

Pencirian Keseragaman Campuran dan Sifat Reologi Serbuk Alumina-Zirkonia untuk Pengacuan Suntikan Seramik

(Characterisation of Mixing Uniformity and Rheological Properties of Alumina-Zirconia Powder for Ceramic Injection Moulding)

SARIZAL MD ANI, ANDANASTUTI MUCHTAR*, NORHAMIDI MUHAMAD & JAHARAH A. GHANI

ABSTRAK

Pencirian keseragaman campuran dan sifat reologi bahan suapan merupakan elemen penting dalam melaksanakan proses pengacuan suntikan seramik. Kesesuaian bahan suapan yang dibangunkan dapat mengurangkan masalah yang timbul ketika proses pengacuan suntikan, penyahikatan dan pensinteran. Justeru itu, kajian ini dijalankan untuk mengenal pasti pembebanan serbuk yang optimum berdasarkan kepada keseragaman campuran dan sifat reologi bahan. Pencirian keseragaman campuran ditentukan berdasarkan kepada nilai tork yang rendah dan berkeadaan mantap. Kajian reologi pula dilakukan dengan menggunakan mesin reometer rerambut. Ujian dijalankan pada julat suhu 150 dan 170°C dengan beban kenaan antara 20 dan 90 kgf. Bahan suapan yang digunakan terdiri daripada kombinasi serbuk seramik alumina-zirkonia bersama bahan pengikat polietilena berketumpatan tinggi, lilin parafin dan asid stearik. Hasil kajian menunjukkan bahan suapan bersifat pseudoplastik dengan pencampuran bahan yang seragam dalam tempoh kurang daripada 30 min. Hasil keputusan juga mendapati pada pembebanan serbuk 57% isi padu adalah yang paling optimum untuk proses pengacuan suntikan seramik berdasarkan kepada nilai kelikatan, indeks hukum kuasa dan tenaga pengaktifan aliran yang rendah.

Kata kunci: Alumina-zirkonia; keseragaman campuran; pengacuan suntikan seramik; sifat reologi

ABSTRACT

The mixing uniformity and rheological properties of feedstock are crucial to the success of the ceramic injection moulding process. The suitability of developed feedstock may reduce the problems that arise during injection moulding, debinding and sintering. Therefore, this study is focused on identifying the optimum powder loading based on the mixing uniformity and rheological properties of materials. Uniformity characterisation of the mixture is determined based on the low torque value and at the steady state. Rheological studies were carried out using a capillary rheometer machine. The test was carried out at temperatures between 150 and 170°C with the applied loads between 20 and 90 kgf. The feedstock used was a combination of alumina-zirconia powder with a binder that consisted of high density polyethylene, paraffin wax and stearic acid. The feedstocks are found to be pseudoplastic with uniform mixing achieved in less than 30 min. The powder loading of 57% by volume is found to be optimum for the ceramic injection moulding process based on the low values of viscosity, power law index and flow activation energy.

Keywords: Alumina-zirconia; ceramic injection moulding; mixing uniformity; rheological behaviour

PENGENALAN

Pengacuan suntikan seramik (CIM) melibatkan beberapa peringkat iaitu proses pencampuran bahan, pengacuan suntikan, penyahikatan dan pensinteran. Proses pencampuran bahan suapan yang melibatkan adunan serbuk seramik dengan bahan pengikat bertujuan untuk menyaluti zarah-zarah dengan bahan pengikat, menghancurkan gumpalan dan mendapatkan taburan pengikat serta saiz zarah yang seragam (German 1990). Antara faktor yang mempengaruhi proses pencampuran adalah ciri serbuk, sistem bahan pengikat dan faktor luaran yang merangkumi parameter mesin (Iriany 2002). Seterusnya pencampuran bahan suapan yang seragam dapat diperolehi berdasarkan nilai tork yang rendah dan

mantap (Mutsuddy & Ford 1995). Nilai tork yang rendah dan mantap menunjukkan bahan pengikat menyerak dengan baik semasa proses pencampuran bahan.

Sebelum proses pengacuan suntikan dilakukan, terlebih dahulu pengujian sifat reologi bahan perlu dilaksanakan bagi mengetahui ciri aliran. Ciri aliran yang merangkumi aspek kelikatan merupakan unsur penting dalam pencirian sifat reologi bahan. Kelikatan bahan suapan bergantung kepada kadar ricih, suhu, tekanan dan pembebanan serbuk (Liu et al. 2003). Kadar kelikatan yang optimum penting bagi memastikan aliran bahan suapan dapat memenuhi rongga acuan dan seterusnya boleh mengelakkan berlakunya pemisahan antara bahan pengikat dengan serbuk (Li et al. 2007). Secara dasarnya

terdapat tiga jenis aliran iaitu aliran mengembang, Newtonan dan pseudoplastik. Aliran yang bersifat pseudoplastik amat sesuai untuk proses penyuntikan yang kadar kelikatannya berkurangan selari dengan penambahan kadar ricih pada suhu tertentu.

