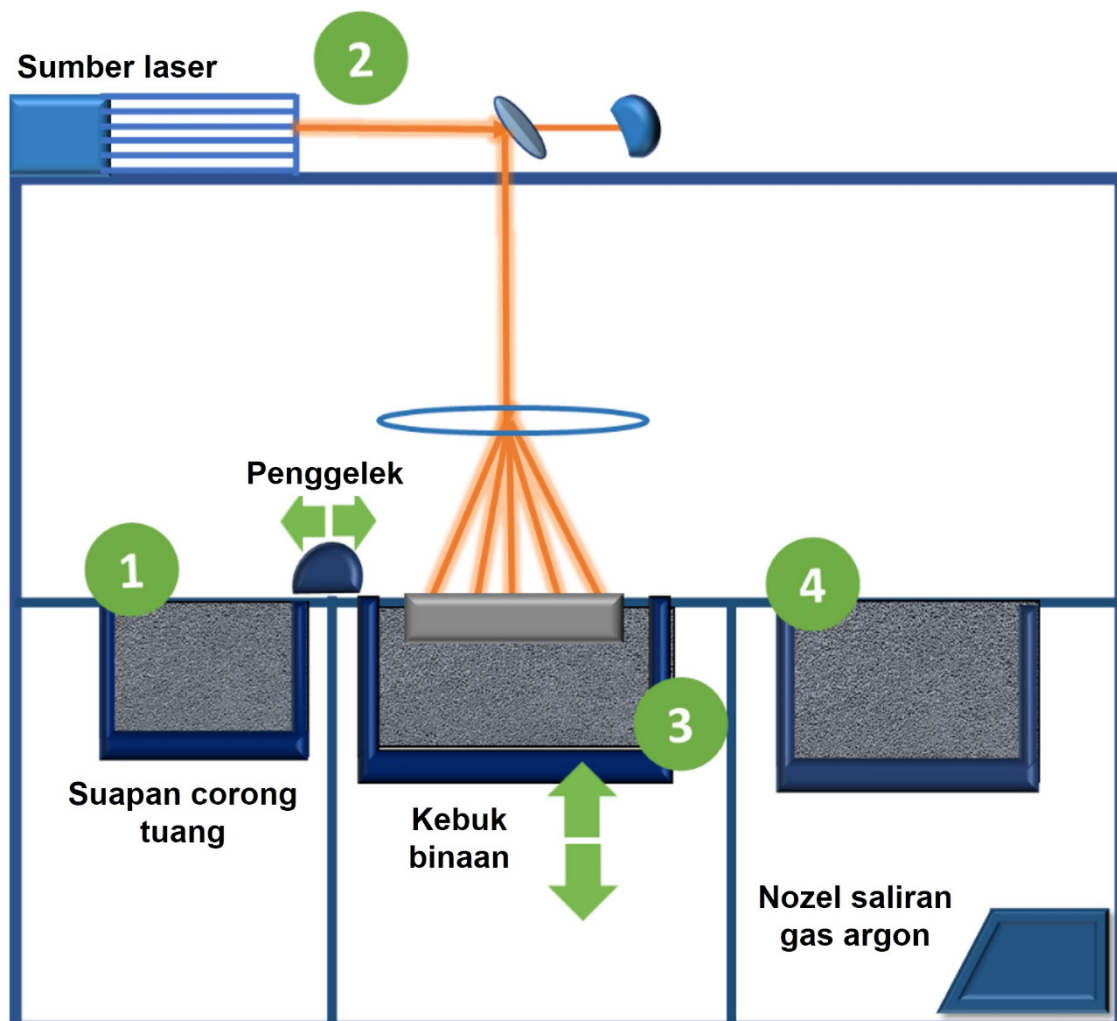
metalurgi serbuk (PM). Serbuk yang digunakan dalam proses MAM haruslah mengandungi ketumpatan yang tinggi untuk memastikan zarah yang terserak di dalam lapisan serbuk (*powder bed*) adalah tumpat (Qian 2015).

Untuk menghasilkan lapisan serbuk yang mempunyai ketumpatan yang tinggi, bentuk dan saiz zarah perlu dikawal supaya masa aliran serbuk dapat dikurangkan. Selain itu, pemadatan zarah dapat diperbaiki dengan mengecilkan taburan saiz zarah supaya geseran di antara zarah dapat dikurangkan dan seterusnya pengedaran ruang zarah dalam lapisan serbuk dapat dimaksimumkan (Herzog et al. 2016). Zarah serbuk MAM selalunya adalah lebih halus, mempunyai pengedaran saiz zarah yang lebih sempit, bentuk zarah yang hampir sfera dan mempunyai permukaan yang rata berbanding serbuk proses PM (Sutton et al. 2016).

PELEBURAN LASER SELEKTIF (SLM)

Salah satu teknologi fabrikasi di dalam MAM adalah

Peleburan Laser Selektif (SLM). SLM merupakan satu kaedah yang menggunakan sinar laser untuk meleburkan serbuk logam lapisan demi lapisan. Kaedah ini menggunakan reka bentuk berbantu komputer (CAD) untuk mencetak produk logam 3D dalam pembuatan berbantu komputer (CAM). Mesin SLM merangkumi pelantar binaan, tangki bekalan serbuk logam, unit pengendapan, sumber tenaga (laser) dan nozel gas argon (Wysocki et al. 2017). Mesin ini dapat dilihat pada Rajah 1 yang diolah daripada kajian lampau (Majumdar et al. 2018; Wysocki et al. 2017). Kelebihan kaedah SLM merangkumi kecekapan kos pembuatan, penjimatan bahan, ketepatan produk mengikut reka bentuk dan juga kemudahan pembuatan bahan logam.



