

Kesan Agen Penyerak dan pH Ampaian dalam Pemprosesan Berkoloid Serbuk Nano Zirkonia

(Effect of Dispersant Agent and Suspension pH in Colloidal Processing of Nano Zirconia Powder)

Noor Faeizah Amat, Andanastuti Muchtar, Mariyam Jameelah Ghazali & Norziha Yahaya

ABSTRAK

Serbuk seramik bersaiz nano cenderung mengalami masalah aglomerat semasa pemprosesan serbuk disebabkan oleh kewujudan daya van der Waals pada permukaan zarah halus yang menggalakkan zarah untuk saling bergumpal. Pemprosesan berkoloid merupakan kaedah yang dapat membantu mencegah pengaglomeratan zarah halus dan membolehkan penyebaran zarah menjadi lebih terkawal. Pengaruh agen penyerak dan pH ampaian dalam pemprosesan berkoloid serbuk nano zirkonia (3Y-TZP) telah diuji dalam kajian ini. Agen penyerak Polyethylene Imine (PEI) dan Polydiallyldimethyl Ammonium Chloride (PDADMAC) telah digunakan dalam ujikaji ini dengan kuantiti agen penyerak masing-masing adalah sebanyak 0.0%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6% dan 0.7 % daripada jumlah berat zirkonia. Jenis dan jumlah optimum agen penyerak yang boleh memaksimumkan penyebaran serbuk dalam ampaian zirkonia ditentukan menggunakan alat meter kelikatan. Kesan pH ampaian diuji terhadap ampaian zirkonia yang mengandungi agen penyerak dan tanpa agen penyerak. Jasad anum dihasilkan melalui proses penuangan buburan dan dipra-sinterkan pada suhu 600 °C selama 45 minit sebelum disinter pada suhu 1100 °C selama 2 jam. Kajian ini secara keseluruhannya menunjukkan agen penyerak PEI sesuai digunakan pada keadaan pH berasid. Ketumpatan dan kekerasan sampel adalah tinggi pada pH 4 dengan penambahan PEI iaitu dengan peratus ketumpatan 98% daripada nilai teori dan nilai kekerasan adalah 4.35GPa. Sifat mekanik zirkonia didapati mampu ditingkatkan sekiranya penyerakan zarah ampaian zirkonia berlaku dengan baik berikutan penambahan agen penyerak yang menepati kuantiti optimumnya serta penyesuaian pH ampaian yang tepat.

Kata kunci: Pemprosesan berkoloid; nano zirkonia; agen penyerak; pH ampaian

ABSTRACT

Nano-sized ceramic powder tends to agglomerate during powder processing because of the existence of van der Waals forces between the fine particles, which promote particle aggregation. Colloidal processing can help prevent the agglomeration of fine particles and allow particle dispersion to be controlled during powder processing. The influence of a dispersant agent and suspension pH in the colloidal processing of nano-zirconia powder (3Y-ZP) is studied in this paper. Dispersant agents Polyethyleneimine (PEI) and Polydiallyldimethyl Ammonium Chloride (PDADMAC) were used in the experiment, with the quantity of each dispersant agent at 0.0%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, and 0.7 % of the zirconia weight. The type and optimum quantity of the dispersant agent that can maximize zirconia dispersion in the suspension is determined by using a viscometer. The effect of suspension pH was investigated in suspensions with and without a dispersant agent. A green body is then produced by slip casting and is presintered at 600 °C for 45 minutes, then further sintered at 1100 °C for 2 hours. This study shows that the dispersant agent PEI is suitable for use in an acidic condition. The density and hardness of the samples are high at pH 4 with the addition of 0.5 wt% PEI. The density is 98% of the theoretical density, and hardness is 4.35 GPa. It was found that mechanical properties of zirconia may be enhanced with the use of dispersion agent at the correct quantity as well as optimum suspension pH.

Keywords: Colloidal processing; nano sized zirconia; dispersant agent; suspension pH

PENDAHULUAN

Seramik berketulenan tinggi dan berira halus semakin mendapat perhatian ramai penyelidik kerana sifat mekaniknya yang bagus terutama untuk aplikasi kejuruteraan yang memerlukan penggunaan struktur seramik (Andanastuti et al. 2004). Namun begitu, bukan mudah untuk menghasilkan padatan atau struktur seramik yang berira halus, ini disebabkan penghasilannya memerlukan penggunaan serbuk dengan saiz zarah yang halus yang mana ianya cenderung untuk aglomerat dan akhirnya akan merendahkan sifat mekanik padatan seramik itu (Bowen et al. 2005; Zhang et al. 2006; Kevin 2011; Pradhan et al. 2012).