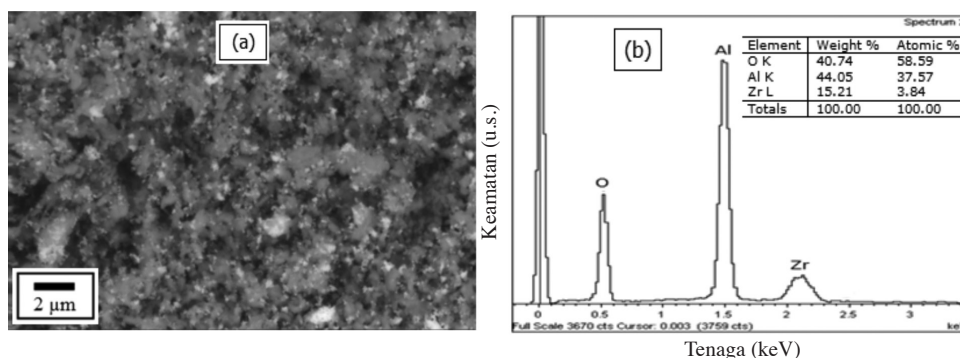
Keseragaman campuran dan pencirian sifat reologi bahan suapan yang berasaskan serbuk seramik telah dikaji oleh para penyelidik terdahulu (Krauss et al. 2005; Liu et al. 2011; Trunec & Hrazdera 2005; Vielma et al. 2008). Walau bagaimanapun, penyelidikan tersebut hanya tertumpu kepada penggunaan serbuk seramik yang berasaskan kepada bahan alumina ataupun zirkonia sahaja. Manakala penyelidikan ini memfokuskan kepada penggunaan serbuk seramik alumina-zirkonia dengan bahan pengikat yang terdiri daripada polietilena berketumpatan tinggi (HDPE), lilin parafin (PW) dan asid stearik (SA). Penggunaan komposit alumina-zirkonia sering mendapat perhatian penyelidik kerana sifat mekanik bahannya yang lebih baik berbanding sifat asal bahan tersebut. Menurut Azhar et al. (2009), penggabungan bahan alumina-zirkonia berjaya menghasilkan satu komposit seramik yang memiliki ketahanan patah, kekuatan lenturan dan kekerasan bahan yang tinggi.

Penggunaan bahan pengikat yang berasaskan bahan HDPE pula membantu meningkatkan kekuatan jasad anum dan pada masa yang sama berupaya menurunkan kadar kelikatan bahan suapan. Hal yang demikian didorong oleh pencirian habluran bahan HDPE yang mempunyai berat molekul rendah dengan indeks aliran leburan yang tinggi (Vielma et al. 2008). Kajian yang dilakukan oleh Sotomayor et al. (2010) mendapati, formulasi bahan pengikat berasaskan HDPE dapat memberikan keseragaman yang baik semasa proses pencampuran bahan. Sifat reologi bahannya yang baik telah meningkatkan tahap kebolehuannya. Justeru itu, kajian ini adalah untuk menentukan pembebanan serbuk yang optimum bagi tujuan pengacuan suntikan seramik. Pembebanan serbuk yang optimum ditetapkan berdasarkan kepada faktor keseragaman bahan serta pencirian sifat reologi bahan yang merangkumi aspek kelikatan, indeks hukum kuasa dan tenaga pengaktifan aliran.

BAHAN DAN KAEDAH

Bahan suapan yang digunakan ialah kombinasi serbuk alumina dengan zirkonia serta bahan pengikat yang terdiri daripada polietilena berketumpatan tinggi (HDPE), lilin parafin (PW) dan asid stearik (SA). Campuran komposisi serbuk alumina dengan zirkonia masing-masing adalah pada kadar berat 80% dan 20%. Serbuk alumina yang digunakan ialah AL-160SG-1 bersaiz purata 0.40 μm (Showa Denko Co., Jepun). Manakala serbuk zirkonia yang digunakan ialah KZ-3YF bersaiz purata 0.35 μm (KCM Corporation, Jepun). Sebelum proses pencampuran, serbuk seramik terlebih dahulu dikeringkan dalam relau elektrik pada suhu 110°C selama 1 jam. Seterusnya, proses pencampuran serbuk seramik dilakukan pada halaju 100 rpm selama 8 jam dengan nisbah bebola kepada serbuk adalah 5:1. Saiz purata dan ketumpatan serbuk alumina-zirkonia selepas proses pencampuran adalah 0.31 μm dan 4.46 g/cm³. Imej mikroskop elektron imbasan (SEM) dan analisis EDX (Zeiss Leo 1450) selepas proses pencampuran adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1.