RAJAH 1. Skematik mesin SLM mengandungi komponen seperti (1) suapan corong tuang, (2) sumber laser, (3) kebuk binaan dan pelantar binaan dan (4) tangki kutipan serbuk

Antara mesin pencetakan SLM yang lazim digunakan dalam industri ialah SLM 280HL yang dibangunkan oleh syarikat SLM Solutions dan RenAM 500 yang dibangunkan oleh syarikat Renishaw. SLM 280HL mampu meningkatkan produktiviti dalam pembuatan komponen logam disebabkan kebuk binaannya yang lebih besar berbanding RenAM 500 (SLM Solutions Group AG 2021). Selain itu, mesin ini juga menggunakan teknologi *Powder Sieving Machine* (PSM) yang dapat meningkatkan kepelbagaian jenis logam yang boleh digunakan tanpa menjejaskan

kualiti dan ketulenan serbuk. Mesin ini juga mampu menghasilkan produk dalam masa yang pantas kerana mesin ini dilengkapi dengan beberapa sistem laser untuk peleburan logam. Manakala, mesin RenAM 500 dilengkapi dengan ciri-ciri unik seperti kawalan aliran udara yang pintar dan pengurusan bahan serbuk logam yang terkawal (Renishaw PLC 2019). Selain itu, mesin ini mengandungi teknologi perisian kawalan proses bersepadu dan penginderaan yang bersambung. Gabungan teknologi pintar ini dapat memudahkan kawalan dan pengendalian proses peleburan. Perbandingan kedua-dua mesin ini dapat diteliti dalam Jadual 1.

JADUAL 1. Perbandingan antara mesin pencetakan SLM 280HL dan RenAM 500 (Renishaw PLC 2019; SLM Solutions Group AG 2021)

Aspek	SLM 280HL	RenAM 500
Pengeluar	SLM Solutions	Renishaw
Saiz kebuk binaan (mm)	280 × 280 × 365	250 × 250 × 350
Maksimum isi padu binaan (L)	27.44	21.88
Jenis laser	Gentian optik IPG laser (400-700W) gelombang berterusan	Gentian optik Yttrium OEM laser (500W) gelombang termodulat
Diameter pancaran laser (μm)	80 - 115	75
Kelajuan imbasan maksimum (m/s)	10	7
Dimensi mesin (mm)	4150 × 1200 × 2525	2165 × 2130 × 1236
Parameter lalai peleburan	Kelajuan imbasan: 1100 mm/s Kuasa laser: 275 W Ketebalan lapisan: 30 μm Jarak lorekan: 10 μm	Kelajuan imbasan: 1200 mm/s Kuasa laser: 200 W Ketebalan lapisan: 40 μm Jarak lorekan: 60 μm
Harga mesin (RM)	2 - 4.1 juta	2.5 - 2.9 juta

SERBUK Ti6Al4V UNTUK SLM

Antara serbuk logam yang selalu digunakan untuk fabrikasi SLM adalah aloi titanium (Ti6Al4V). AloI Ti6Al4V merupakan aloi alfa-beta yang mengandungi 6% aluminium (Al) dan 4% vanadium (V). AloI Ti6Al4V merupakan aloi yang sering digunakan dalam industri aeroangkasa, marin, jana kuasa dan luar pesisir. Sifat aloi ini yang mempunyai kekuatan yang tinggi serta berat

yang ringan, menjadikan aloi ini antara pilihan utama dalam pengeluaran massa (DebRoy et al. 2018). Selain itu, Ti6Al4V merupakan aloi yang mudah dikimpal dan difabrikasi, mempunyai ketahanan suhu yang tinggi sehingga 800 °C, mempunyai nisbah kekuatan-ke-berat yang tinggi dan mempunyai modulus anjal yang rendah (Ramli et al. 2018). Sifat mekanikal komponen Ti6Al4V yang difabrikasi oleh SLM Solutions dan Renishaw dapat

dilihat dalam Jadual 2. Perbezaan sifat mekanikal yang dilihat disebabkan oleh parameter pemprosesan dan parameter rawatan suhu yang berbeza digunakan. Kajian yang dijalankan oleh penulis telah berjaya mendapatkan keputusan kekerasan yang tinggi iaitu julat kekerasan sebanyak 378 HV hingga 477 HV (Foudzi et al. 2021). Nilai ini jauh lebih tinggi daripada nilai teori kekerasan Ti6Al4V iaitu 350 HV (Zuback & DebRoy 2018). Hal ini disebabkan oleh nilai ketumpatan tenaga isi padu

yang dipengaruhi oleh empat parameter asas MAM iaitu kuasa laser, kelajuan imbasan, ketebalan lapisan dan jarak penetasan (Foudzi et al. 2020). Didapati nilai kekerasan yang tinggi dapat diperoleh sekiranya nilai ketumpatan tenaga isi padu berada dalam julat 65 hingga 113 J/mm³. Julat ini didapati mencukupi untuk meleburkan serbuk sepenuhnya dan pelakuran tidak lengkap dapat dielakkan. Pelakuran tidak lengkap berupaya untuk menghasilkan lompong atau liang yang tidak diinginkan dan ia mampu merosotkan prestasi kekerasan.