Fenomena aglomerat ini berlaku disebabkan oleh daya tarikan Van der Waals yang wujud antara permukaan zarah yang halus dan menyebabkan zarah-zarah ini bergumpal antara satu sama lain (Tekeli & Demir 2005). Masalah aglomerat ini boleh mengakibatkan kelancaran proses pembentukan padatan dan pensinteran seramik terganggu pada peringkat seterusnya. Kewujudan aglomerat, keliangan, dan ketidakhomogenan padatan biasanya akan berlaku pada peringkat pembentukan padatan dan mengakibatkan penurunan sifat mekanik bahan dari segi ketumpatan, saiz ira dan juga kekerasan di akhir proses pensinteran.

Pemprosesan berkolooid adalah proses yang dapat mengurangkan berlakunya masalah aglomerat dan merupakan satu langkah yang berkesan bagi penyediaan struktur seramik dengan kestabilan dan kehomogenan yang baik (Lange 1989). Pemprosesan berkolooid berfungsi untuk memisahkan zarah halus dalam satu medium cecair ataupun ampaiian dengan menggunakan bahan tambah atau agen penyerak tertentu (Lewis 2000). Pembentukan bahan seramik menggunakan pemprosesan berkolooid akan memperbaiki mikrostruktur bahan. Proses ini akan meningkatkan keseragaman pepadatan dan merendahkan saiz liang bahan seramik serta keseragaman mikrostruktur seramik akan menjadi lebih baik (Bowen et al. 2005). Tambahan pula, kaedah ini mendorong kepada penggunaan suhu pensinteran yang lebih rendah berbanding pemprosesan seramik yang lain (Ismail 2006).

Dalam pemprosesan berkolooid, terdapat faktor penting yang perlu dikawal bagi menghasilkan ampaiian yang mempunyai penyerakan zarah yang baik untuk kepekatan tertentu, antaranya seperti kuantiti optimum agen penyerak yang diperlukan serta pH ampaiian yang sesuai (Sun et al. 1997). Kehadiran agen penyerak dan pengawalan pH ampaiian pada kadar yang optimum akan meningkatkan kekuatan ionik zarah bagi mengatasi pengaglomeratan (Sun et al. 1999).

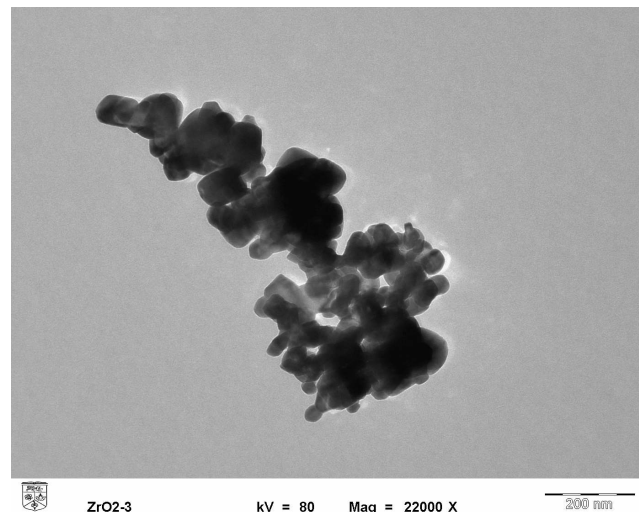
Penambahan agen penyerak ke dalam ampaiian seramik akan mengurangkan kecenderungan zarah seramik menghampiri satu sama lain dan mengelak pembentukan aglomerat, sekaligus ampaiian seramik berkelikatan rendah

dapat dihasilkan (Andanastuti et al. 2004). Kebiasaannya polimer digunakan sebagai agen penyerak di dalam pemprosesan berkolooid untuk memperolehi padatan serbuk yang homogen pada peringkat proses pepadatan serbuk (Zhang et al. 2006). Contoh agen penyerak yang biasa digunakan dalam proses penyerakan serbuk seramik adalah PEI. PEI merupakan kationik polimer dan sangat berkesan bagi meneutralkan lebihan cas anionik dalam pemprosesan berkolooid terutamanya dalam keadaan berasid atau pH neutral (Sun et al. 1999; Tang et al. 2000).