Serbuk alumina-zirkonia kemudian diadun bersama bahan pengikat dengan menggunakan mesin pencampur dalaman jenis sesondol berkembar (Brabender W 50 EHT). Kadar pembebanan serbuk dan komposisi bahan pengikat seperti ditunjukkan dalam Jadual 1. Komposisi dan kombinasi bahan pengikat adalah berdasarkan kepada kajian yang telah dilakukan oleh Vielma et al. (2008). Manakala pembebanan serbuk ditetapkan merujuk kepada pembebanan serbuk kritikal (60.5% isi padu) yang diperoleh melalui ujian penyerapan minyak. Bahan suapan dilabelkan sebagai AZ51, AZ53, AZ55, AZ57 dan AZ59 merujuk kepada peratusan pembebanan serbuk. German dan Bose (1997) menyatakan bahawa kadar pembebanan serbuk yang optimum adalah sekitar 2 hingga 5% lebih rendah daripada pembebanan serbuk kritikal. Proses pencampuran bahan dilakukan pada suhu 140°C dengan halaju 20 rpm selama 30 min. Turutan bahan semasa proses pencampuran dimulakan dengan serbuk alumina-zirkonia kemudian diikuti pula dengan HDPE, PW dan SA. Seterusnya, proses pembutiran bahan suapan dilakukan dengan menggunakan mesin penghancur sehingga membentuk butiran-butiran kecil. Sementara itu, pencirian



RAJAH 1. (a) Imej SEM (*backscattered*) dan (b) analisis EDX bagi serbuk alumina-zirkonia selepas proses pencampuran

bagi bahan pengikat adalah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2.

Pencampuran bahan suapan yang seragam ditentukan berdasar kepada maklumat tork yang terakam pada mesin pencampur dalaman. Nilai tork yang rendah serta mantap menunjukkan proses pencampuran bahan adalah seragam. Morfologi bahan suapan pada keadaan mantap dicirikan dengan menggunakan SEM (Zeiss Evo MA10). Manakala pengujian sifat reologi bahan suapan dilakukan dengan menggunakan mesin reometer rerambut (Shimadzu CFT-500D). Acuan yang digunakan mempunyai rerambut yang bergaris pusat 1 mm dan panjang 10 mm ($L/D=10$). Ujian sifat reologi bahan dijalankan pada julat suhu antara 150 dan 170°C dengan beban kenaikan antara 20 dan 90 kgf. Suhu ujian disesuaikan dengan takat lebur bahan pengikat. Sementara itu, beban kenaikan merupakan nilai beban terendah yang ditentukan menerusi kaedah cuba-jaya. Sifat reologi bahan suapan seperti kelikatan dan kadar ricih pada suhu serta beban yang berbeza dapat ditentukan daripada uji kaji ini. Manakala nilai indeks hukum kuasa, n dan tenaga pengaktifan aliran, E , boleh ditentukan melalui penggunaan persamaan model hukum kuasa dan persamaan Arrhenius.

HASIL DAN PERBINCANGAN

PENCIRIAN KESERAGAMAN CAMPURAN

Penyediaan bahan suapan yang seragam penting bagi memudahkan proses penyuntikan. Pencampuran bahan suapan yang seragam juga akan mempengaruhi sifat reologi bahan. Justeru itu, perubahan tork sebagai fungsi masa pencampuran direkod berdasarkan kepada rintangan bilah pemutar. Keseragaman campuran diperoleh apabila nilai tork yang direkodkan mencapai keadaan mantap. Rajah 2 menunjukkan graf perubahan tork dan morfologi bahan suapan pada keadaan mantap dengan pembebanan

serbuk yang berbeza. Peningkatan nilai tork selari dengan pertambahan pembebanan serbuk. Ini kerana kandungan serbuk seramik yang tinggi menyebabkan geseran antara zarah-zarah semakin besar dan menjadikan rintangan tork pada bilah pemutar lebih tinggi (Iriany 2002).