JADUAL 2. Sifat mekanikal komponen Ti6Al4V yang difabrikasi oleh SLM Solutions dan Renishaw (Renishaw 2017; SLM Solutions group AG 2001)

Sifat mekanikal	SLM Solutions	Renishaw
Kekuatan tegangan (MPa)	958	1087
Pemanjangan (%)	13.5	15
Modulus Young (GPa)	123	127.5
Kekerasan Vickers (HV)	307	370

Terdapat dua cara untuk menghasilkan serbuk Ti6Al4V untuk kegunaan proses SLM iaitu pengabusan gas (GA) dan pengabusan plasma (PA) (Sun et al. 2016). GA mempunyai pelbagai kelebihan seperti dapat menghasilkan serbuk dengan kualiti metalurgi yang sangat baik, mempunyai kadar aliran serbuk yang tinggi, boleh menghasilkan aloi baru dan aloi yang diubah suai serta kos proses yang agak rendah berbanding proses lain (Dawes et al. 2015). Namun begitu, serbuk yang dihasilkan oleh proses GA mempunyai ciri serbuk yang berbeza bergantung kepada pembekal serbuk (Dawes et al. 2015). Selain itu, kaedah PA juga boleh menghasilkan serbuk yang mempunyai sifat metalurgi yang tinggi. Kaedah ini mempunyai kadar aliran serbuk yang lagi tinggi berbanding kaedah GA dan kaedah ini sangat sesuai untuk menghasilkan serbuk daripada bahan aloi yang reaktif dan mempunyai titik lebur yang tinggi (Dawes et al. 2015). Hanya terdapat beberapa pembekal sahaja yang menggunakan proses ini kerana kos proses yang agak tinggi.

Oleh kerana serbuk yang dihasilkan melalui proses PM tidak sesuai untuk digunakan dalam proses MAM, industri MAM harus menghasilkan serbuk logam dengan ciri-ciri serbuk tersendiri. Satu kajian lampau telah menyenaraikan beberapa ciri serbuk logam seperti bentuk,

taburan saiz, ketumpatan lapisan serbuk, kebendaliran, penyerapan kelembapan dan kestabilan kimia (Haferkamp et al. 2021). Ciri-ciri ini dilaporkan akan memberi kesan secara langsung kepada sifat mekanikal komponen yang dihasilkan. Bagi menjamin kualiti dan ketulenan serbuk logam, setiap pengeluar mesin SLM membekal serbuk logam khas untuk digunakan bersama mesin pencetakan mereka. Sehubungan dengan itu, makalah ini ditulis untuk membuat perbandingan antara serbuk logam Ti6Al4V yang dihasilkan oleh SLM Solutions dan Renishaw. Bentuk dan saiz zarah, rencaman kimia, taburan saiz zarah dan struktur kristalografi serbuk Ti6Al4V telah dianalisis di dalam kajian ini dengan tujuan untuk memberi panduan bagi mereka yang ingin menghasilkan serbuk Ti6Al4V sendiri untuk kegunaan fabrikasi SLM.

BAHAN DAN KAEDAH

Dua jenis serbuk Ti6Al4V yang dikaji dalam makalah ini ialah serbuk Ti6Al4V-ELI yang dihasilkan oleh SLM Solutions dan Renishaw. Sampel serbuk daripada SLM Solutions diberi nama S1 dan sampel ini merupakan serbuk logam yang digunakan untuk mesin SLM 280HL. Manakala, sampel serbuk daripada Renishaw pula diberi nama S2 dan digunakan untuk mesin RenAM 500. Kedua-

dua sampel diperoleh daripada syarikat tempatan, S1 diperoleh daripada Syarikat Contraves Advanced Devices Sdn. Bhd. manakala S2 diperoleh daripada Syarikat 3D Gens Sdn. Bhd. Sampel S1 dihasilkan melalui proses GA dan sampel S2 dihasilkan melalui proses PA.

Proses GA merupakan satu cara yang sering digunakan untuk menghasilkan serbuk logam, dengan didihan lebur logam dialirkan ke dalam kebuk melalui muncung sebelum dipecahkan menggunakan aliran gas lengai seperti argon atau nitrogen. Aliran gas lengai itu akan mengeraskan lebur logam tadi dan zarah sfera dapat dikumpulkan di bahagian bawah kebuk. Proses PA pula merupakan proses yang melibatkan bahan logam dalam bentuk dawai. Dawai logam tersebut dimasukkan ke bahagian atas mesin pengabus sebelum dicairkan menggunakan obor plasma. Didihan lebur logam yang jatuh akan mengeras dan menghasilkan zarah sfera.

