

Pengoptimuman Parameter Pengacuan Suntikan terhadap Ketumpatan Jasad Anum untuk Komposit Aloji Titanium-Wolastonit

(Optimization of Injection Molding Parameter towards Density of Green Part for Titanium Alloy-Wollastonite Composite)

MOHD IKRAM RAMLI, ABU BAKAR SULONG*, NORHAMIDI MUHAMAD,
ANDANASTUTI MUCHTAR & MOHD YUSUF ZAKARIA

ABSTRAK

Pembangunan bahan komposit aloji titanium (Ti6Al4V)/wolastonit (WA) semakin mendapat permintaan yang tinggi terutamanya dalam aplikasi implan tulang. Ti6Al4V adalah sejenis aloji logam yang terkenal dengan sifat mekanik yang tinggi dan bioerasi manakala seramik WA merupakan bahan biokaca yang bersifat bioaktif dan sesuai untuk dijadikan bahan implan. Proses pengacuan suntikan serbuk (PIM) adalah proses teknologi serbuk yang boleh menghasilkan jasad yang kecil dan berbentuk kompleks pada kos yang rendah. Ketumpatan jasad anum yang rendah boleh menyebabkan kecacatan seperti retakan berlaku semasa proses penyahikatan dan pensinteran dijalankan. Oleh itu, jasad anum yang optimum terhadap ketumpatan adalah penting bagi menghasilkan komposit yang mempunyai sifat mekanik dan fizikal yang baik. Kajian ini memberi tumpuan terhadap kesan parameter proses pengacuan terhadap jasad anum komposit Ti6Al4V/WA. Nilai pembebanan serbuk ialah 67.0 % isi padu. Serbuk Ti6Al4V dan WA dengan nisbah peratus berat masing-masing adalah 90:10 dicampurkan bersama 60 % bt. stearin sawit (SS) dan 40% bt. polietilena (PE) untuk membentuk bahan suapan. Parameter optimum yang diperolehi bagi proses pengacuan suntikan ditentukan melalui kaedah Taguchi berdasarkan ketumpatan jasad anum ialah: suhu penyuntikan pada 130°C, suhu acuan pada 50°C, tekanan penyuntikan pada 13 bar dan masa penyuntikan pada 10 s. Nilai purata ketumpatan tertinggi adalah 3.095 g/cm³. Analisis ANOVA menunjukkan suhu acuan memberikan pengaruh paling tinggi iaitu 57.63% bagi mendapatkan jasad anum yang mempunyai ketumpatan yang tinggi. Uji kaji pengesahan menunjukkan jasad anum yang terhasil berada dalam julat prestasi optimum yang dijangkakan. Penghasilan jasad anum yang bebas daripada kecacatan adalah penting bagi menentukan sifat mekanik dan fizikal yang baik pada jasad sinter.

Kata kunci: Komposit logam-seramik; pengacuan suntikan serbuk; reka bentuk kajian; sifat mekanik; sifat fizikal

ABSTRACT

The development of titanium alloy (Ti6Al4V)/wollastonite (WA) composite getting high demand especially in bone implant applications. Ti6Al4V is a type of metal alloy that well known for its high mechanical properties and biocompatibility while ceramic WA is a bioglass materials which is bioactive and suitable for implan application. The powder injection molding process (PIM) is a powder technology process that can produce small and complex shapes at a low cost. The low density of green part can cause defects such as cracks that occur during the debinding and sintering process. Therefore, an optimum green part to density is essential to produce a composite that good in mechanical and physical properties. This study focuses on the effects of the molding process parameters on green part of Ti6Al4V/WA composite. The powder loading value was 67.0 vol. %. Ti6Al4V and WA powder with their weight percentages are 90:10 were mixed together with 60 wt. % palm stearin (SS) and 40 wt. % polyethylene (PE) to produced feedstock. The optimum parameters obtained for the injection molding process are determined by the Taguchi's method based on density of the green part as follows: injection temperature of 130°C, mold temperature of 50°C, injection pressure of 13 bar, holding time of 10 s. The highest average density value is 3.095 g/cm³. Analysis of variance shows that the injection temperature gives the highest influence which is 57.63% to obtain a green part with highest density. The confirmation test shows that the green part produced are within the expected of performance optimum range. The production of green part that free from defects is important to determine the good mechanical and physical properties of the sintered part.