Menurut Tang et al. (2000), pemprosesan berkolooid merupakan kaedah yang terkenal dan sering digunakan dalam pembentukan serbuk seramik bersaiz mikro. Namun begitu, laporan mengenai kajian pemprosesan berkolooid bagi serbuk seramik bersaiz nano masih kurang dijalankan. Oleh itu, kajian ini dilakukan untuk melihat kesesuaian zarah zirkonia bersaiz nano dalam pemprosesan berkolooid. Kesan parameter pemprosesan berkolooid ke atas sifat-sifat mekanik seramik zirkonia bersaiz nano dikaji dalam kertas kerja ini. Berdasarkan keputusan yang diperolehi kesan parameter pemprosesan berkolooid dibincangkan.

BAHAN DAN KAEDAH

Kajian ini menggunakan serbuk zirkonia separa stabil dengan yttria (3Y-TZP) yang berketulenan tinggi, purata saiz serbuk adalah antara 20 nm hingga 50 nm dengan luas permukaan spesifik 20 m²/g (dibekalkan oleh Hasrat Bestari Sdn. Bhd.). Rajah 1 menunjukkan mikrograf TEM bagi serbuk zirkonia yang digunakan dalam kajian ini. Dua jenis agen penyerak yang digunakan iaitu PEI dan juga PDADMAC dibekalkan oleh Sigma-Aldrich. Asid nitrik (HNO₃) daripada R & M Chemicals digunakan untuk mengawal pH ampaiian yang disediakan.



RAJAH 1. Mikrograf TEM bagi serbuk zirkonia 3Y-TZP

Sebanyak 40g serbuk zirkonia diperlukan untuk menyediakan 100 ml ampaian yang mengandungi 10 vol% zirkonia. Ampaian dikacau dengan menggunakan pengacau magnetik selama 45 minit dan beberapa ampaian disediakan berdasarkan kuantiti dan jenis agen penyerak yang diuji. Agen penyerak, PEI dan PDADMAC ditambah masing-masing pada kuantiti 0.0%, 0.3%, 0.4% 0.5%, 0.6% dan 0.7 % daripada berat zirkonia. Ampaian kemudiannya dimasukkan ke dalam kebuk ultrasonik untuk tujuan pemeraiian selama 15 minit sebelum dibiarkan selama 24 jam pada suhu bilik untuk sedimentasi ampaian.

Mendakan keras ampaian diasingkan dan ujian kelikatan dijalankan ke atas ampaian menggunakan meter kelikatan (Viscometer Brookfield DV-II-Pro). Buburan ampaian pada mulanya diricih pada kadar 22.5 s⁻¹ selama 5 min. Kadar ricih ditingkatkan kepada gandaan 22.5 s⁻¹ bagi setiap selang masa 5 minit untuk mendapatkan kadar ricih akhir 225.0 s⁻¹. Kadar ricih, kelikatan, tork, kelajuan putaran, suhu, dan masa bagi setiap selang masa direkodkan.

Keputusan yang diperoleh daripada ujikaji kelikatan mengenai pengaruh agen penyerak terhadap penyerakan zarah digunakan untuk menguji kesan pH ampaian terhadap pemprosesan berkolid pula. Sepuluh ampaian zirkonia dengan isipadu 100 ml disediakan dan dibahagikan kepada dua bahagian dengan masing-masing mempunyai pH 1 hingga pH 5. Bahagian pertama adalah ampaian yang ditambah dengan agen penyerak PEI (berdasarkan keputusan ujikaji kelikatan), manakala bahagian yang kedua adalah ampaian yang tidak ditambah dengan agen penyerak. Nilai pH ampaian diukur dengan menggunakan meter pH (Mettler Toledo) dan dimasukkan ke dalam kebuk ultrasonik selama 15 minit, kemudian dibiarkan selama 24 jam untuk mengasingkan mendakan keras sebelum dituang ke dalam acuan Teflon.