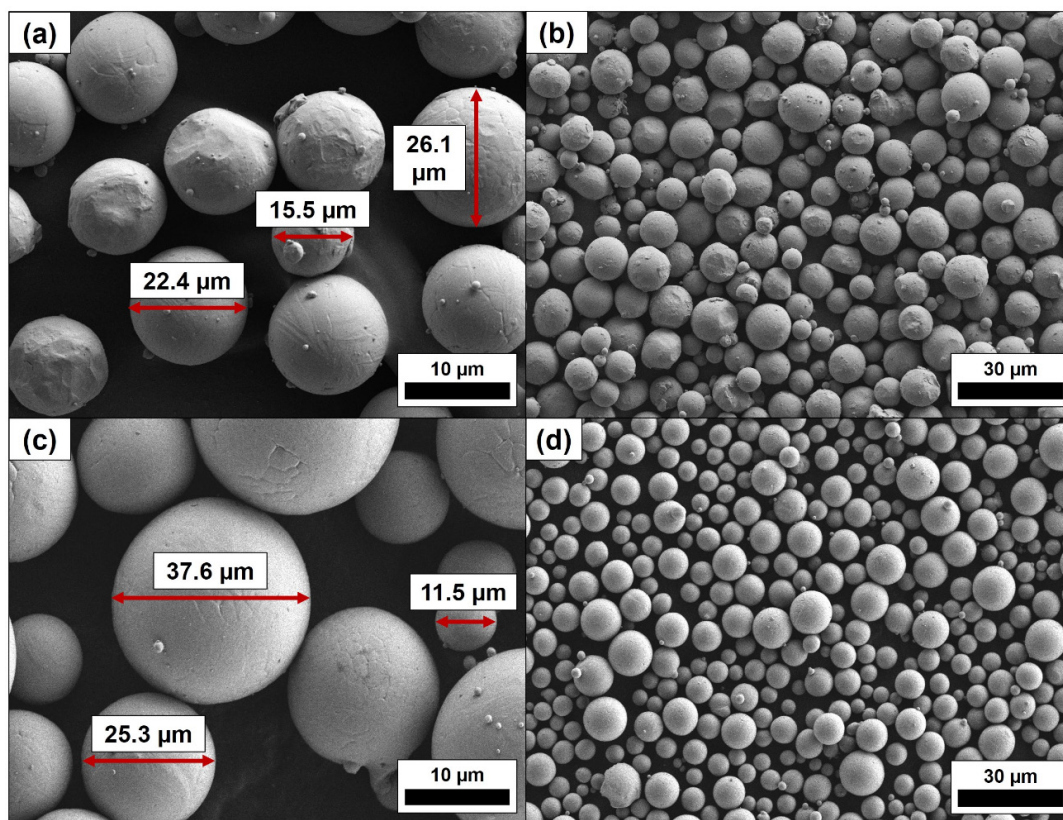
Hanya satu sampel digunakan untuk pencirian bahan bagi kedua-dua jenis serbuk Ti6Al4V. Kedua-dua sampel serbuk Ti6Al4V telah dianalisis menggunakan mikroskop elektron imbasan (SEM) model ZEISS MERLIN untuk mengkaji bentuk dan saiz zarah di dalam serbuk. Selain itu, mesin SEM tersebut turut

dilengkapi dengan spektroskopi penyebaran tenaga (EDX) dan analisis komposisi sampel serbuk telah dijalankan. Analisis taburan saiz zarah telah dijalankan menggunakan Sympatec RODOS untuk sampel S1, manakala Malvern Mastersizer 2000 untuk sampel S2. Perbezaan mesin analisis taburan saiz zarah adalah kerana kebolehsediaan mesin analisis ketika kajian dijalankan. Akhir sekali, mesin pembelauan sinar-X (XRD) model Bruker D8 Advance juga telah digunakan untuk menganalisis struktur serbuk aloi Ti6Al4V. Bagi analisis XRD, darjah belauan, masa setiap langkah, saiz langkah dan suhu yang digunakan masing-masing adalah $10 - 80^\circ$, 0.3 s, 0.025 dan 25°C .

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

ANALISIS BENTUK DAN SAIZ ZARAH

Imej SEM bagi sampel S1 dan S2 telah berjaya dilakukan dan direkod dalam kajian ini. Hasil pengimejan bagi kedua-dua sampel dipaparkan dalam Rajah 2. Melalui analisis imejan sampel serbuk logam, dapat dibandingkan bentuk dan saiz zarah serbuk logam yang dikaji. Bagi sampel S1, terdapat zarah serbuk



RAJAH 2. Imej SEM untuk sampel (a, b) S1 dan (c, d) S2
Song et al. (2012) telah melaporkan bahawa bentuk zarah serbuk logam amat penting dalam proses peleburan SLM

logam Ti6Al4V yang berbentuk tidak sekata dan bukan sfera lengkap. Dapat diperhati dalam Rajah 2(b), terdapat lekuk dan kawah pada permukaan zarah logam, menjadikan kebanyakan zarah yang diamati mempunyai bentuk yang tidak cukup sfera dan sempurna. Manakala, apabila dibandingkan dengan sampel S2, taburan bentuk zarah logam sampel dapat dilihat lebih teratur dan berupa hampir sfera sempurna. Hal yang demikian dapat dilihat dalam Rajah 2(d). Perbezaan bentuk antara sampel S1 dan S2 mungkin disebabkan daripada perbezaan kaedah penghasilan serbuk. Kajian lampau telah melaporkan bahawa kaedah PA yang digunakan untuk menghasilkan S2 akan menghasilkan zarah serbuk yang lebih sfera berbanding kaedah GA yang digunakan untuk menghasilkan S1 (Dawes et al. 2015; Sun et al. 2016).

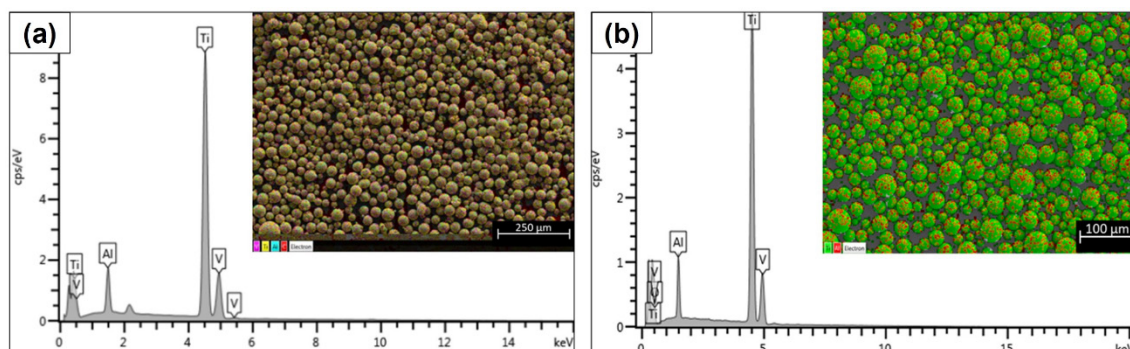
Song et al. (2012) telah melaporkan bahawa bentuk zarah serbuk logam amat penting dalam proses peleburan SLM. Bentuk zarah logam yang sfera sempurna dilaporkan akan meningkatkan keupayaan serbuk logam untuk dimampatkan dan sekaligus menjamin ketumpatan produk SLM. Manakala, Xie et al. (2021) telah melaporkan bahawa serbuk logam yang berbentuk sfera sempurna juga memberi kesan terhadap kebendaliran serbuk tersebut. Walaupun kedua-dua sampel yang diterima mempunyai bentuk yang baik dan boleh diterima bagi proses peleburan SLM, sampel

S2 adalah lebih digalakkan kerana bentuknya yang lebih sfera sempurna dan kurang lekuk. Bagi menjamin kebendaliran serbuk dan ketumpatan produk, harus dipastikan serbuk berbentuk sfera sempurna seperti yang dihasilkan oleh kaedah PA.