Keywords: Design of experiment; metal-ceramic composite; mechanical properties; physical properties; powder injection molding

PENGENALAN

Pengacuan suntikan serbuk (PIM) merupakan proses pembuatan yang sesuai untuk menghasilkan produk

berbentuk geometri yang kompleks dan kecil dalam kos yang rendah (Hidalgo et al. 2015). Selain itu, produk yang terhasil melalui proses PIM ini tidak perlu melalui proses

pemesinan kerana ia telah menghampiri bentuk akhir (Ani et al. 2017). Terdapat empat langkah utama dalam proses PIM iaitu pencampuran bahan serbuk dengan bahan pengikat membentuk bahan suapan, penyuntikan bahan suapan ke dalam acuan, penyahikatan dan pensinteran (Chua et al. 2013). Sistem bahan pengikat memainkan peranan yang utama untuk melincirkan bahan suapan semasa proses pengacuan suntikan dijalankan dengan menyebabkan bahan serbuk secara seragam dan mengisi semua ruang antara zarah serbuk (Jamaludin et al. 2015). Menurut Raza et al. (2017), bahan pengikat bertindak sebagai kenderaan untuk membolehkan bahan serbuk mengalir ke dalam acuan dan memberikan kekuatan kepada bahagian yang dibentuk untuk membolehkan ia dikendalikan dengan mudah. Penghasilan jasad anum yang baik adalah penting kerana ia akan mempengaruhi sifat fizikal dan mekanik jasad tersinter. Oleh itu, pengoptimuman parameter proses pengacuan suntikan adalah perlu bagi menghasilkan jasad anum berkualiti tinggi sebelum diteruskan pada proses penyahikatan dan pensinteran (Ibrahim et al. 2009).

Titanium dan aloi merupakan bahan logam yang sering digunakan dalam bidang ortopedik dan pergigian kerana mempunyai sifat bioserasi dan tahan terhadap kakisan yang sangat baik (Su et al. 2018). Ti6Al4V merupakan aloi titanium yang sesuai digunakan dalam bidang perubatan kerana sifatnya yang unik iaitu keliatan patah yang baik, kekuatan yang tinggi, ketumpatan dan modulus yang rendah (Dantas et al. 2017). Namun, aloi Ti6Al4V tidak dapat bertindak balas secara kimia untuk pembentukan tisu semula jadi. Walaupun sifat mekanik aloi Ti6Al4V adalah sangat baik, sifat bahan implan tersebut perlu ditingkatkan agar masa integrasi antara tisu dan bahan implan dapat dikurangkan dan dengan itu, masa penyembuhan akan berkurang (Mohseni et al. 2014). Selain itu, salah satu isu implan logam adalah daripada segi sifat mekanik yang jauh lebih tinggi berbanding dengan tulang manusia iaitu 105 GPa bagi Ti6Al4V dan 10-30 GPa bagi tulang manusia (Arifin et al. 2015). Perbezaan yang ketara ini akan menyebabkan berlakunya fenomena tegasan pelindung yang disebabkan oleh pemindahan tekanan yang tidak sekata daripada tulang ke bahan implan logam.

Wolastonit (WA, CaSiO_3) adalah bahan seramik kalsium silikat atau dikenali sebagai kaca-seramik telah didapati mempunyai kekuatan mekanik yang tinggi dan juga mampu membentuk ikatan kimia yang kuat dengan tisu tulang (Nakamura et al. 1985). Seramik WA merupakan gabungan sebatian kalsium oksida (CaO) dan silika (SiO_2) (Ismail et al. 2016). Menurut Al-Noaman et al. (2013), WA mempunyai sifat kebioaktifan dan bioserasi yang sesuai dan digunakan sebagai pengganti tulang dengan indeks kebioaktifan bagi WA adalah lebih tinggi daripada hidroksiapatit (HA) iaitu masing-masing adalah 3.2 dan 3.0. Walau bagaimanapun, sifat mekanik WA belum memuaskan setakat ini dan menyebabkan aplikasi WA sebagai bahan implan adalah terbatas.

