

KESAN KUANTITI AGEN PENYERAK DALAM PENCIRIAN SAIZ ZARAH OKSIDA SERAMIK MENGGUNAKAN KAEDAH PEMBELAUAN LASER

A. Muchtar¹, S. M. Tasirin² dan S.R.S. Abdullah²

¹Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan,

²Jabatan Kejuruteraan Kimia dan Proses, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor

ABSTRAK

Kertas kerja ini membincangkan isu kesan penambahan agen penyerak dalam pencirian saiz zarah oksida seramik dengan menggunakan kaedah pembelauan cahaya laser. Adalah diketahui umum bahawa zarah seramik terutamanya daripada serbuk sintetik yang dihasilkan secara kimia dan berada dalam julat saiz di bawah 1 μm atau dikenali sebagai zarah koloid amat mudah membentuk aglomerat. Kehadiran aglomerat dijangka menyukarkan kerja-kerja pencirian saiz sebenar zarah dalam serbuk kerana gumpalan aglomerat akan menyebabkan saiz zarah yang diperolehi menjadi jauh lebih besar daripada saiz diskret zarah yang sebenar. Dalam kajian ini, sejenis agen penyerak komersil, Darvan*7, dikaji keberkesannya dalam menyerakkan zarah bagi membolehkan pengukuran saiz diskret zarah yang tepat. Kuantiti agen penyerak yang digunakan adalah dalam julat 0 hingga 4 g/L. Dapatan kajian menunjukkan bahawa kuantiti berkesan Darvan*7 adalah 2 g/L sekiranya sampel serbuk yang dikaji ialah serbuk oksida seramik alumina dan zirkonia manakala untuk serbuk magnesia, kuantiti berkesan yang diperolehi ialah 1.2 g/L. Saiz zarah yang diperolehi melalui teknik pembelauan cahaya laser dibandingkan dengan imej visual yang diperolehi menggunakan mikroskop elektron imbasan (SEM). Kajian ini mendapati bahawa dalam pencirian saiz zarah serbuk sintetik seramik yang biasa digunakan dalam fabrikasi komponen seramik termaju, adalah penting untuk mengenalpasti terlebih dahulu kuantiti agen penyerak yang paling berkesan dalam menyahaglomerat zarah sebelum proses pencirian saiz zarah dapat dilakukan dengan tepat.

Katakunci: Pencirian Saiz Zarah, Agen Penyerak, Oksida Seramik, Pembelauan Cahaya Laser

ABSTRACT

The present paper discusses issues related to the addition of a dispersing agent in the characterisation of particles of oxide ceramics using the laser diffraction technique. It is well known that chemically synthesised powders of sizes below 1 μm or also known as colloids very readily form agglomerates. The presence of agglomerates is expected to hinder the accurate measurement of the size of the particles as the agglomerates may generate an apparent particle size, which is way above the correct discrete size of each individual particle. In this work, the effectiveness of a commercially available dispersing agent, Darvan*7, as used in the measurement of the sizes of the discrete particles, is scrutinised. The amount of Darvan*7 used is in the range of 0 to 4 g/L. The results indicate that for the particle size measurement of alumina and zirconia particles, the optimum amount of Darvan*7 for obtaining the correct particle size is 2 g/L whereas for magnesia particles, the optimum amount is found to be 1.2 g/L. The particle sizes as obtained via the laser diffraction technique are validated by visual inspection under the scanning electron microscope (SEM). This work has shown that in the size characterisation of synthetic ceramics commonly used in the fabrication of advanced ceramic components, it is highly important to first identify the optimum quantity of the dispersing agent that is able to deagglomerate the particles to ensure accuracy in the measurements.

Keywords: Particle Size Characterisation, Dispersing Agent, Oxide Ceramics, Laser Diffraction