Selain itu, pengimejan SEM juga menunjukkan taburan saiz bagi zarah sampel serbuk logam yang dikaji. Dapat diperhati dalam Rajah 2(a) dan 2(c), taburan saiz bagi kedua-dua sampel adalah lebih kurang seragam dengan saiz zarah dalam lingkungan yang sama. Sampel yang diukur melaporkan saiz lebar zarah dalam julat 15.5 hingga 26.1 μm bagi sampel S1 dan julat 11.5 hingga 37.6 μm bagi sampel S2. Hal ini dapat diamati dengan lebih teliti melalui analisis taburan saiz zarah yang akan dibincangkan kemudian.

ANALISIS RENCAMAN KIMIA

Analisis EDX telah dilakukan bagi mengkaji komposisi kimia kedua-dua sampel dan telah dipaparkan dalam Rajah 3. Hasil EDX menunjukkan ketiga-tiga unsur kimia iaitu titanium (Ti), Al, dan V telah dikesan bagi kedua-dua sampel. Bagi S1, unsur bahan kimia Ti adalah sebanyak 89.6%, diikuti unsur Al pada 5.3% dan unsur V pada 5.1%. Manakala bagi sampel S2 pula, dapat dilihat peratus unsur Ti, Al dan V kurang daripada sampel S1 iaitu masing-masing 84.2, 4.9 dan 3.1%. Nilai taburan komposisi yang diperoleh menunjukkan nilai yang hampir



RAJAH 3. Imejan EDX untuk sampel (a) S1 dan (b) S2

dengan julat bacaan setiap unsur kimia yang dibekalkan oleh kedua-dua syarikat.

Ketidaktepatan ini disebabkan oleh beberapa ralat sampel dan mesin analisis yang digunakan. Serbuk sampel S1 dan S2 telah dibekalkan dalam bekas yang bukan vakum dan ini mungkin mempengaruhi nilai taburan komposisi serbuk. Parameter uji kaji EDX yang digunakan juga mungkin berbeza daripada yang

digunakan oleh syarikat pengeluar serbuk. Namun begitu, dapat dirumuskan bahawa taburan unsur kimia bagi sampel S1 dan S2 masih boleh diterima kerana puncak unsur kimia yang diperoleh adalah hampir sama dengan pembekal dan juga kajian lampau (Konečná et al. 2019; Xie et al. 2021). Perbandingan komposisi antara kajian ini, dua syarikat pengeluar serta kajian lampau telah dipaparkan dalam Jadual 3.

JADUAL 3. Taburan komposisi kimia berdasarkan fail data bahan daripada syarikat pengeluar

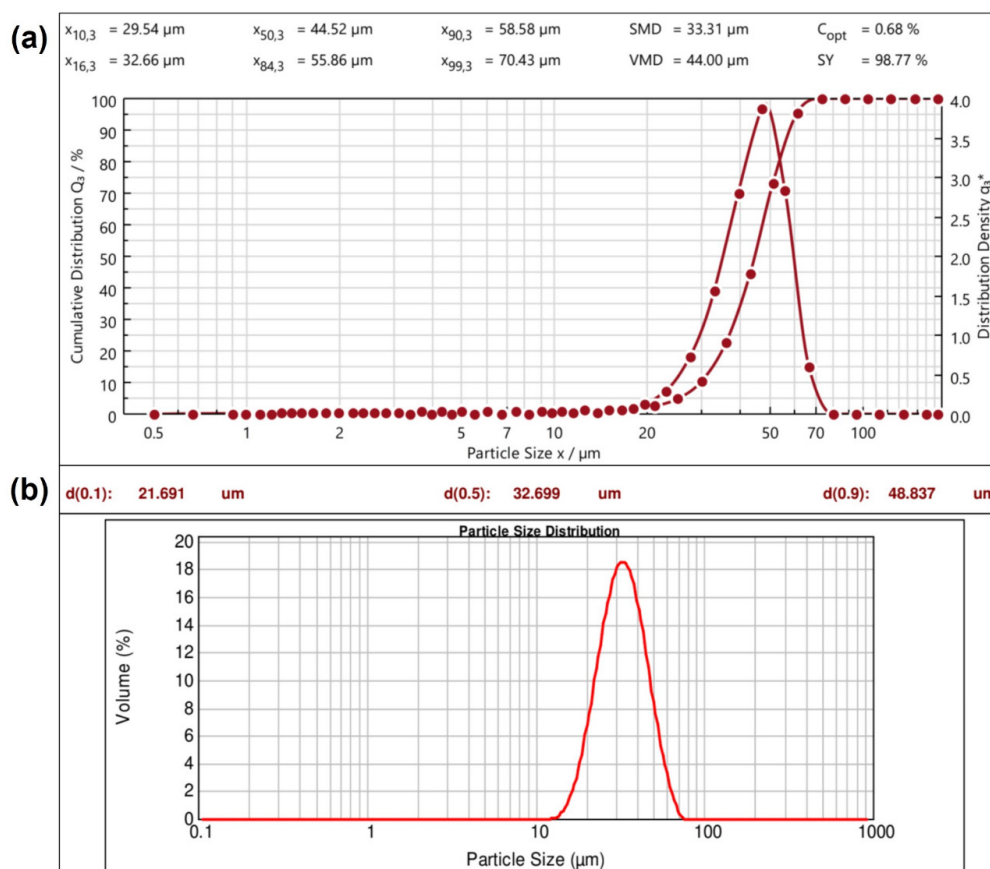
Unsur kimia	SLM Solutions		Renishaw		Kajian lampau	
	Fail data bahan	S1	Fail data bahan	S2	Xie et al. (2021)	Konečná et al. (2019)
Ti (%)	88.0 - 89.0	89.6	88.0 - 89.0	84.2	90.6	89.9
Al (%)	5.5 - 6.5	5.3	5.5 - 6.5	4.9	5.5	6.1
V (%)	3.5 - 4.5	5.1	3.5 - 4.5	3.1	4.1	3.9