Sehingga kini, tiada laporan kajian yang dijalankan untuk menghasilkan komposit Ti6Al4V/WA melalui

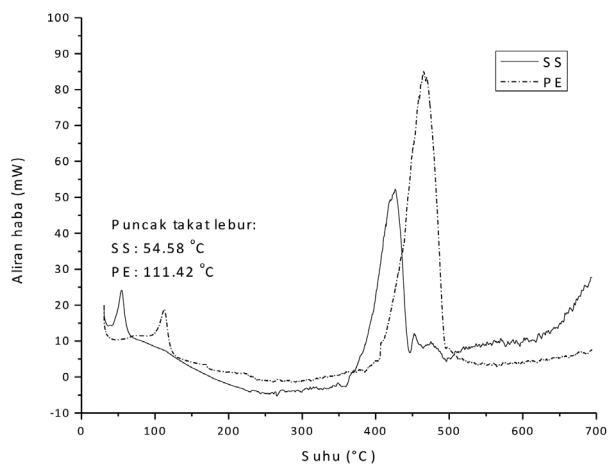
kaedah PIM. Saiz partikel serbuk yang berbeza boleh menyebabkan pembebanan serbuk meningkat. Hal ini akan mengakibatkan isi padu bahan pengikat berkurang dan kelikatan bahan suapan akan meningkat menyebabkan kesukaran semasa melalui proses pengacuan dijalankan untuk menghasilkan jasad anum (Arifin et al. 2015). Gabungan antara kedua-dua bahan iaitu aloi Ti6Al4V dan seramik WA boleh menghasilkan bahan komposit yang bersifat bioserasi dan bioaktif. Selain itu, sifat mekanik komposit Ti6Al4V/WA yang terhasil akan menghampiri sifat mekanik tulang manusia. Menurut Abdullahi et al. (2017), pemantauan dan pengendalian terhadap kualiti sesuatu produk melalui proses PIM adalah penting. Oleh itu, para penyelidik telah banyak menggunakan teknik pengoptimuman untuk mendapatkan parameter proses PIM yang optimum dan produk bebas daripada sebarang kecacatan. Tumpuan kajian ini adalah untuk mendapatkan parameter proses pengacuan suntikan yang optimum berdasarkan ketumpatan jasad anum. Proses pengoptimuman parameter ditentukan melalui reka bentuk eksperimen kaedah Taguchi.

BAHAN DAN KAEDAH

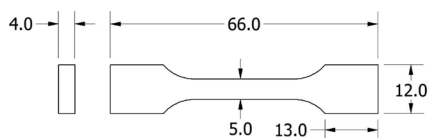
Bahan yang digunakan dalam kajian ini adalah 90 % bt. serbuk logam Ti6Al4V dan 10 % bt. serbuk seramik WA masing-masing bersaiz $19.54 \mu\text{m}$ dan $10.10 \mu\text{m}$. Sistem bahan pengikat pula terdiri daripada 60 % bt. stearin sawit (SS) dan 40 % bt. polietilena (PE). Ujian peratusan jumlah serbuk kritikal (CPVP) dijalankan berdasarkan piawaian ASTM D281-31 menunjukkan nilai CPVP adalah 69.0 % isi padu. Pemilihan nilai pembebanan serbuk yang optimum adalah 2-5 % isi padu di bawah nilai CPVP untuk memastikan fleksibiliti proses (German & Bose 1997). Oleh itu, pembebanan serbuk yang dipilih ialah 67.0 % isi padu. Proses pencampuran dijalankan menggunakan mesin pencampur Brabender model W50EHT. Bahan pengikat mestilah lebur sepenuhnya semasa proses pencampuran dilakukan. Takat lebur bahan pengikat ditentukan melalui ujian permeteran kalori pengimbasan kebezaan (DSC) seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 menggunakan piawaian ASTM D3418. Ujian reologi dijalankan berdasarkan piawaian ASTM D1238 untuk mengenal pasti jenis aliran bahan suapan yang terhasil menggunakan mesin kapilari reometer (Shimadzu CFT-500D). Bahan suapan disuntik ke dalam acuan berbentuk bar tegangan seperti dalam gambarajah skematik pada Rajah 2 melalui mesin pengacuan suntikan model Xplore IM 12.