PENGENALAN

Kebanyakan sifat kimia, mekanik, fizik dan elektrik bahan adalah bergantung kepada ciri-ciri zarah sesuatu bahan tersebut [1-2]. Antara sifat yang dipengaruhi sepenuhnya oleh ciri-ciri zarah bahan ialah seperti kestabilan produk, kereaktifan kimia, kelegapan dan kekuatan bahan. Oleh itu, pencirian saiz dan bentuk zarah amat diperlukan atas tujuan terutamanya dalam penyelidikan di industri bagi memastikan mutu sesuatu barangan produk terjamin. Secara teknikalnya, sistem serbuk bersaiz submikron menjadi semakin penting semenjak abad lepas. Kebanyakan industri dan metodologi pengukuran saiz zarah menunjukkan perkembangan yang sejajar iaitu yang

selaras dengan kepentingan kajian ke atas zarah seni yang menyumbangkan kepada peningkatan kualiti bahan yang hendak dimajukan [3]. Di samping itu, dengan wujudnya perkembangan dalam teknologi pemprosesan, telah terbukti bahawa pengukuran saiz zarah secara tepat dan automatik adalah amat diperlukan. Oleh itu, pengetahuan mengenai saiz zarah dan taburan saiz pada julat 0.1 hingga 1000 μm merupakan asas dalam bidang industri pemprosesan [4].

Dalam pembikinan komponen seramik termaju, penggunaan bahan mentah yang terkawal dari segi ketulenan dan saiz zarah adalah wajib. Oleh yang demikian, pilihan terbaik bagi bahan mentah untuk fabrikasi seramik ialah

serbuk seramik yang dihasilkan secara sintetik [5]. Untuk fabrikasi komponen seramik struktur, seringkali objektif pembikinan ialah untuk menghasilkan komponen yang berbijian halus kerana kajian terdahulu telah membuktikan peningkatan prestasi mekanik komponen sedemikian berbanding komponen yang berbijian kasar [6-9]. Salah satu syarat bagi menghasilkan komponen berbijian halus yang wajib dipatuhi ialah penggunaan bahan mentah berkolid yang saiznya kurang daripada 1 μm [10-11]. Walau bagaimanapun, sebelum pemprosesan serbuk seramik ini boleh terus dilakukan, langkah asas yang perlu dijalankan ialah mencirikan saiz zarah serbuk sebagai sebahagian daripada langkah kawalan kualiti terawal bagi memastikan penghasilan komponen yang berprestasi tinggi.

Akur dengan masalah pengaglomeratan zarah berkolid, kajian ini bertujuan untuk mendapatkan kuantiti agen penyerak optimum yang paling berkesan dalam menyerakkan zarah beberapa jenis serbuk oksida seramik. Ini bagi membolehkan pencirian saiz zarah yang tepat dan pantas dengan menggunakan teknik pembelauan cahaya laser. Teknik ini merupakan sebuah teknik terbaru dan dijangka terancang dalam kerja-kerja pencirian saiz zarah. Kajian literatur mendapati walaupun penggunaan teknik ini amat meluas dan merangkumi pelbagai bahan kajian yang berbeza contohnya pencirian pigmen organik [12], pencirian endapan di muara sungai [13] serta pencirian ampaiian spora *Bacillus* [14], artikel dalam jurnal mengenai penggunaan teknik ini masih kurang dan sukar diperolehi terutama dalam pencirian zarah bahan seramik.

METODOLOGI

Dalam kerja penyelidikan ini, empat jenis serbuk seramik berketulenan tinggi dan berbijian halus dipilih sebagai bahan kajian. Ini termasuklah dua jenis serbuk seramik alumina berketulenan tinggi iaitu TMDAR (Taimei Chemicals, Japan) yang berketulenan 99.99% dan AL160SG-1 (Kyoritsu Chemicals, Japan) yang berketulenan 99.8%. Selain itu, serbuk oksida seramik yang dikaji ialah serbuk magnesita berketulenan 99.95% (Strem Chemicals, US) dan serbuk zirkonia berketulenan 99.95% (Strem Chemicals, US).

Pengabaian langkah persampelan dalam analisis teknologi serbuk akan mengakibatkan keputusan yang tidak jitu. Adalah amat penting bahawa setiap sampel yang dipilih untuk analisis adalah mewakili keseluruhan sampel serbuk seramik yang dikaji. Oleh itu, bagi tujuan analisis yang berkesan, kaedah persampelan yang disarankan oleh Allen [15] dipatuhi.