(Konečná et al. 2019; Renishaw 2017; SLM Solutions 2018; Xie et al. 2021)

ANALISIS TABURAN SAIZ ZARAH

Keputusan analisis taburan saiz zarah serbuk logam bagi sampel S1 dan S2 telah dipaparkan dalam Rajah 4. Analisis tersebut menunjukkan kedua-dua sampel mempunyai julat saiz zarah yang boleh diterima bagi proses SLM. Bagi sampel S1, purata saiz zarah adalah $44.52 \mu\text{m}$ dengan peratusan minimum pada $29.54 \mu\text{m}$ dan peratusan maksimum pada $70.43 \mu\text{m}$. Manakala, sampel S2 menunjukkan taburan saiz zarah yang lebih rapat dan julat yang lebih kecil. Serbuk logam S2 mempunyai purata saiz zarah $32.70 \mu\text{m}$ dengan peratusan

minimum dalam $21.69 \mu\text{m}$ dan peratusan maksimum dalam $48.84 \mu\text{m}$. Hal yang demikian menyokong pengamatan SEM bagi kedua-dua sampel. Keseragaman taburan saiz zarah juga penting kerana sifat ini mampu mempengaruhi ketumpatan produk SLM. Kuo et al. (2017) telah merumuskan dalam kajiannya bahawa serbuk yang mempunyai saiz zarah kurang daripada $45 \mu\text{m}$ akan menghasilkan produk SLM yang mempunyai ketumpatan melebihi 92%. Dapat disimpulkan bahawa purata saiz zarah bagi kedua-dua sampel serbuk masih berada dalam lingkungan yang boleh diterima bagi menjamin ketumpatan produk SLM.