Pengoptimuman parameter proses pengacuan suntikan dijalankan melalui kaedah reka bentuk Taguchi dengan tatacara ortogonal L_9 berdasarkan ketumpatan jasad anum seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 1. Selepas memperoleh parameter suntikan yang optimum, bahan suapan disuntik ke dalam acuan menggunakan parameter tersebut sebagai ujian pengesahan. Kriteria yang diambil kira adalah ketumpatan jasad anum.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN



RAJAH 1. Keputusan ujian permeteran kalori pengimbasan kebezaan terhadap bahan pengikat PS dan PE



RAJAH 2. Gambarajah bar tegangan yang disuntik berserta dimensi dalam unit mm

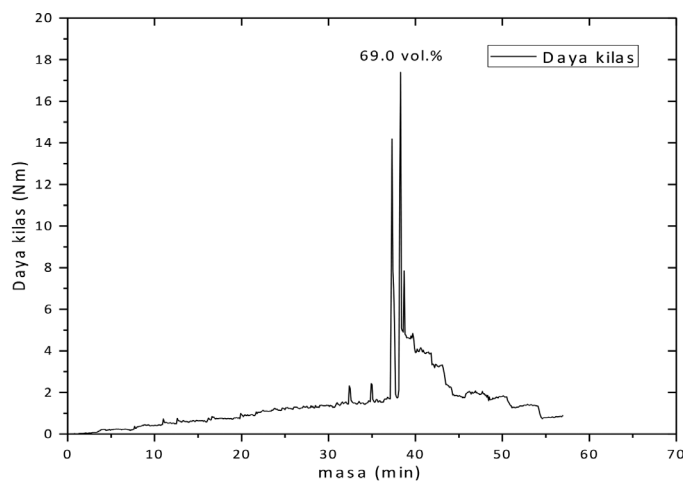
Penentuan bebanan serbuk bagi serbuk Ti6Al4V dan WA ditentukan melalui ujian peratusan isi padu genting serbuk (CPVP). Melalui ujian ini, nilai pembebanan serbuk maksimum zarah serbuk tersusun rapat dan ruang antara serbuk akan terisi dengan bahan pengikat dapat ditentukan. Rajah 3 menunjukkan graf daya kilas melawan masa dengan asid oleik ditambah sedikit demi sedikit (1 mL) sehingga daya kilas mencapai nilai maksimum. Menurut Li et al. (2007), nilai maksimum daya kilas menunjukkan isi padu bahan pengikat adalah cukup untuk membentuk ikatan yang kuat dan memenuhi ruang kosong antara partikel. Nilai CPVP diperoleh menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{V_s}{V_s + V_o} \times 100 \tag{1}$$

dengan ialah isi padu bahan serbuk; ialah isi padu oleik asid. Nilai CPVP yang diperoleh adalah 69.0 % isi padu. Penurunan nilai daya kilas selepas nilai maksimum menunjukkan sifat kelikatan campuran semakin berkurang apabila bahan pengikat ditambahkan. Penurunan tersebut adalah disebabkan oleh kandungan bahan pengikat melebihi kemampuan serapan serbuk (Li et al. 2007). Menurut Oh et al. (2016), pemilihan pembebanan serbuk yang optimum adalah 2 % isi padu di bawah pembebanan serbuk kritikal. Oleh itu, pembebanan serbuk bagi campuran Ti6Al4V dan WA adalah 67.0 % isi padu.

JADUAL 1. Faktor dan paras parameter proses pengacuan suntikan

No	Lajur Faktor	Faktor	Paras		
			1	2	3
1	A	Suhu penyuntikan	130°C	150°C	170°C
2	B	Suhu acuan	30°C	40°C	50°C
3	C	Tekanan penyuntikan	10 bar	13 bar	16 bar
4	D	Masa pegangan	5 s	10 s	15 s



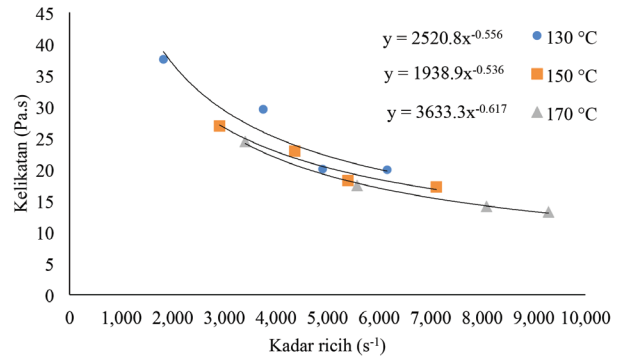
RAJAH 3. Keputusan ujian peratusan isi padu serbuk kritikal