Gabungan media dan agen penyerakan yang bersesuaian memainkan peranan yang penting dalam pencirian saiz zarah yang tepat [16]. Dalam kajian ini, sejenis agen penyerak komersil iaitu Darvan*7 (R.T. Vandervilt Co. Inc., US) digunakan di mana bahan utama penyerak ini ialah sodium polimetaklarat. Agen penyerak jenis cecair ini diharapkan dapat bertindak secara berkesan dengan serbuk seramik oksida yang dikaji tanpa menimbulkan kesan-kesan yang boleh menyebabkan gangguan kepada pemerhatian saiz zarah. Penggunaan agen penyerak ini juga bertujuan mengelakkan tindak balas kimia di antara zarah seramik oksida dengan agen dan medium penyerakan. Dalam kajian ini, air suling digunakan sebagai medium penyerakan serbuk seramik ketika ujian dijalankan. Agen penyerak Darvan*7

dicampurkan ke dalam air suling tadi pada kuantiti yang berlainan iaitu 0.0, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 dan 4.0 g/L.

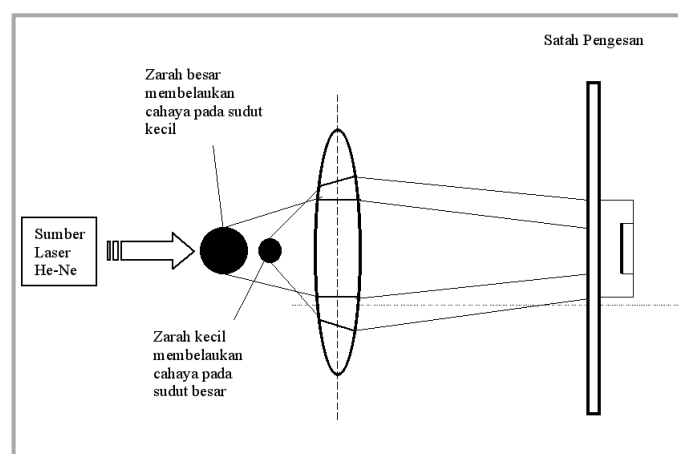
Alat yang digunakan untuk mencirikan saiz zarah dalam kajian ini ialah Malvern Particle Sizer S (SiberHegner) sementara prosedur piawai yang dipilih untuk digunapakai ialah prosedur ASTM C 1070 – 86 [17]. Alat ini terdiri daripada alat pemancar laser, kanta yang telah dikaliberasikan dan komputer analisis yang dilengkapi dengan perisian bagi pengiraan taburan saiz zarah sampel. Pengukuran dilakukan melalui cahaya laser helium-neon berkuasa rendah yang dibelaukan oleh kehadiran zarah serbuk, menggunakan satu siri susunan optik kanta (Fourier) yang terdapat di dalam alat ini. Susunan optik disambung kepada alat pengesan yang akan merekodkan arus yang setara dengan keamatan cahaya laser yang dibelaukan lalu jatuh ke atasnya. Sudut belauan cahaya adalah berkadar songsang dengan saiz zarah. Rajah 1 menerangkan prinsip pengukuran menggunakan alat pembelau laser ini sementara Rajah 2 pula menunjukkan ilustrasi skematik keseluruhan sistem alat pencirian saiz zarah Malvern Mastersizer S. Keputusan saiz zarah diperolehi dengan pantas melalui penggunaan sebuah perisian khusus untuk alat ini.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Perolehan Kepekatan Optimum Agen Penyerak

Rajah 3 menunjukkan kesan kuantiti agen penyerak terhadap nilai min saiz zarah yang diperolehi menggunakan alat Malvern Mastersizer S yang berkonsepkan pembelauan cahaya laser. Untuk setiap jenis serbuk oksida seramik yang dikaji, agen penyerak dicampurkan dalam kuantiti yang berlainan. Setiap larian ujikaji akan menghasilkan taburan saiz zarah di mana nilai saiz min yang diperolehi kemudiannya diplotkan melawan kepekatan agen penyerak seperti yang tertera dalam Rajah 3.

Dapatan kajian mendapati larutan agen penyerak Darvan*7 dengan kepekatan 2.0 g/L paling berkesan dalam menyahaglomerat zarah kesemua jenis serbuk seramik kecuali bagi serbuk magnesita di mana kepekatan berkesan yang