Pembebanan serbuk yang diuji mencapai keadaan mantap pada tempoh masa yang singkat iaitu kurang daripada 30 min. Walau bagaimanapun, pada pembebanan serbuk 59% isi padu didapati serbuk seramik dan bahan pengikat tidak dapat bercampur dengan sempurna. Ini disebabkan sebahagian daripada serbuk seramik melekat pada dinding kebuk. Kadar pembebanan serbuk yang tinggi menyebabkan hanya sebahagian daripada serbuk seramik dapat dipegang oleh bahan pengikat. Walaupun masa pencampuran dipanjangkan kepada 45 min, namun ia masih lagi tidak menunjukkan bentuk seperti adunan. Perkara ini seterusnya menyebabkan ujian reologi pada pembebanan tersebut tidak dapat dilaksanakan.

Bagi pembebanan serbuk 51% isi padu, tork mencapai keadaan mantap pada masa yang paling singkat iaitu 17 min (*torque at steady state*; $T_{ss}=0.9$ Nm) berbanding dengan pembebanan serbuk pada 53% isi padu yang mengambil masa selama 21 min ($T_{ss}=1.2$ Nm). Manakala bagi pembebanan serbuk 55% isi padu, masa yang diperlukan untuk bahan suapan mencapai keadaan seragam ialah selama 25 min ($T_{ss}=1.6$ Nm). Seterusnya bagi pembebanan serbuk 57% isi padu, perubahan tork mengambil masa yang lebih lama sebelum mencapai keadaan mantap iaitu selama 27 min ($T_{ss}=2.5$ Nm). Fenomena ini berlaku sejajar dengan hasil kajian yang dilakukan oleh Krauss et al. (2005) dan Vielma et al. (2008) yang menggunakan serbuk alumina dan HDPE sebagai bahan suapan.

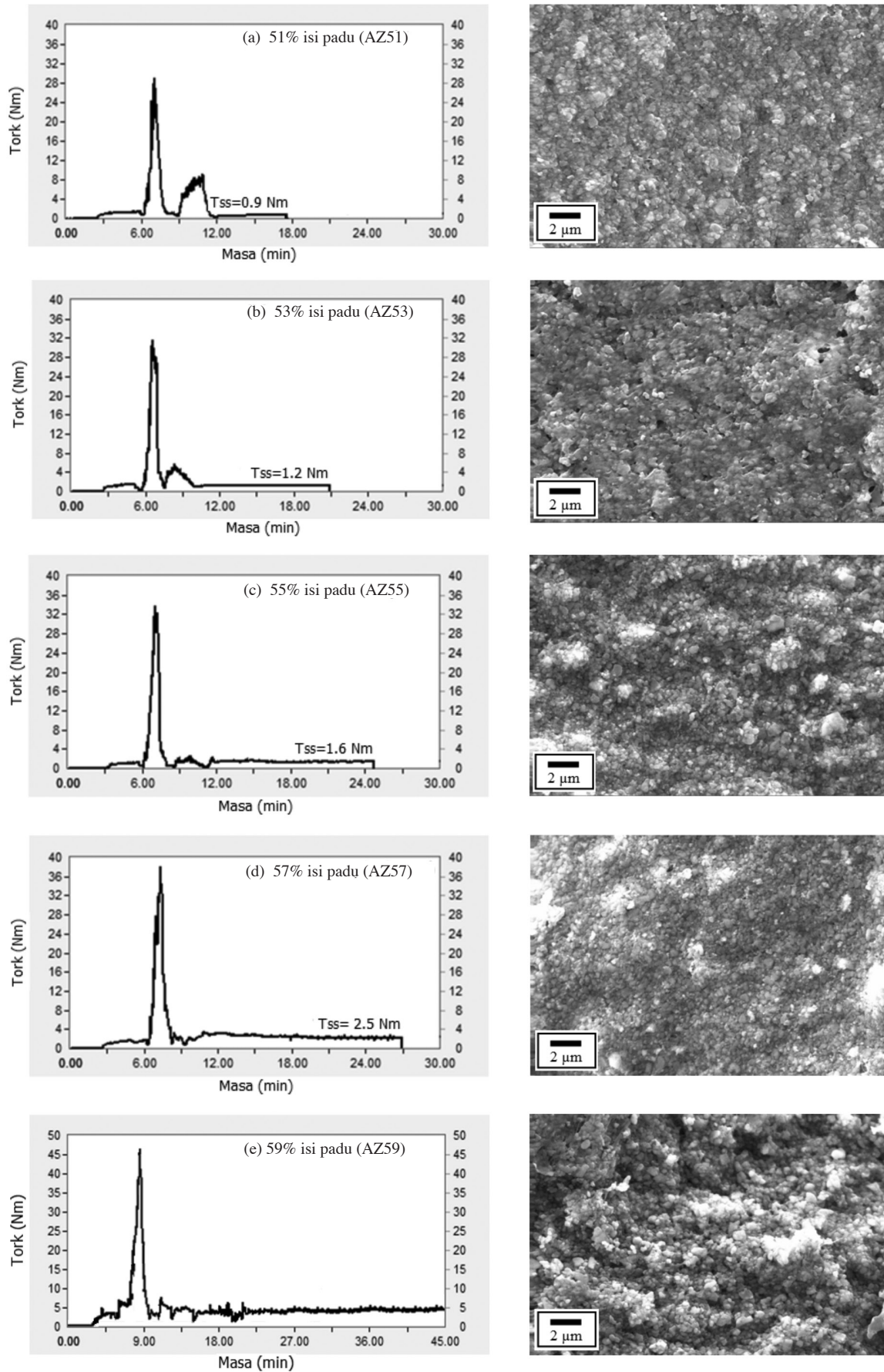
Pertambahan masa pencampuran sebelum tork mencapai keadaan mantap menunjukkan terdapat perbezaan dalam kelikatan bahan suapan. Selain itu, saiz serbuk seramik yang kecil juga turut meningkatkan pembentukan gumpalan. Peningkatan beban serbuk