Rajah 4 menunjukkan keputusan sifat reologi terhadap bahan suapan Ti6Al4V/WA yang menunjukkan graf kelikatan melawan kadar ricih pada suhu yang berbeza iaitu 130°C, 150°C dan 170°C. Berdasarkan graf tersebut, sifat kelikatan bahan suapan semakin berkurang dengan peningkatan kadar ricih menunjukkan bahan suapan Ti6Al4V/WA mempunyai sifat aliran pseudoplastik. Sifat aliran pseudoplastik adalah penting bagi bahan suapan dalam proses PIM kerana ia boleh mengelakkan daripada fenomena pemisahan antara serbuk dan bahan pengikat berlaku semasa proses penyuntikan bahan suapan ke dalam acuan dijalankan (Thavanayagam et al. 2014). Indeks sifat aliran bahan suapan diperoleh daripada persamaan berikut (Jamaludin et al. 2015):

$$\eta = K\gamma^{n-1} \tag{2}$$

dengan η adalah kelikatan bahan suapan; K adalah malar; γ adalah kadar ricih dan n adalah indeks sifat aliran bahan suapan. Jadual 2 menunjukkan nilai indeks sifat aliran bahan suapan dengan n yang diperoleh bagi kesemua suhu adalah di bawah 1 ($n < 1$) dan membuktikan bahawa aliran bahan suapan adalah bersifat pseudoplastik. Menurut Omar et al. (2011), nilai n menunjukkan tahap sensitif sesuatu bahan suapan terhadap perubahan kadar ricih. Nilai n yang lebih rendah adalah lebih sensitif terhadap kadar ricih.

Proses pengoptimuman proses pengacuan suntikan dilakukan menggunakan kaedah reka bentuk Taguchi L₉ berdasarkan nilai ketumpatan jasad anum. Keputusan bagi ketumpatan jasad anum yang dianalisis ditunjukkan dalam Jadual 3. Manakala Rajah 5 menunjukkan plot kesan utama nisbah S/N bagi ketumpatan jasad anum. Parameter yang optimum adalah seperti berikut: Suhu penyuntikan ialah A₁ (130°C), suhu acuan ialah B₃ (50°C), tekanan penyuntikan adalah C₂ (13 bar) dan masa pegangan adalah D₂ (10 s). Berdasarkan faktor suhu acuan dalam Rajah 4, didapati peningkatan nilai nisbah S/N adalah ketara dengan



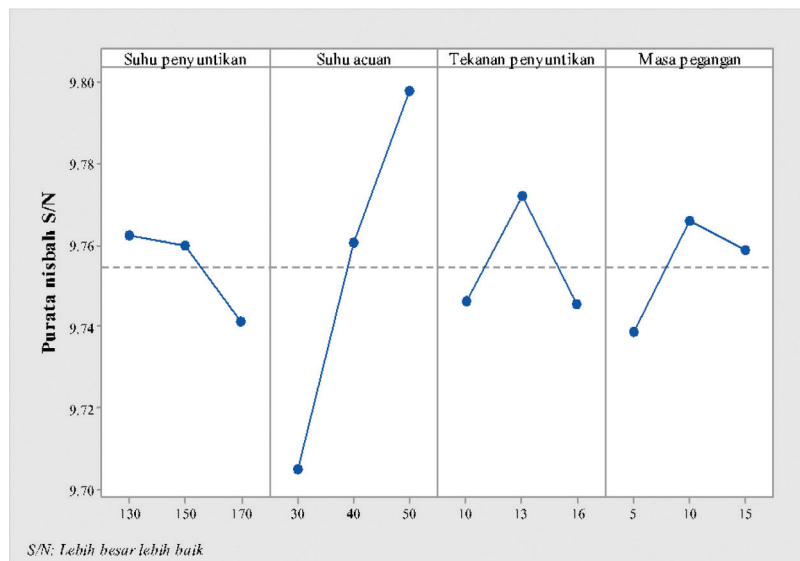
RAJAH 4. Keputusan reologi sifat aliran terhadap bahan suapan Ti6Al4V/WA

JADUAL 2. Indeks sifat aliran bahan suapan Ti6Al4V/WA

Suhu (°C)	Indeks sifat aliran, n
130	0.444
150	0.464
170	0.383

peningkatan suhu acuan. Hal ini menunjukkan suhu acuan mempunyai pengaruh yang amat penting dalam penentuan nilai ketumpatan jasad hijau yang optimum diikuti oleh parameter masa pegangan, tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan. Semakin tinggi suhu acuan, semakin rendah kelikatan bahan suapan dan membolehkan bahan suapan mengalir ke dalam acuan dengan lancar. Selain itu, menurut Huang dan Tai (2001), suhu acuan yang tinggi dapat mengurangkan kadar ricih antara permukaan bahan suapan dan permukaan acuan.