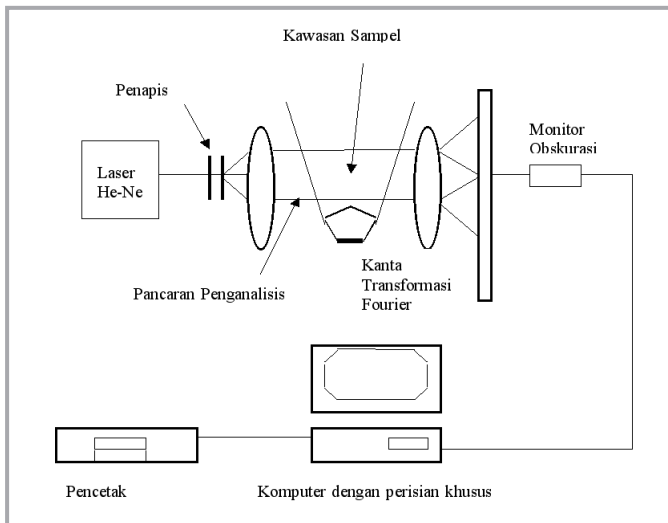
Rajah 1: Prinsip pengukuran saiz zarah menggunakan teknik pembelauan cahaya laser

diperolehi ialah 1.2 g/L. Kepekatan berkesan yang dimaksudkan ialah apabila larutan agen penyerak atau pemerai yang digunakan berupaya menjerap pada keseluruhan permukaan zarah dan bertindak meningkatkan daya penolakan

KESAN KUANTITI AGEN PENYERAK DALAM PENCIRIAN SAIZ ZARAH OKSIDA SERAMIK MENGGUNAKAN KAEDAH PEMBELAUAN LASER

sesama zarah melalui pengecasan elektrik. Nilai kepekatan berkesan ini dikenalpasti apabila bacaan nilai min saiz zarah adalah terendah kerana dijangkakan pada ketika ini, zarah-zarah tunggal dan bukannya aglomerat yang wujud di dalam ampaiian.

Mengikut prinsip kendalian alat Malvern Mastersizer S, penentuan saiz zarah bergantung kepada pembelauan cahaya yang sampai ke satah pengesanan (Rajah 1). Zarah yang kecil akan membelaukan cahaya pada sudut yang besar sementara zarah yang besar akan membelaukan cahaya pada sudut yang

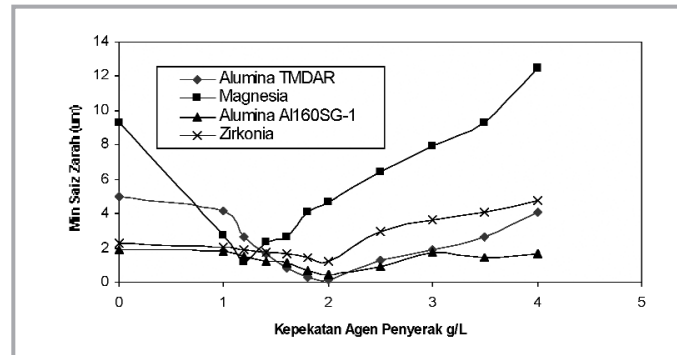


Rajah 2: Ilustrasi skematik sistem Malvern Mastersizer S

kecil. Dengan demikian, perolehan saiz min yang terkecil boleh diambil kira sebagai manifestasi kemampuan agen penyerak menyerakkan zarah dalam ampaiian kerana pada situasi ini, zarah berkemungkinan besar hadir sebagai unsur diskret dalam ampaiian menyebabkan cahaya laser terbelau pada sudut yang besar. Sebaliknya, perolehan saiz min yang lebih besar menandakan zarah telah bergumpal menyebabkan cahaya laser terbelau pada sudut yang kecil lalu memberikan keputusan saiz zarah yang kurang tepat. Keputusan ini menepati hasil kajian oleh Osamu et al.[16] yang mendapati nilai saiz zarah titanium dioksida yang mereka kaji menurun setelah sampel melalui proses penyahaglomeratan secara mekanik.

Pengagglomeratan Zarah Melalui Tindakan Elektrostatik

Agan penyerak, Darvan*7 yang digunakan dalam kajian ini, yang mana bahan utama penyerak ini ialah sodium polimetakrilat, boleh dikategorikan sebagai satu polimer anion yang bercas negatif. Polimer yang tinggi jisim molekulnya ini mampu untuk menjerap ke permukaan gumpalan seramik oksida yang bercas positif disebabkan oleh tindakan elektrostatik melalui mekanisme penjerapan dan peneutralan cas [18]. Hal ini bukan sahaja dapat meneutralkan cas positif dalam kawasan terjerap tetapi juga menyediakan cas negatif tambahan untuk cas positif yang lain pada permukaan serbuk tersebut. Keadaan ini akan memudahkan penyahaglomerat antara zarah secara tolakan elektrostatik. Pada kuantiti agen penyerak yang optimum, polimer ini akan menepu kepada permukaan serbuk seramik oksida sehingga cas bersih pada zarah serbuk diterbalikkan daripada positif kepada negatif menerusi penjerapan berlebihan ion lawan. Hasilnya, serbuk seramik oksida akan