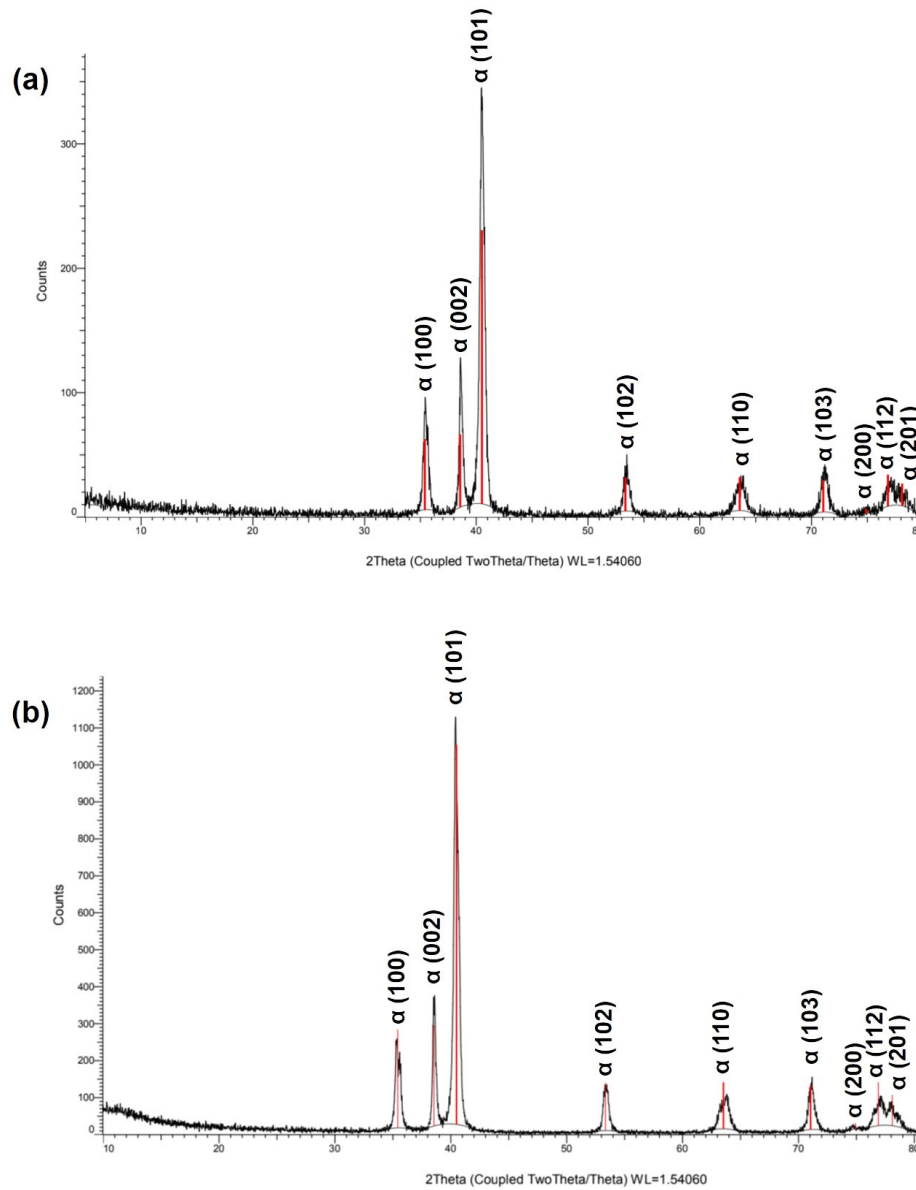


RAJAH 4. Analisis taburan saiz zarah bagi sampel (a) S1 dan (b) S2

ANALISIS STRUKTUR KRISTALOGRAFI

Analisis metalografi kedua-dua sampel serbuk Ti6Al4V turut disokong dengan mengkaji struktur kristalografi bahan. Struktur kristalografi bahan dapat dilihat dengan melakukan uji kaji XRD. Rajah 5 menunjukkan corak XRD kedua-dua sampel serbuk Ti6Al4V. Puncak keamatan yang dapat dilihat dalam Rajah 5 adalah berdasarkan fail data #44-1294 daripada piawaian JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*). Fasa

yang dijumpai dalam kedua-dua sampel ini adalah sama seperti fasa yang dijumpai dalam kajian lampau (Yang et al. 2016; Zhao et al. 2016). Kedua-dua sampel dilihat mempunyai corak XRD yang sama dengan tiga puncak utama iaitu (100), (002), dan (101). Puncak α utama dalam kedua-dua sampel sangat tinggi kerana zarah serbuk yang rata dan seragam menyebabkan peningkatan keamatan corak difraksi.



RAJAH 5. Analisis XRD bagi sampel (a) S1 dan (b) S2

Ti6Al4V mengandungi unsur Al dan V, dengan kedua-dua unsur masing-masing membantu dalam menstabilkan α dan β . Unsur Ti yang wujud di dalam aloi Ti6Al4V mempunyai dua struktur kristal yang berbeza: α -Ti dengan atom Ti disusun dalam bentuk *hexagonal close-packed* (hcp) dan β -Ti dalam bentuk *body-centered cubic* (bcc). Kedua-dua sampel dalam kajian ini didapati mempunyai struktur kekisi yang sama. Oleh kerana tiada β -Ti yang dikenal pasti di dalam puncak serbuk, semua puncak dianggap sebagai α -Ti hcp. Ketiadaan β -Ti adalah berkemungkinan kerana aloi difabrikasi dalam suhu di bawah 980 °C (suhu β -transus).

RUMUSAN

Kajian ini telah berjaya melakukan analisis pencirian bagi dua sampel serbuk logam Ti6Al4V yang dibekalkan oleh syarikat pengeluar mesin pencetakan SLM. Pengimejan zarah logam, taburan saiz zarah dan analisis kristalografi serbuk Ti6Al4V telah dilakukan bagi memahami persamaan dan perbezaan serbuk logam yang dikeluarkan. Sifat serbuk logam juga telah dibincangkan dan berikut adalah kesimpulan bagi kajian ini. Pengimejan SEM menunjukkan sampel S2 mempunyai bentuk sfera yang lebih sempurna berbanding sampel S1. Perbezaan bentuk serbuk dikaitkan dengan kaedah penghasilan serbuk logam Ti6Al4V. Kaedah PA dicadangkan sebagai kaedah penghasilan serbuk supaya serbuk logam yang berbentuk sfera sempurna dapat dijamin. Walaupun begitu, kedua-dua sampel masih menepati spesifikasi serbuk yang boleh digunakan dalam SLM kerana mempunyai ciri sfera yang serupa dengan bentuk serbuk yang dilaporkan dalam kajian lampau. Rencaman kimia serbuk Ti6Al4V menunjukkan kedua-dua sampel mengandungi taburan unsur kimia yang mengikut nilai yang telah dilaporkan dalam kajian lampau. Taburan purata saiz zarah kedua-dua sampel berada dalam lingkungan saiz yang boleh diterima dengan S1 dan S2 masing-masing mempunyai purata saiz serbuk kurang daripada 45 μm . Hal yang demikian dapat menjamin ketumpatan produk yang tinggi. Analisis kristalografi menunjukkan sampel S1 dan S2 mempunyai puncak yang serupa dan berbentuk hcp. Hal ini menunjukkan kaedah penghasilan serbuk tidak memberikan kesan ke atas kristalografi serbuk Ti6Al4V.

Kajian ini penting untuk mengetengahkan ciri serbuk logam Ti6Al4V yang sesuai untuk penggunaan SLM. Dapat dirumuskan bahawa serbuk Ti6Al4V yang digunakan dalam proses SLM haruslah berbentuk hampir sfera atau sfera, mempunyai saiz zarah dalam lingkungan 45 μm dan mempunyai struktur kristal hcp.

Ciri serbuk Ti6Al4V yang perlu dielakkan ialah bentuk serbuk yang terlalu berlekuk, saiz zarah melebihi 60 μm dan mempunyai struktur kristal bcc. Kajian ini juga menunjukkan potensi kebolehtukaran (*interchangeability*) serbuk Ti6Al4V untuk fabrikasi menggunakan mesin SLM komersial. Kajian yang lebih mendalam boleh dilakukan untuk memahami kesan sifat serbuk logam Ti6Al4V terhadap prestasi fizikal dan mekanikal produk yang dihasilkan menggunakan SLM.