Jadual 4 menunjukkan keputusan ANOVA untuk peratus sumbangan setiap faktor proses pengacuan suntikan yang mempengaruhi nilai ketumpatan jasad anum. Mengikut turutan, faktor bagi suhu acuan didapati



RAJAH 5. Nisbah S/N bagi ketumpatan jasad anum

JADUAL 3. Tatacara ortogonal L_9 bagi ketumpatan jasad anum

Uji kaji	Parameter				Ketumpatan (g/cm^3)			S/N (dB)
	A	B	C	D	Ujian ulangan 1	Ujian ulangan 2	Ujian ulangan 3	
1	1	1	1	1	3.041	3.063	3.049	9.689
2	1	2	2	2	3.081	3.094	3.093	9.797
3	1	3	3	3	3.074	3.103	3.095	9.801
4	2	1	2	3	3.059	3.078	3.062	9.732
5	2	2	3	1	3.068	3.075	3.065	9.741
6	2	3	1	2	3.084	3.092	3.102	9.807
7	3	1	3	2	3.042	3.051	3.066	9.694
8	3	2	1	3	3.082	3.057	3.072	9.744
9	3	3	2	1	3.094	3.083	3.079	9.786
							Σ	87.791
							T	9.755

JADUAL 4. Parameter optimum dan peratus sumbangan bagi semua faktor

Faktor	Darjah kebebasan, f_n	Jumlah kuasa dua, S_n	Min Jumlah Kuasa dua	Nisbah varian, F_n	Peratus sumbangan, %
Suhu penyuntikan	2	0.00030	0.00015	1.3686	0.99
Suhu acuan	2	0.00489	0.00245	22.5148	57.63
Tekanan penyuntikan	2	0.00050	0.00025	2.3213	3.54
Masa pegangan	2	0.00046	0.00023	2.1291	3.02
Ralat	18	0.00196	0.00011		34.82
Jumlah	26	0.00812	0.00319		100.00

mempunyai pengaruh yang besar terhadap ketumpatan jasad anum iaitu 25.72% diikuti masa pegangan, tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan. Chua et al. (2013) dalam kajiannya terhadap pengoptimuman proses pengacuanan suntikan mendapati suhu acuan memberi pengaruh yang besar terhadap kualiti permukaan jasad anum, kekuatan jasad anum dan ketumpatan. Suhu acuan yang tinggi dapat mengalirkan bahan suapan ke dalam acuan dengan sempurna dan memenuhi semua ruang.

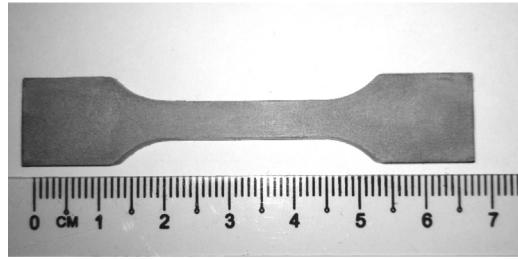
Oleh itu, jangkaan keputusan pada prestasi optimum adalah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 5. Uji kaji pengesahan telah dijalankan menggunakan parameter yang optimum iaitu A_1 , B_3 , C_2 , dan D_2 dengan nisbah S/N tertinggi bagi setiap parameter digunakan untuk menganggarkan julat prestasi yang optimum seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 5. Berdasarkan uji kaji

pengesahan yang dijalankan, didapati nilai S/N (9.831 dB) berada di dalam julat prestasi optimum iaitu $9.808 < \mu < 9.858$. Melalui uji kaji ini, ia membuktikan bahawa faktor yang optimum yang diperoleh dapat menghasilkan jasad anum yang berketumpatan tinggi.