Buburan yang dituang dibiarkan kering pada suhu bilik 25°C selama 24 jam. Jasad anum yang telah kering dikeluarkan daripada acuan dan dipra-sinter pada suhu 600 °C selama 45 minit. Sampel kemudiannya disinter pada suhu 1100 °C selama 2 jam dalam relau dengan kadar pensinteran 3°C/min. Seterusnya pengaruh agen penyerak dan pH ampaian terhadap mikrostruktur dan morfologi sampel dicirikan menggunakan SEM (Hitachi SU8000), manakala ujikaji kekerasan menerusi ujian kekerasan Vickers pula dijalankan dengan menggunakan alat penguji kekerasan (Shimadzu DUH-W201S). Ketumpatan diuji menggunakan alat pengukur ketumpatan (Mettler Toledo Newclassic MS) berdasarkan prinsip *Archimedes*. Peratus ketumpatan bandingan sampel dengan ketumpatan teori (6.10 g/cm³) ditentukan menggunakan persamaan (1) berikut (Enoiu et al. 2004):

$$\text{Peratus ketumpatan} = \frac{\text{Ketumpatan jasad tersinter}}{\text{Ketumpatan teori}} \times 100\% \quad (1)$$

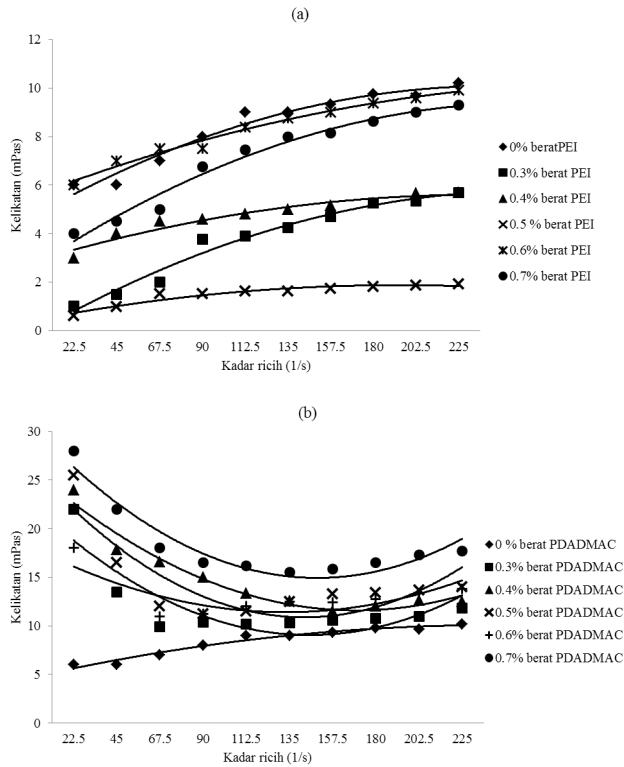
Kestabilan ampaian zirkonia telah dinilai dengan pengukuran kelikatan ampaian pada kadar ricih yang berbeza. Ampaian zirkonia tanpa sebarang agen penyerak PEI menunjukkan nilai kelikatan yang tinggi dalam Rajah 2(a). Walau bagaimanapun, kelikatan yang rendah dapat diperhatikan pada ampaian yang mengandungi 0.5 % berat PEI, yang mana kelikatannya sedikit meningkat pada permulaan proses, tetapi kemudiannya kekal rendah dan konsisten dengan peningkatan kadar ricih. Selain itu, berdasarkan keputusan ujikaji ini didapati penambahan kuantiti PEI yang lebih tinggi iaitu dengan penambahan sebanyak 0.6% dan 0.7% berat PEI ke dalam ampaian zirkonia menyebabkan sifat reologi ampaian berubah menjadi lebih likat. Hal ini menunjukkan aglomerat berlaku dalam ampaian.

Berbeza pula keputusan ujikaji kelikatan ampaian dengan penambahan agen penyerak PDADMAC, ampaian zirkonia tanpa penambahan PDADMAC mempunyai tahap kelikatan yang terendah seperti dalam Rajah 2(b). Penambahan PDADMAC dari julat 0.3% hingga 0.7% berat didapati tidak sesuai untuk ampaian zirkonia kerana penambahan PDADMAC pada julat itu tidak membantu proses penyerakan zarah, sebaliknya menyebabkan nilai kelikatan ampaian menjadi tidak konsisten dengan pembentukan aglomerat dan seterusnya menghasilkan nilai kelikatan ampaian yang tinggi. Berdasarkan Reed (1995), penambahan agen penyerak yang melebihi julat penggunaannya yang optimum akan mendorong kepada kesesakan zarah dan cas ion di lapisan dwi-elektrik dan penyerakan zarah yang melampau berlaku. Hal ini akhirnya melemahkan tolakan antara zarah dan menggalakkan penganglomeratan. Manakala, kandungan agen penyerak yang kurang daripada nilai optimum pula tidak mampu untuk menghasilkan daya tolakan pada lapisan dwi-elektrik bagi mengatasi daya-daya tarikan yang wujud antara zarah.