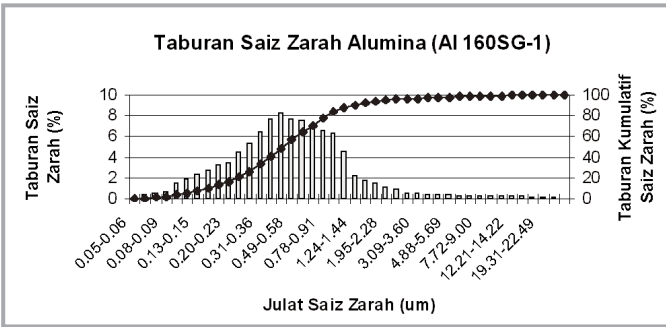
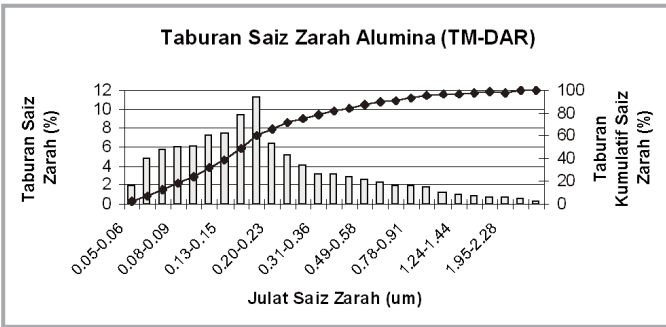
Rajah 3: Kesan kuantiti agen penyerak dalam menentukan saiz zarah serbuk seramik

distabilkan atau dinyahaglomeratkan kerana penepuan cas bersih negatif pada permukaan serbuk akan mengakibatkan serbuk-serbuk tersebut menolak antara satu sama lain. Dan sekiranya dos agen penyerak yang melebihi kuantiti optimumnya terus ditambahkan kepada serbuk seramik oksida yang telah dinyahaglomeratkan, kation yang terdapat pada agen penyerak Darvan*7 boleh berperanan untuk meneutralkan cas bersih negatif serbuk seramik dan membolehkan serbuk-serbuk ini kembali bergumpal disebabkan tarikan elektrostatik. Hal ini menerangkan mengapa kesemua susuk min saiz zarah meningkat setelah melepasi tahap optimum bagi kesemua jenis serbuk yang dikaji, seperti yang diperolehi dalam Rajah 3.

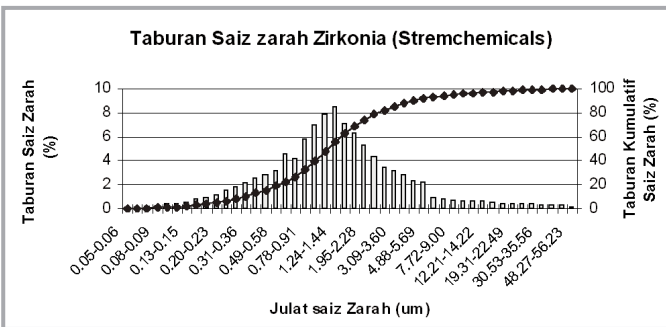
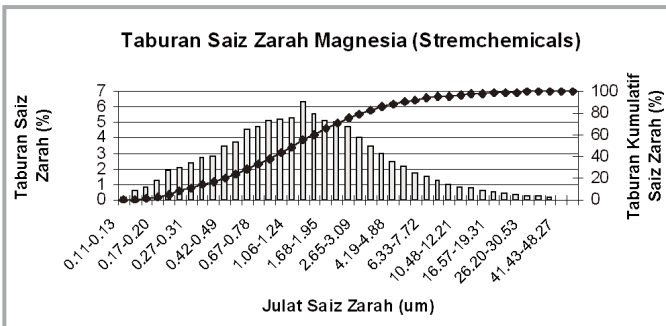
Dari keputusan kajian yang diperolehi (Rajah 3), kuantiti optimum agen penyerak bagi serbuk seramik alumina oksida (Al_2O_3) dan zirkonia oksida (ZrO_2) adalah 2.0 g/L, manakala kuantiti optimum bagi serbuk seramik magnesia (MgO) pula adalah lebih rendah iaitu hanya 1.2 mg/L. Perbezaan ini boleh dijelaskan dengan keadaan nombor pengoksidaan pada setiap serbuk seramik yang dikaji. Serbuk seramik magnesia, alumina dan zirkonia masing-masing mempunyai nombor pengoksidaan +2, +3 dan +4. Oleh kerana, alumina dan zirkonia mempunyai nombor pengoksidaan yang lebih tinggi berbanding serbuk magnesia, maka kuantiti optimum agen penyerak yang lebih tinggi diperlukan bagi menjerap dan meneutralkan cas-cas pada permukaan serbuk-serbuknya berbanding dengan serbuk magnesia.