JADUAL 1. Komposisi bahan suapan

Bahan suapan	Serbuk seramik/Bahan pengikat (% isi padu)	Bahan pengikat (% berat)		
		HDPE	PW	SA
AZ51	51/49			
AZ53	53/47			
AZ55	55/45	50	46	4
AZ57	57/43			
AZ59	59/41			

JADUAL 2. Pencirian komponen bahan pengikat

Bahan pengikat	Pembekal	Ketumpatan (g/cm^3)	Takat lebur ($^{\circ}\text{C}$)	Indek leburan ($\text{g}/10$ min)
HDPE	Titan Petchem	0.957	131.2	20
PW	Emercy Oleochemicals	0.89	57.5	-
SA	Emercy Oleochemicals	0.88	68.3	-



RAJAH 2. Pencirian pencampuran bahan suapan pada pembebanan serbuk:
 (a) 51% isi padu, (b) 53% isi padu, (c) 55% isi padu, (d) 57% isi padu dan (e) 59% isi padu

menyebabkan semakin banyak gumpalan terbentuk sekaligus meningkatkan tahap kelikatan campuran (German & Bose 1997). Hal yang demikian memerlukan pertambahan masa semasa proses pencampuran untuk memecahkan gumpalan tersebut dan seterusnya menjadikan bahan suapan seragam.

PENCIRIAN SIFAT REOLOGI BAHAN SUAPAN

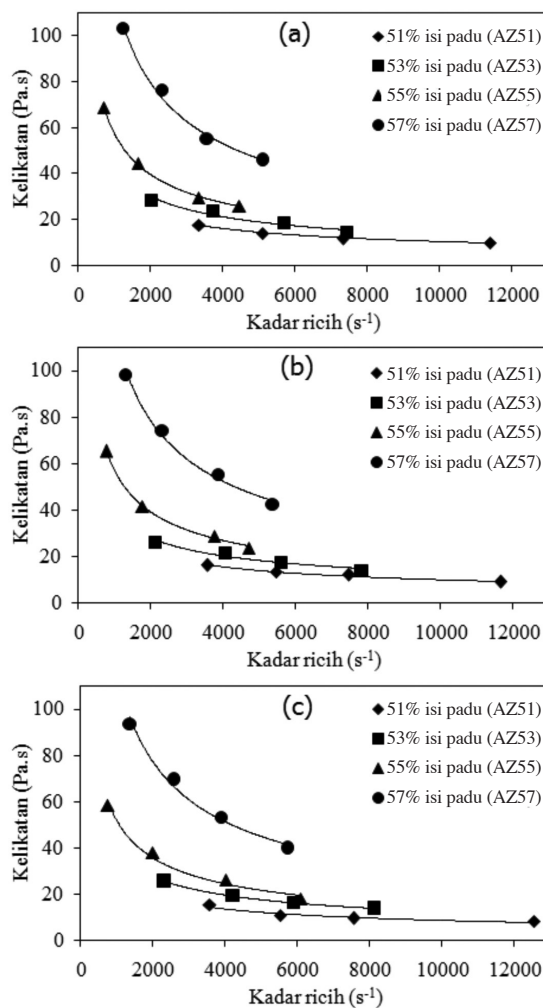
Pencirian sifat reologi bahan suapan penting bagi mengenal pasti ciri aliran dan kesesuaiannya untuk proses pengacuan suntikan. Ini kerana kebanyakan bahan pengikat yang berasaskan bahan polimer akan mengalami perubahan ciri-ciri aliran yang agak kompleks apabila dicampur bersama serbuk seramik sebagai bahan suapan. Penilaian sifat reologi bahan suapan adalah berdasarkan kepada kelikatan bahan suapan dan kepekaan kelikatan terhadap perubahan kadar ricih, suhu dan pembebanan serbuk (Li et al. 2007). Kadar ricih bagi proses pengacuan biasanya dalam julat antara 10^2 dan 10^5 s^{-1} dengan nilai kelikatan maksimum boleh mencecah sehingga 10^3 Pa.s pada suhu suntikan (Supati et al. 2000). Kelikatan juga bergantung kepada suhu, sedikit perubahan pada suhu akan memberikan impak yang besar terhadap kelikatannya. Selain itu, kadar pengisian bahan pengikat ke dalam serbuk seramik turut memberikan kesan ke atas kelikatan bahan suapan.