Kelikatan ampaian yang terendah dapat dicapai oleh ampaian dengan penambahan PDADMAC adalah lebih daripada 10 mPas berbanding ampaian dengan penambahan PEI, kelikatan yang terendah adalah kurang daripada 2 mPas. Oleh yang demikian, kuantiti agen penyerak PEI sebanyak 0.5% berat boleh diandaikan sebagai kuantiti optimum agen penyerak PEI disebabkan keberkesannya menghasilkan ampaian dengan kelikatan yang konsisten rendah dengan peningkatan kadar ricih. Keputusan ini disokong oleh kajian terdahulu oleh Andanastuti et al. 2004, yang mana nilai kelikatan ampaian yang minimum menunjukkan kadar penyerakan zarah yang terbaik tanpa wujudnya aglomerat. Hal ini disebabkan kadar aglomerat zarah yang rendah membolehkan ampaian untuk mengalir dan bergerak dengan lebih mudah.

Faedah penambahan agen penyerak ke dalam ampaian tidak dapat dimanfaatkan sekiranya pemilihan jenis agen penyerak yang tidak bersesuaian dengan ampaian serta penggunaan agen penyerak tidak menepati kuantiti optimumnya. Hal ini malahan menyebabkan ampaian mudah membentuk aglomerat dan menghasilkan ampaian dengan

kelikatan yang tinggi dan tidak sesuai bagi pemprosesan seramik, khususnya ketika peringkat pembentukan padatan seperti penuangan bubuk (Tsetsekou et al. 2001). Oleh itu, analisis kesan pH terhadap pemprosesan berkolid tertumpu pada ampaian zirkonia dengan penambahan 0.5% berat PEI.

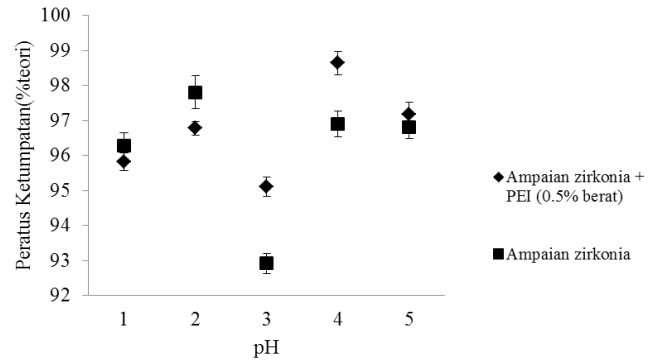


RAJAH 2. Kesan penambahan kadar ricih terhadap kelikatan ampaian zirkonia dengan kuantiti (a) PEI dan (b) PDADMAC berbeza

Peratus ketumpatan teori sampel jasad tersinter pada pH 1- pH 5 dengan penambahan agen penyerak (0.5% berat PEI) dan tanpa penambahan agen penyerak ditunjukkan dalam Rajah 3. Peratusan ketumpatan sampel dengan PEI pada pH 4 adalah paling tinggi dengan peratus ketumpatan melebihi 98% (daripada nilai teori), manakala peratus ketumpatan sampel pada pH 3 adalah rendah pada kedua-dua keadaan dengan kehadiran PEI dan tanpa PEI iaitu masing-masing pada 95.5% dan 93% (daripada nilai teori). Walau bagaimanapun, peratusan ketumpatan sampel pada pH 1, pH 2 dan pH 5 tidak menunjukkan perbezaan yang ketara dengan penambahan dan tanpa penambahan PEI.

Oleh yang demikian, ampaian pada pH 4 dengan penambahan PEI menunjukkan kadar penyerakan yang baik kerana nilai ketumpatan jasad tersinter yang diperolehi menghampiri nilai teori. Keputusan ini disokong oleh kajian Garrido dan Aglietti (2001), yang mana ampaian dengan pemeraihan zarah yang baik mampu menghasilkan jasad tersinter berketumpatan tinggi. Menurut Liu (1999) dan Hoepfner dan Case (2003), zarah serbuk yang terserak dengan baik dan homogen akan menjalani proses penyusunan zarah dan pepadatan serbuk yang lebih sekata tanpa sebarang kecacatan dan keliangan pada struktur

seramik yang dibentuk ketika proses penuangan bubuk. Pembentukan aglomerat pada peringkat pemeraihan ampaian boleh menyebabkan keliangan berlaku ketika pepadatan serbuk dan ini seterusnya akan merendahkan ketumpatan jasad tersinter.