Taburan Saiz Zarah Pada Kepekatan Optimum Agen Penyerak

Salah satu fungsi utama alat Malvern Mastersizer S yang mampu dilakukan dengan pantas ialah perolehan terperinci taburan saiz zarah sampel serbuk yang diperolehi dalam masa beberapa saat sahaja. Berbanding teknik pencirian saiz zarah lainnya yang dianggap lazim, teknik terbaru ini jauh lebih pantas dan cekap di samping mampu memberikan jawapan yang tepat [19-20]. Rajah 4 dan 5 menunjukkan taburan zarah serbuk pada kepekatan optimum agen penyerak seperti yang diperolehi dalam kajian ini. Berdasarkan kepada Rajah 4, lebih kurang 92% saiz zarah Alumina (TM-DAR) berada dalam julat 0.05-0.23 μm , manakala 80% saiz zarah Alumina (Al 160SG-1) berada dalam julat 0.05-0.58 μm . Di samping itu, hampir 90% saiz zarah Magnesia (Stremchemicals) berada dalam julat 0.11-1.68 μm dan lebih dari 95% saiz zarah Zirkonia (Stremchemicals) berada dalam julat 0.05-1.95 μm , seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5.



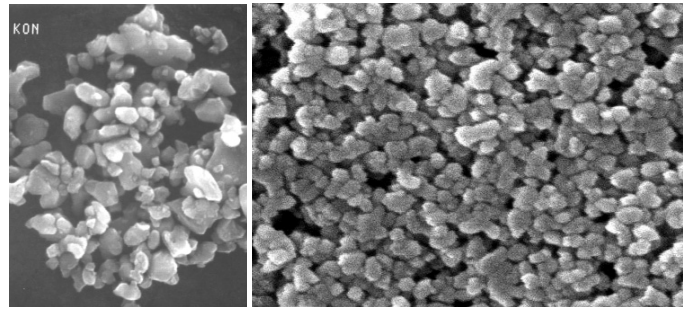
Rajah 4: Taburan saiz zarah serbuk alumina TMDAR dan AL160SG-1 seperti yang diperolehi melalui teknik pembelauan cahaya laser pada kuantiti Darvan*7 yang optimum iaitu 2 g/L



Rajah 5: Taburan saiz zarah serbuk magnesia dan zirkonia seperti yang diperolehi melalui teknik pembelauan cahaya laser pada kuantiti Darvan*7 yang optimum iaitu 2 g/L bagi serbuk zirkonia dan 1.2 g/L bagi serbuk magnesia