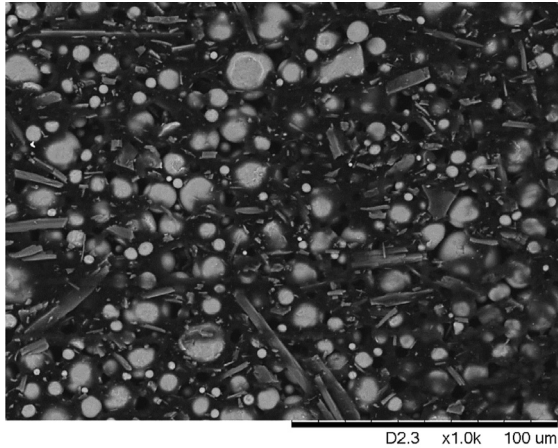
Rajah 6 menunjukkan jasad anum yang disuntik menggunakan parameter proses pengacuanan suntikan yang optimum. Jasad anum berjaya disuntik tanpa sebarang kecacatan. Manakala Rajah 7 menunjukkan mikrograf SEM terhadap permukaan jasad anum. Didapati serakan antara serbuk Ti6Al4V dan WA adalah sekata manakala bahan pengikat menyaluti serbuk Ti6Al4V dan WA dan memenuhi ruang antara serbuk menyebabkan jasad anum mempunyai ketumpatan yang tinggi dan kekuatan yang cukup untuk mengekalkan bentuk sebelum melalui proses seterusnya dalam pengacuanan suntikan serbuk. Purata nilai ketumpatan

JADUAL 5. Parameter optimum, prestasi optimum dan uji kaji pengesahan

Pengiraan julat prestasi optimum					
$T + (A_1 - T) + (B_3 - T) + (C_2 - T) + (D_2 - T)$					
$9.755 + (9.762 - 9.755) + (9.798 - 9.755) + (9.772 - 9.755) + (9.766 - 9.755) = 9.833$ dB					
Prestasi jangkaan	= 9.833				
Selang keyakinan pada aras keyakinan 95% ($\alpha=0.05$)	= ± 0.025				
Julat prestasi optimum, μ	= $9.808 < \mu < 9.858$				
Uji kaji pengesahan					
Ujian ulangan	1	2	3	Purata	Nisbah S/N (dB)
Ketumpatan (g/cm^3)	3.112	3.087	3.105	3.095	9.831



RAJAH 6. Jasad anum yang disuntik menggunakan parameter optimum



RAJAH 7. Morfologi permukaan jasad anum Ti6Al4V/WA

yang diperoleh adalah 3.095 g/cm^3 iaitu 98.97% daripada pengiraan nilai teori ketumpatan (3.127 g/cm^3).

KESIMPULAN

Melalui kajian yang telah dijalankan, keputusan reologi menunjukkan bahan suapan Ti6Al4V/WA mempunyai sifat aliran pseudoplastik dan sesuai untuk proses PIM. Jasad anum yang mempunyai ketumpatan yang tinggi iaitu 3.095 g/cm^3 iaitu 98.97% daripada nilai ketumpatan teori berjaya dihasilkan. Pengoptimuman proses pengacuanan suntikan menunjukkan faktor suhu acuan memberi sumbangan terbesar dalam menghasilkan jasad anum yang berketumpatan tinggi iaitu 57.63%. Parameter yang optimum adalah suhu suntikan ialah 130°C , suhu acuan ialah 50°C , tekanan penyuntikan adalah 13 bar dan masa pegangan adalah 10 s. Melalui parameter yang optimum ini, jasad anum yang terhasil mempunyai ketumpatan yang tinggi dan bebas daripada sebarang kecacatan dapat dihasilkan.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan sekalung penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia atas tajaan projek melalui Geran Penyelidikan TRGS/2/2014/UKM/02/4/1 dan DCP-2017-001/2.