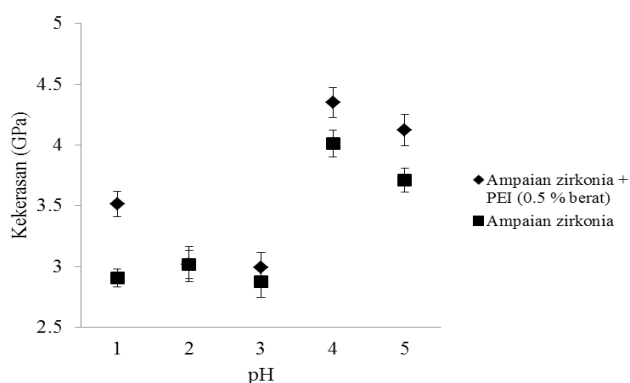


RAJAH 3. Ketumpatan jasad tersinter pada pH berbeza dengan penambahan agen penyerak dan tanpa agen penyerak

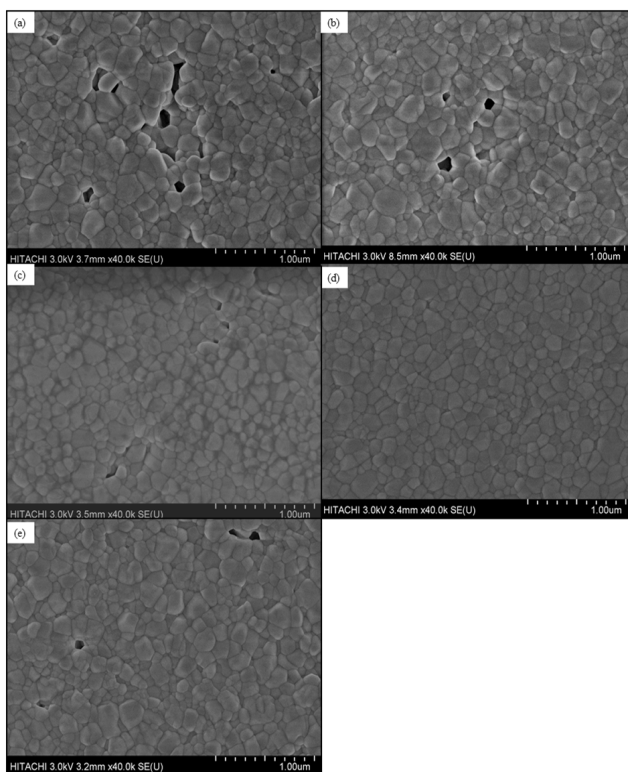
Rajah 4 menunjukkan keputusan kekerasan sampel dengan penambahan agen penyerak PEI (0.5 % berat) dan tanpa penambahan agen penyerak pada nilai pH yang berbeza. Sampel yang mengandungi agen penyerak PEI mempunyai kekerasan yang lebih tinggi berbanding sampel tanpa agen penyerak PEI. Kekerasan sampel tertinggi yang diperoleh adalah pada pH 4 dengan nilai kekerasan 4.35 GPa. Keputusan ujian ketumpatan disokong oleh hasil ujian kekerasan sampel jasad tersinter. Keputusan ujian kekerasan ini menunjukkan bahawa penambahan 0.5% berat PEI pada pH 4 ke dalam ampaian zirkonia telah menghalang pembentukan aglomerat serta mendorong kepada pembentukan struktur seramik yang homogen dengan saiz zarah yang halus seterusnya meningkatkan sifat mekanik sampel. Selain itu, kekerasan sampel didapati berkadar langsung dengan ketumpatan padatan sampel. Semakin tinggi ketumpatan, semakin tinggi kekerasan padatan tersinter seperti yang dinyatakan oleh Hoepfner dan Case (2003).