Imej Zarah Menggunakan SEM

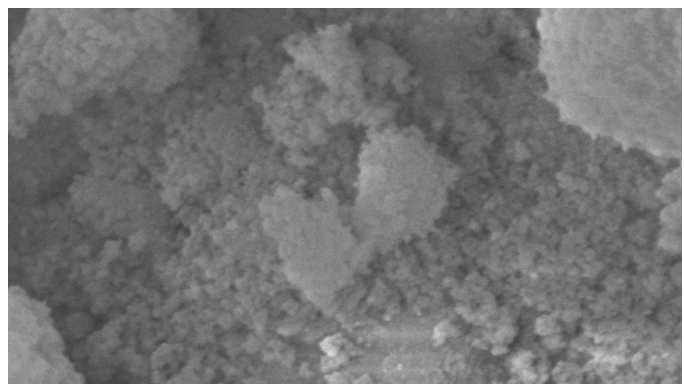
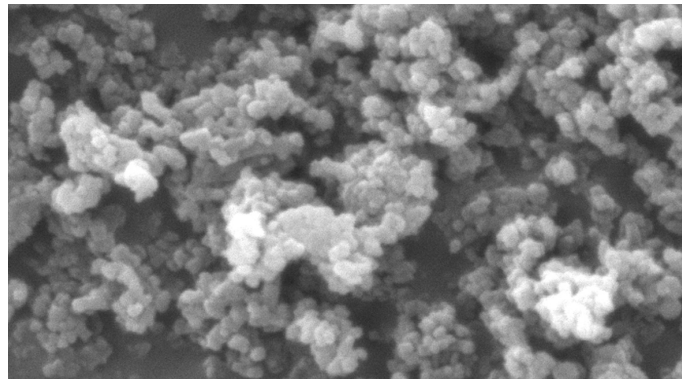
Sebagai data tambahan kepada kajian ini, visual zarah serbuk yang dikaji turut diperolehi melalui penggunaan mikroskop imbasan elektron atau SEM. Rajah 6 dan 7 memaparkan imej SEM bagi serbuk alumina, magnesia dan zirkonia yang digunakan dalam kajian ini. Perolehan imej SEM yang jelas dan terfokus dengan baik bagi kedua-dua jenis serbuk alumina didapati agak mudah. Walau bagaimanapun, penulis menghadapi banyak masalah mendapatkan imej yang jelas bagi serbuk magnesia dan zirkonia, terutama bagi



Rajah 6: Mikrograf SEM menunjukkan bentuk dan saiz zarah alumina AL160SG-1 (kiri) dan TMDAR (kanan)

mendapatkan imej pada magnifikasi yang tinggi. Secara umumnya, kerja-kerja pensaian zarah dijangka lebih mudah dan lebih tepat bilamana imej zarah diperolehi dengan jelas. Untuk zarah kedua-dua serbuk alumina, saiz zarah yang kelihatan menepati keputusan saiz zarah seperti yang diperolehi daripada teknik pembelauan cahaya laser pada kuantiti agen penyerak yang optimum.

Walaupun bagaimanapun, teknik SEM didapati sukar untuk mencirikan saiz zarah bila mana imej SEM yang jelas tidak dapat diperolehi seperti halnya untuk serbuk magnesia dan zirkonia (Rajah 7). Zarah kelihatan bergumpal sehingga menyukarkan perolehan saiz sebenar zarah. Di samping itu, serbuk magnesia dan zirkonia seperti yang digunakan dalam kajian ini tidak berupaya dikaji pada magnifikasi yang tinggi kerana imej SEM akan menjadi kabur dan tidak terfokus. Oleh itu, dalam kes sebegini, jelas teknik pembelauan cahaya laser merupakan teknik pencirian saiz zarah yang lebih mudah.



Rajah 7: Mikrograf SEM menunjukkan bentuk dan saiz zarah magnesia (atas) dan zirkonia (bawah)

KESIMPULAN

Kajian ini telah menunjukkan betapa pentingnya mengenalpasti kepekatan optimum atau paling berkesan dalam menyerakkan

zarah dalam ampaiian sehingga zarah mampu wujud sebagai individu diskret dan tidak bergumpal membentuk aglomerat. Ini bagi memastikan keputusan ujikaji pencirian saiz zarah seramik oksida secara pembelauan cahaya laser seperti yang dilaksanakan dalam kajian ini adalah tepat dan bukan sebaliknya. Keputusan nilai saiz zarah yang diperolehi telah dibandingkan dengan imej visual zarah yang diperolehi melalui teknik mikroskop elektron imbasan, atau SEM.

Dalam kajian ini, kuantiti agen penyerak Darvan *7 yang optimum bagi pencirian saiz zarah alumina AL160SG-1 dan TMDAR serta zirkonia (Strem Chemicals) didapati ialah pada 2g/L sementara untuk serbuk magnesia (Strem Chemicals), kuantiti agen penyerak yang optimum ialah 1.2 g/L.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kerajaan Malaysia atas sokongan kewangan bagi kajian ini melalui geran IRPA 03-02-02-0047. Sumbangan pelajar L. Glass dalam mendapatkan data penyelidikan juga amat dihargai. ■