RUJUKAN

- Abdullahi, A.A., Choudhury, I.A., Azuddin, M. & Nahar, N. 2017. Effect of mixing process parameters and suitability of backbone polymer for aluminum powder injection molding feedstock. *Sains Malaysiana* 46(3): 477-483.
- Al-Noaman, A., Rawlinson, S.C.F. & Hill, R.G. 2013. Bioactive glass-stoichiometric wollastonite glass alloys to reduce TEC of bioactive glass coatings for dental implants. *Materials Letters* 94: 69-71.
- Ani, S.M., Muchtar, A., Muhamad, N. & Ghani, J.A. 2017. Kesan suhu pensinteran terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur alumina-zirkonia yang difabrikasi dengan kaedah pengacuan suntikan seramik. *Sains Malaysiana* 46(10): 1979-1986.
- Arifin, A., Sulong, A.B., Muhamad, N., Syarif, J. & Ramli, M.I. 2015. Powder injection molding of HA/Ti6Al4V composite using palm stearin as based binder for implant material. *Materials and Design* 65: 1028-1034.
- Chua, M.I.H., Sulong, A.B., Abdullah, M.F. & Muhamad, N. 2013. Optimization of injection molding and solvent debinding parameters of stainless steel powder (SS316L) based feedstock for metal injection molding. *Sains Malaysiana* 42(12): 1743-1750.
- Dantas, T.A., Abreu, C.S., Costa, M.M., Miranda, G., Silva, F.S., Dourado, N. & Gomes, J.R. 2017. Bioactive materials driven primary stability on titanium biocomposites. *Materials Science and Engineering C* 77: 1104-1110.
- German, R.M. & Bose, A. 1997. *Injection Molding of Metals and Ceramics*. Metal Powder Industries Federation.
- Hidalgo, J., Jimenez-Morales, A., Barriere, T., Gelin, J.C. & Torralba, J.M. 2015. Capillary rheology studies of INVAR 36 feedstocks for powder injection moulding. *Powder Technology* 273: 1-7.
- Huang, M.C. & Tai, C.C. 2001. Effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature. *Journal of Materials Processing Technology* 110(1): 1-9.
- Ibrahim, M.H.I., Muhammad, N., Sulong, A.B., Jamaludin, K.R., Ahmat, S. & Nor, N.H.M. 2009. Water atomised stainless steel powder for micro metal injection molding: Optimization of rheological properties. *Malaysian Metallurgical Conference - MMC 2008*. hlm. 1-7.
- Ismail, H., Shamsudin, R., Abdul Hamid, M.A. & Rozidawati, A. 2016. Mechanism of apatite formation on β -wollastonite sample surface synthesized from rice husk ash. *Sains Malaysiana* 45(12): 1779-1785.
- Jamaludin, M.I., Kasim, N.A.A., Nor, N.H.M. & Ismail, M.H. 2015. Development of porous Ti-6Al-4V Mix with palm stearin binder by metal injection molding technique. *American Journal of Applied Sciences* 12(10): 742-751.
- Li, Y., Li, L. & Khalil, K.A. 2007. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology* 183(2-3): 432-439.
- Mohseni, E., Zalnezhad, E. & Bushroa, A.R. 2014. Comparative investigation on the adhesion of hydroxyapatite coating on Ti-6Al-4V implant: A review paper. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 48: 238-257.
- Nakamura, T., Yamamuro, T., Higashi, S., Kokubo, T. & Ito, S. 1985. A new glass-ceramic for bone replacement: Evaluation of its bonding to bone tissue. *Journal of Biomedical Materials Research* 19(6): 685-698.
- Oh, J.W., Bollina, R., Lee, W.S. & Park, S.J. 2016. Effect of nanopowder ratio in bimodal powder mixture on powder injection molding. *Powder Technology* 302: 168-176.

- Omar, M.A., Subuki, I., Abdullah, N. & Ismail, M.F. 2011. The influence of palm stearin content on the rheological behaviour of 316L stainless steel MIM compact. *Journal of Science and Technology* 2(2): 1-14.
- Raza, M.R., Ahmad, F., Muhamad, N., Sulong, A.B., Omar, M.A., Akhtar, M.N., Aslam, M. & Sherazi, I. 2017. Effects of debinding and sintering atmosphere on properties and corrosion resistance of powder injection molded 316 L - stainless steel. *Sains Malaysiana* 46(2): 285-293.
- Su, Y., Luo, C., Zhang, Z., Hermawan, H., Zhu, D., Huang, J., Liang, Y., Li, Guangyu & Rena Luquan. 2018. Bioinspired surface functionalization of metallic biomaterials. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 77: 90-105.
- Thavanayagam, G., Pickering, K.L., Swan, J.E. & Cao, P. 2014. Analysis of rheological behaviour of titanium feedstocks formulated with a water-soluble binder system for powder injection moulding. *Powder Technology* 269: 227-232.

Department of Mechanical and Materials Engineering
Faculty of Engineering and Built Environment
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

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

Diserahkan: 26 April 2018

Diterima: 20 Julai 2018