Berdasarkan hasil kedua-dua ujian ini, penyerakan zarah bagi ampaian zirkonia menjadi lebih baik sekiranya penambahan agen penyerak PEI menepati kuantiti optimumnya iaitu dengan 0.5% berat PEI. Di samping itu pengawalan pH ampaian yang sesuai iaitu pada pH 4 telah membantu memberi kesan yang maksimum kepada penyerakan zarah. Walau bagaimanapun keputusan ini didapati berbeza dengan kajian terdahulu yang dijalankan oleh Duran et al. 2005 yang juga mengkaji pemprosesan berkolid terhadap serbuk zirkonia bersaiz nano. Mereka mendapati pH yang digunakan untuk mendapatkan penyerakan zarah terbaik adalah pada pH 10.4 dengan penambahan 3% berat PEI. Hal ini mungkin disebabkan perbezaan pembebanan serbuk yang telah digunakan dalam kajian tersebut yang mana mereka telah memilih pembebanan serbuk sebanyak 40 vol % sedangkan kajian ini menumpu kepada 10 vol % sahaja. Merujuk kepada Santacruz et al. (2008), kebiasaannya penyerakan serbuk

bersaiz nano adalah lebih baik pada pembebanan serbuk yang rendah dan akan cenderung untuk aglomerat dengan peningkatan pembebanan serbuk. Pembebanan serbuk yang tinggi dalam ampaian akan meningkatkan kadar kesesakan cas-cas ion lawan pada lapisan dwi-elektrik zarah yang akan memberi perubahan kepada pH ampaian. Hal ini menyebabkan pH dan kuantiti agen penyerak yang optimum bagi mencapai kestabilan ampaian adalah berbeza dan bergantung kepada pembebanan serbuk yang digunakan.



RAJAH 4. Kekerasan sampel pada pH berbeza dengan penambahan agen penyerak dan tanpa agen penyerak



RAJAH 5. Mikrostruktur sampel dengan penambahan agen penyerak PEI (0.5% berat) pada (a) pH 1 (b) pH 2 (c) pH 3 (d) pH 4 dan (e) pH 5

Mikrostruktur sampel dengan penambahan agen penyerak PEI (0.5% berat) pada pH yang berbeza ditunjukkan dalam Rajah 5(a) hingga 5(d). Berdasarkan mikrograf ini didapati taburan saiz zarah jasad tersinter bagi sampel pada pH 4 adalah lebih sekata dan homogen serta tidak mempunyai keliangan berbanding sampel lain. Sampel ini mempunyai saiz ira yang halus berskala nanometer dengan purata saiz ira sekitar 72 nm. Keliangan pada sampel pH 1, 2, 3 & 5 wujud disebabkan pengaglomeratan serbuk yang tidak dapat dikawal seterusnya menghalang penyerakan zarah untuk berlaku dengan baik. Mikrograf menunjukkan penambahan 0.5% berat PEI ke dalam ampaian pada pH 4 mendorong kepada pembentukan struktur yang homogen tanpa liang kerana serbuk terserak dengan baik tanpa aglomerat ketika pemprosesan berkolid. Hal ini telah menyebabkan sampel tersebut mempunyai nilai ketumpatan dan kekerasan yang lebih tinggi berbanding sampel yang lain.

KESIMPULAN

Kajian ini secara keseluruhannya mendapati penggunaan agen penyerak PEI lebih sesuai digunakan untuk ampaian zirkonia pada kuantiti optimumnya iaitu 0.5% berat PEI. Nilai kelikatan ampaian yang terhasil adalah rendah iaitu kurang daripada 2 mPas dengan pembentukan aglomerat yang minimum. Kajian ini juga mendapati ampaian yang mengandungi PEI mempunyai penyerakan zarah yang lebih baik jika berada pada pH 4. Sifat mekanik sampel juga dapat dipertingkatkan dengan hasil sampel yang berketumpatan tinggi 6.002 g/cm³ (iaitu 98% ketumpatan teori). Kekerasan sampel yang dicapai oleh sampel ini juga tinggi dengan nilai kekerasan 4.35 GPa. Keputusan ini turut disokong oleh mikrostruktur sampel yang homogen dengan saiz ira yang halus berskala nanometer. Ini jelas menunjukkan gabungan antara penggunaan agen penyerak pada kuantiti optimum serta pengawalan pH ampaian yang sesuai telah membantu penyerakan zarah menjadi lebih baik dan seterusnya memberi kesan kepada peningkatan sifat mekanik bahan.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Pengajian Tinggi di atas tajaan projek ini melalui geran penyelidikan UKM-AP-NBT-14-2010 dan OUP-2012-142. Penulis juga merakamkan penghargaan kepada Nur Najwa Anuar, Nurul Najwa Abdul Rahman dan Muhamad Asyraf Ismail atas perolehan sebahagian data kajian.