KESAN PEMBEBANAN SERBUK KE ATAS KELIKATAN

Kadar pembebanan serbuk memainkan peranan penting dalam mempengaruhi kelikatan bahan suapan. Rajah 3 menunjukkan kelikatan bahan suapan berkait rapat dengan kadar pembebanan serbuk. Secara dasarnya nilai kelikatan akan meningkat selari dengan peningkatan pembebanan serbuk di dalam bahan suapan dan ini menjadikannya lebih bersifat pseudoplastik. Walaupun kadar kelikatan pada pembebanan serbuk 57% isi padu adalah lebih tinggi namun bahan suapan masih berada dalam julat yang dibenarkan. Berdasarkan persamaan hukum kuasa pada kadar ricih 100 s^{-1} , nilai kelikatannya adalah 476.8 Pa.s berbanding nilai kelikatan yang disyorkan iaitu di bawah 1000 Pa.s pada suhu penyuntikan. Peningkatan nilai kelikatan adalah disebabkan oleh geseran yang berlaku antara zarah-zarah akibat daripada pembebanan serbuk yang tinggi (Murtadhahadi 2007). Pada masa ini, kandungan bahan pengikat yang memberikan sifat kebolehaliran kepada serbuk seramik telah berkurangan. Walau bagaimanapun, pemilihan pembebanan serbuk yang tinggi dapat meminimumkan pengecutan, mengelakkan keretakan dan seterusnya meningkatkan sifat mekanik bahan (Roh et al. 2011).

KESAN KADAR RICIH KE ATAS KELIKATAN

Rajah 3 menunjukkan perubahan kelikatan terhadap kadar ricih pada pembebanan serbuk serta suhu yang berbeza. Keputusan uji kaji jelas menunjukkan bahawa kesemua bahan suapan bersifat pseudoplastik dengan nilai kelikatan berkurang selari dengan penambahan kadar ricih.



RAJAH 3. Kesan pembebanan serbuk ke atas kelikatan bahan suapan pada suhu: (a) 150°C , (b) 160°C dan (c) 170°C

Fenomena ini berlaku kerana terpecahnya gumpalan yang terbentuk di dalam bahan suapan akibat daripada kadar ricih yang tinggi dan seterusnya menjadikan kelikatan bahan suapan semakin berkurangan (Liu & Tseng 2000). Aliran yang bersifat pseudoplastik amat sesuai untuk proses penyuntikan kerana ia menunjukkan pemisahan bahan pengikat tidak berlaku. Keadaan ini seterusnya dapat mengurangkan masalah pemancutan.

Hubungan antara kelikatan (η), kadar ricih ($\dot{\gamma}$) dan indeks hukum kuasa (n) dapat dikaitkan melalui persamaan hukum kuasa berikut (German 1990):

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

dengan K adalah pemalar. Bagi aliran yang bersifat pseudoplastik, nilai n perlulah kurang daripada 1 ($n < 1$), dengan nilai n merujuk kepada tahap kepekaan aliran terhadap perubahan kadar ricih. Nilai n yang diperoleh adalah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3. Secara umumnya kepekaan bahan suapan terhadap perubahan kadar ricih meningkat apabila suhu meningkat.