RUJUKAN

- [1] L. Guoqiang, Z. Ti dan P. Su-Seng, Analytical modeling of particle size and cluster effect on particulate-filled composite, *Materials Science and Engineering*, A271, ms 43 –52, 1999
- [2] J.E.Tabiason, G.S. Johnson, P.K. Westerhoff dan B. Vigneswaran, Particle size and chemical effects on contact filtration performance, *Journal of Environmental Engineering*, Vol 119 (3), ms 520 – 539, 1993
- [3] M.J. Groves, The applications of particle characterisation methods to submicron dispersions and emulsions, *Modern Methods of Particle Size Analysis*, Howard G Barth (pnyt.), John Wiley & Sons Inc., New York, 1984
- [4] P.E. Plantz, Particle size measurement from 0.1 to 1000 μm , based on light scattering and diffraction, *Modern Methods of Particle Size Analysis*, Howard G. Barth (pnyt.), John Wiley & Sons Inc., New York. 1984
- [5] D. Segal, Chemical Preparation of Powders, *Materials Science and Technology: 17A*, ms 69-98, 1996
- [6] B. Mussler, M.V. Swain dan N. Claussen, Dependence of fracture toughness of alumina on grain size and test technique, *J. Am. Ceram. Soc.*, 65 (11), ms 566 – 572, 1982
- [7] P. Chantikul, S.J. Bennison dan B.R. Lawn, Role of grain size in the strength and R-curve properties of alumina, *J. Am. Ceram. Soc.*, 73 (8), ms 2419 – 2427, 1990
- [8] N. Miyahara, Y. Mutoh, K. Yamaishi, K. Uematsu dan M. Inoue, The effects of grain size on strength, fracture toughness, and static fatigue crack growth in alumina. In *Grain Boundary Controlled Properties of Fine Ceramics*, K. Ishizaki, K. Niihara, M. Isotani dan R.G. Ford (penyunting), JFCC Workshop Series: Materials, Processing and Design, ms 125 – 136, Elsevier Science Publishers Ltd, 1992
- [9] A. Muchtar dan L.C. Lim, Indentation fracture toughness of high purity submicron alumina, *Acta Materialia*, 46, ms 1683 – 1690, 1998
- [10] J. Reed, Principles of Ceramics Processing, ed ke-2, John Wiley & Sons Inc, 1995
- [11] A. Muchtar, Sintering Characteristics and microstructures of colloiddally processed alumina, *Jurnal Kejuruteraan*, 11 (2), ms 3 – 12, 1999
- [12] M. McGravey, D. McGregor dan R.B. McKay, Particle size analysis by laser diffraction in organic pigment technology, *Progress in Organic Coatings*, 31, ms 223 – 228, 1997
- [13] O.A. Mikkelsen dan M. Pejrup, The use of a LISST-100 laser particle sizer for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity, *Geo-Marine Letters*, 20, ms 187 – 195, 2001
- [14] R.G.K. Leuschner, A.C. Weaver dan P.J. Lillford, Rapid particle size distribution analysis of Bacillus spore suspensions, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 13, ms 47 – 57, 1999
- [15] T. Allen, Particle Size Measurement, ed ke-4, Chapman and Hall, London, 1990
- [16] H. Osamu, N. Kenji, N. Makio dan T. Junichiro, Experimental analysis of sample preparation conditions for particle size measurement, *Powder Technology*, 100, ms 61 – 68, 1998
- [17] ASTM C 1070 – 86, Standard Test Method for Determining Particle Size Distribution of Alumina or Quartz by Laser Light Scattering, Reapproved 1992
- [18] G. Tchobanoglous, Wastewater engineering treatment, disposal, reuse. Ed. ke-2. New York: Tata McGraw-Hill Book Company, 1990
- [19] Andanastuti Muchtar, Siti Masrinda Tasirin dan Murni Melati Ahmad, Analisis Perbandingan Pengukuran Saiz Zarah Kaolin dengan Menggunakan Alat Malvern Mastersizer S dan Kaedah Sedimentasi, Pascasidang Penyelidikan dan Pengembangan 1999, Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, UKM, ms 41-46, 1999.
- [20] Andanastuti Muchtar, Siti Masrinda Tasirin dan Abdullah Tahir, Pencirian Saiz Zarah Alumina: Perbandingan di antara Kaedah Lazim dan Teknik Pembelauan Cahaya Laser. Prosidang abstrak Seminar Fizik Kebangsaan 2000, 7-8 Nov 2000, Universiti Malaysia Sabah, ms 2, 2000