RUJUKAN

- Andanastuti, M., Husna, O. & Siti, M. T. 2004. Mekanisme Penyerakan zarah dalam pemprosesan berkolid oksida seramik ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-MgO}$) menggunakan Daxad 19TM. *Jurnal Teknologi* 41: 63-76.
- Bowen, P., Carry, C., Luxembourg, D., & Hofmann, H. 2005. Colloidal processing and sintering of nanosized transition aluminas. *Powder Technology* 157:100-107.
- Duran, C., Jia, Y., Hotta, Y., Sato, K., & Watari K. 2005. Colloidal processing, surface characterization and sintering of nano ZrO_2 powders. *Journal of Materials Research* 20: 1348–1355.
- Enoiu, C., Volceanov, A., Volceanov, E. & Gavrilă, R. 2004. Nanostructured zirconia composites stabilized with CeO_2 for biomedical applications. *Romanian Journal of Physics* 49: 777-87.
- Garrido, L. B. & Aglietti, E. F. 2001. Effect of rheological properties of zircon-alumina suspensions on density of green casts. *Materials Research* 4: 279-284.
- Hoepfner, T. P. & Case, E. D. 2003. The influence of the microstructure on the hardness of sintered hydroxyapatite. *Ceramics International* 29: 699-706.
- Ismail, K. N. B 2006. Penghasilan Agregat Ringan Dari Abu Bahan Api Terhancur Sebagai Bahan Utama. Kajian ilmiah, Pusat Pengajian Kejuruteraan Bahan & Sumber Mineral, Universiti Sains Malaysia.
- Kevin, K. 2011. Problems of particle aggregation in ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* 24: 86-89.
- Lange, F. F. 1989. Powder processing science and technology for increased reliability. *Journal of the American Ceramic Society* 72: 3-15.
- Lewis, J. A. 2000. Colloidal processing of ceramics. *Journal of the American Ceramic Society* 83: 2341–2359.
- Liu, D. M. 1999. Adsorption, rheology, packing, and sintering of nanosize ceramic powders. *Ceramics International* 25: 107-113.
- Pradhan, M., Kapur, P. C. & Pradip. 2012. Effect of powder dispersion on sintering behavior and mechanical properties of nanostructured 3YSZ ceramics. *Ceramics International* 38: 2835-2843.
- Reed, J. M. 1995. *Principle of Ceramic Processing*. New York: John Wiley & Sons Inc Publication
- Santacruz, I., Anapoorani, K. & Binner, J. 2008. Preparation of high solids content nanozirconia suspensions. *Journal of the American Ceramic Society* 91: 398-405.
- Sun, J., Gao, L. and Guo, L. 1997. Rheology studies of suspension formed by different nano-size Y-TZP. *Journal of Materials Science & Technology* 13: 348-350.
- Sun, J., Gao, L. & Guo, J. 1999. Influence of the initial pH on the adsorption behaviour of dispersant on nano zirconia powder. *Journal of the European Ceramic Society* 19: 1725-1730.
- Tang, F., Huang, X., Zhang, Y. & Guo, J. 2000. Effect of dispersants on surface chemical properties of nano-zirconia suspensions. *Ceramics International* 26: 93-97.
- Tekeli, S. & Demir, U. 2005. Colloidal processing, sintering and static grain growth behaviour of alumina-doped cubic zirconia. *Ceramic International* 31: 973-980.
- Tsetsekou, A., Agrafiotis, C., Leon, I. & Miliadis, A. 2001. Optimization of the rheological properties of alumina slurries for ceramic processing applications. Part II: spray-drying. *Journal of the European Ceramic Society* 21:493-506.
- Zhang, J., Xu, Q., Ye, F., Lin, Q., Jiang, D. & Iwasa, M. 2006. Effect of citric acid on the adsorption behavior of polyethylene imine (PEI) and the relevant stability of SiC slurries. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 276: 168-175.
- Noor Faeizah Amat
*Andanastuti Muchtar
Mariyam Jameelah Ghazali
Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi
Selangor Darul Ehsan
Malaysia
- Norziha Yahaya
Jabatan Prostodontik, Fakulti Pergigian
Universiti Kebangsaan Malaysia
Jalan Raja Muda Abdul Aziz
50300 Kuala Lumpur
Malaysia
- *Pengarang untuk surat-menyurat: muchtar@eng.ukm.my

Received Date: 24 October 2012

Accepted Date: 3 December 2012