JADUAL 3. Indeks hukum kuasa, n dan tenaga pengaktifan aliran, E , pada pembebanan serbuk serta suhu yang berbeza

Bahan suapan	Suhu (°C)	n	E (kJ/mol)
51% isi padu	150	0.53	10.74
	160	0.51	
	170	0.52	
53% isi padu	150	0.49	6.24
	160	0.52	
	170	0.50	
55% isi padu	150	0.46	4.60
	160	0.45	
	170	0.45	
57% isi padu	150	0.41	1.55
	160	0.41	
	170	0.40	

Peningkatan pembebanan serbuk juga menunjukkan situasi yang sama, seperti yang dilaporkan oleh Sotomayor et al. (2010) dan Vielma et al. (2008). Walau bagaimanapun, nilai n bagi bahan suapan yang dibangunkan masih berada dalam julat yang dibenarkan iaitu antara 0.1 sehingga 0.7 (German 1990). Pada pembebanan serbuk 57% isi padu, nilai n yang diperoleh adalah lebih rendah. Nilai n yang rendah menunjukkan tahap kepekaan yang tinggi dan ia amat sesuai untuk menghasilkan komponen yang bersaiz kecil dan berbentuk kompleks (Li et al. 2007).

KESAN SUHU KE ATAS KELIKATAN

Kelikatan juga sangat peka kepada perubahan suhu. Peningkatan suhu akan mengurangkan kadar kelikatan bahan suapan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Fenomena ini disebabkan oleh penambahan isi padu bahan suapan selaras dengan pengembangan bahan pengikat dan pemecahan ikatan antara bahan pengikat dengan serbuk seramik semasa peningkatan suhu (Liu et al. 2005). Seterusnya hubungan antara kelikatan dengan suhu dapat dijelaskan dengan persamaan Arrhenius seperti berikut (German 1990):

$$\eta = \eta_0 \exp(E/RT) \quad (2)$$

dengan η ialah nilai kelikatan, η_0 ialah kelikatan pada suhu rujukan, R pula merujuk kepada pemalar gas, T ialah suhu dalam unit Kelvin, manakala E adalah tenaga pengaktifan aliran. Nilai E yang tinggi menunjukkan kelikatan bahan suapan adalah sangat sensitif terhadap perubahan suhu. Walau bagaimanapun, nilai E juga turut bergantung kepada kombinasi dan komposisi bahan pengikat (Ibrahim et al. 2009).

Bagi uji kaji yang telah dijalankan, nilai E yang diperoleh pada kadar ricih 1000 s⁻¹ adalah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3. Nilai E didapati berkurangan selari dengan peningkatan pembebanan serbuk. Kajian yang dilakukan oleh Trunec dan Hrazdera (2005) juga

menunjukkan situasi yang sama dengan nilai E yang diperoleh sekitar 14.0 hingga 27.8 kJ/mol pada kadar ricih 800 s⁻¹. Menurut Sotomayor et al. (2010), nilai E yang semakin rendah didorong oleh kekonduksian haba yang lebih baik akibat daripada peningkatan pembebanan serbuk dalam bahan suapan. Oleh yang demikian, pembebanan serbuk 57% isi padu menunjukkan hasil yang terbaik berbanding yang lain. Nilai E yang rendah menjadikan kelikatan kurang peka terhadap perubahan suhu. Manakala nilai E yang tinggi akan menyebabkan kadar kelikatan berubah-ubah apabila berlakunya keadaan suhu tidak stabil semasa proses penyuntikan. Seterusnya keadaan ini akan menyebabkan terjadinya keretakan dan herotan pada komponen yang disuntik (Liu et al. 2005). Justeru itu bahan suapan yang sesuai untuk proses penyuntikan mestilah mempunyai nilai E yang rendah bagi mengelakkan ketidakstabilan aliran.