PENGHARGAAN

Para penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Pendidikan Malaysia atas sokongan kewangan di bawah Geran GGPM-2019-055 dan FRGS/1/2019/TK03/UKM/02/5. Terima kasih juga kepada Pusat Penyelidikan dan Instrumentasi (CRIM), Universiti Kebangsaan Malaysia dan Makmal Pencirian Bahan (MCL), Universiti Putra Malaysia kerana menyediakan kemudahan untuk menjayakan penyelidikan ini.

RUJUKAN

- Dawes, J., Bowerman, R. & Trepleton, R. 2015. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain. *Johnson Matthey Technology Review* 59(3): 243-256. doi:10.1595/205651315X688686
- DeRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A.D., De, A. & Zhang, W. 2018. Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties. *Progress in Materials Science* 92: 112-224. doi:10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
- Foudzi, F.M., Buhairi, M.A., Jamhari, F.I., Sulong, A.B., Harun, W.S.W. & Al-Furjan, M.S. H. 2021. Effect of energy density on properties of additive manufactured Ti6Al4V via SLM. *Powder Met* 21 hlm. 434-449.
- Foudzi, F.M., Buhairi, M.A. & Jamhari, F.I. 2020. Influence of processing parameters of selective laser melting (SLM) on additive manufactured titanium alloy (Ti6Al4V). In *Proceedings of Mechanical Engineering Research Day*. pp. 55-57.
- Haferkamp, L., Haudenschild, L., Spierings, A., Wegener, K., Riener, K., Ziegelmeier, S. & Leichtfried, G.J. 2021. The influence of particle shape, powder flowability, and powder layer density on part density in laser powder bed fusion. *Metals* 11(3): 418. doi:10.3390/met11030418
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C. 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* 117: 371-392. doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019
- Konečná, R., Medvecká, D. & Nicoletto, G. 2019. Structure, texture and tensile properties of Ti6Al4V produced by selective laser melting. *Production Engineering Archives* 25(25): 60-65. doi:10.30657/pea.2019.25.12

- Kuo, C., Su, C. & Chiang, A. 2017. Parametric optimization of density and dimensions in three-dimensional printing of Ti-6Al-4V powders on titanium plates using selective laser melting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 18(11): 1609-1618. doi:10.1007/s12541-017-0190-5
- Majumdar, T., Eisenstein, N., Frith, J.E., Cox, S.C. & Birbilis, N. 2018. Additive manufacturing of titanium alloys for orthopedic applications: A materials science viewpoint. *Advanced Engineering Materials* 20(9): 1800172. doi:10.1002/adem.201800172
- Qian, M. 2015. Metal powder for additive manufacturing. *Jom* 67(3): 536-537. doi:10.1007/s11837-015-1321-z
- Ramli, M.I., Sulong, A.B., Muhamad, N., Muchtar, A. & Zakaria, M.Y. 2018. Pengoptimuman parameter pengacuan suntikan terhadap ketumpatan jasad anam untuk komposit aloi titanium-wolastonit. *Sains Malaysiana* 47(11): 2869-2875. doi:10.17576/jsm-2018-4711-30
- Renishaw. 2019. Brochure: RenAM 500Q/S additive manufacturing system. <https://www.renishaw.com/en/renam-500s--44920>.
- Renishaw. 2017. Data sheet: Ti6Al4V ELI-0406 powder for additive manufacturing: AMPD AM 3D printing metal powder AM250. <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ti6al4v-eli-0406-powder-for-additive-manufacturing--94700>.
- SLM Solutions. 2018. 3D Metals: Discover the variety of metal powders.
- SLM Solutions Group AG. 2001. Commercial material data sheet|Ti-Alloy Ti6Al4V ELI (Grade 23) (Grade 23): 7072. <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/powders/>.
- SLM Solutions Group AG. 2021. SLM®280 2.0 Brochure. *SLM-Solutions.com*. <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-280/>. Accessed on 12 April 2020.
- Song, B., Dong, S., Zhang, B., Liao, H. & Coddet, C. 2012. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials & Design* 35: 120-125. doi:10.1016/j.matdes.2011.09.051
- Sun, P., Fang, Z.Z., Xia, Y., Zhang, Y. & Zhou, C. 2016. A novel method for production of spherical Ti-6Al-4V powder for additive manufacturing. *Powder Technology* 301: 331-335. doi:10.1016/j.powtec.2016.06.022
- Sutton, A.T., Kriewall, C.S., Leu, M.C. & Newkirk, J.W. 2016. Powders for additive manufacturing processes: Characterization techniques and effects on part properties. In *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2016*. University of Texas. pp. 1004-1030.
- Wysocki, B., Maj, P., Sitek, R., Buhagiar, J., Kurzydłowski, K.J. & Świeszkowski, W. 2017. Laser and electron beam additive manufacturing methods of fabricating titanium bone implants. *Applied Sciences* 7(7): 657. doi:10.3390/app7070657
- Xie, B., Fan, Y. & Zhao, S. 2021. Characterization of Ti6Al4V powders produced by different methods for selective laser melting. *Materials Research Express* 8(7): 076510. doi:https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac10d1
- Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z. & Zeng, X. 2016. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design* 108: 308-318. doi:10.1016/j.matdes.2016.06.117
- Zhao, X., Li, S., Zhang, M., Liu, Y., Sercombe, T.B., Wang, S., Hao, Y., Yang, R. & Murr, L.E. 2016. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Materials & Design* 95: 21-31. doi:10.1016/j.matdes.2015.12.135
- Zuback, J.S. & DebRoy, T. 2018. The hardness of additively manufactured alloys. *Materials* 11(11): 2070. doi:10.3390/ma11112070

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: farhana.foudzi@ukm.edu.my