KESIMPULAN

Proses pencampuran dan pengujian sifat reologi bahan telah dilakukan bagi menentukan pembebanan serbuk yang optimum untuk bahan suapan yang berasaskan kepada serbuk seramik alumina-zirkonia. Daripada uji kaji yang telah dijalankan, hampir keseluruhan bahan suapan mencapai keadaan seragam kurang daripada 30 min dengan nilai tork yang rendah. Manakala pengujian sifat reologi bahan pula menunjukkan bahan suapan yang dibangunkan sesuai untuk pengacuan suntikan kerana bersifat pseudoplastik dengan kadar kelikatan yang rendah. Kajian juga mendapati pembebanan serbuk, kadar ricih dan suhu memainkan peranan penting dalam mempengaruhi kelikatan bahan suapan. Pembebanan serbuk pada 57% isi padu dipercayai paling optimum untuk pengacuan suntikan seramik berdasarkan kepada nilai indeks hukum kuasa dan tenaga pengaktifan aliran yang rendah. Oleh yang demikian masalah seperti keretakan, herotan dan pengecutan pada komponen yang disuntik dapat dikurangkan.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kerajaan Malaysia atas tajaan projek ini melalui Geran Penyelidikan UKM-AP-NBT-14-2010 dan OUP-2012-075. Ucapan terima kasih juga kepada Institut Teknikal Jepun-Malaysia dan Jabatan Perkhidmatan Awam Malaysia atas pemberian biasiswa pengajian.

RUJUKAN

- Azhar, A.Z.A., Ratnam, M.M. & Ahmad, Z.A. 2009. Effect of Al₂O₃/YSZ microstructures on wear and mechanical properties of cutting inserts. *Journal of Alloys and Compounds* 478: 608-614.
- German, R.M. 1990. *Powder Injection Molding*. New Jersey: Metal Powder Industries Federation.
- German, R.M. & Bose, A. 1997. *Injection Molding for Metal and Ceramic*. New Jersey: Metal Powder Industries Federation.
- Ibrahim, M.H.I., Muhamad, N. & Sulong, A.B. 2009. Rheological investigation of water atomised stainless steel powder for micro metal injection molding. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 4(1): 1-8.
- Iriany. 2002. Kajian sifat reologi bahan suapan yang mengandungi stearin sawit untuk proses pengacuan suntikan logam. Tesis Ph.D., Universiti Kebangsaan Malaysia (tidak diterbitkan).
- Krauss, V.A., Pires, E.N., Klein, A.N. & Fredel, M.C. 2005. Rheological properties of alumina injection feedstocks. *Materials Research* 8(2): 187-189.
- Li, Y., Li, L. & Khalil, K.A. 2007. Effect of powder loading on metal injection molding. *Journal of Materials Processing Technology* 183: 432-439.
- Liu, D.M. & Tseng, W.J. 2000. Rheology of injection-molded zirconia-wax mixtures. *Journal of Materials Science* 35: 1009-1016.
- Liu, L., Loh, N.H., Tay, B.Y., Tor, S.B., Murakoshi, Y. & Maeda, R. 2005. Mixing and characterisation of 316L stainless steel feedstock for micro powder injection molding. *Materials Characterization* 54: 230-238.
- Liu, W., Xie, Z., Bo, T. & Yang, X. 2011. Injection molding of surface modified powders with high solid loadings: A case for fabrication of translucent alumina ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* 31: 1611-1617.
- Liu, Z.Y., Loh, N.H., Tor, S.B. & Khor, K.A. 2003. Characterization of powder injection molding feedstock. *Materials Characterization* 49: 313-320.
- Murtadhahadi. 2007. Parameter penyuntikan bagi proses pengacuan suntikan logam menggunakan bahan suapan daripada SS 316L, PEG, PMMA dan asid stearik. Tesis Sarjana Sains, Universiti Kebangsaan Malaysia (tidak diterbitkan).
- Mutsuddy, B.C. & Ford, R.G. 1995. *Ceramic Injection Molding*. London: Chapman and Hall.
- Roh, J.Y., Kwon, J., Lee, C.S. & Choi, J.S. 2011. Novel fabrication of pressure-less sintering of translucent powder injection molded (PIM) alumina blocks. *Ceramics International* 37: 321-326.
- Sotomayor, M.E., Varez, A. & Levenfeld, B. 2010. Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316 L powder injection moulding feedstocks. *Powder Technology* 200: 30-36.
- Supati, R., Loh, N.H., Khor, K.A. & Tor, S.B. 2000. Mixing and characterization of feedstock for powder injection molding. *Materials Letters* 46: 109-114.
- Trunec, M. & Hrazdera, J. 2005. Effect of ceramic nanopowders on rheology of thermoplastic suspensions. *Ceramics International* 31: 845-849.
- Vielma, P.T., Cervera, A., Levenfeld, B. & Varez, A. 2008. Production of alumina parts by powder injection molding with a binder system based on high density polyethylene. *Journal of the European Ceramic Society* 28: 763-771.

Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM bangi, Selangor D.E.
Malaysia

* Pengarang untuk surat-menyurat; email: muchtar@eng.ukm.my

Diserahkan: 13 Ogos 2012

Diterima: 2 Februari 2013