

# Efek Aditif $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ dan Suhu Sintering terhadap Karakteristik Keramik $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

P. Sebayang,\* Anggito. P. Tetuko, Deni S. Khaerudini, Muljadi, dan Masno Ginting  
Pusat Penelitian Fisika - LIPI, Kawasan PUSPIPTEK Serpong Tangerang

## Intisari

Telah dibuat keramik corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) menggunakan serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan masing-masing ditambah: 10, 15, 20 dan 25% (berat)  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , digiling 24 jam, lolos ayakan 200 mesh, dikeringkan  $110^\circ\text{C}$ , dicetak 50 Mpa, dan disintering pada suhu: 1300, 1400, 1500 dan  $1600^\circ\text{C}$ . Sebesar 20% aditif  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  dan suhu sintering  $1600^\circ\text{C}$  merupakan kondisi optimum, menghasilkan: densitas =  $3,47 \text{ g/cm}^3$ , porositas = 0,64%, kekerasan (Hv) = 1454  $\text{kgf/mm}^2$ , kuat patah = 313 MPa, dan koefisien ekspansi termal =  $6,3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) merupakan fasa dominan, partikelnya bulat, grain size: 0,3-0,8  $\mu\text{m}$  dan minornya adalah mullite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), berbentuk jarum, dan grain size: 0,3-3,0  $\mu\text{m}$ .

KATA KUNCI: ?

## I. PENDAHULUAN

Pembuatan keramik alumina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) yang padat dan kuat memerlukan suhu sintering yang tinggi, yaitu sekitar  $1800 - 1900^\circ\text{C}$  [1]. Keramik  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  tergolong keramik oksida, memiliki titik lebur sekitar  $2050^\circ\text{C}$ , bersifat isolator listrik, kuat, keras dan tahan suhu tinggi. Salah satu cara untuk menurunkan suhu sintering adalah dengan memperkecil ukuran butir hingga dalam orde nano size dan/atau penambahan aditif tertentu yang mempunyai titik lebur lebih rendah dari alumina [2]. Sifat fisis  $\text{Al}_2\text{O}_3$  antara lain: densitas =  $3,96 \text{ g/cm}^3$ , kekerasan =  $1500 - 1800 \text{ kgf/mm}^2$ , kuat tekan =  $230 - 350 \text{ MPa}$  dan koefisien ekspansi termal =  $(8 - 9) \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Pemakaian keramik alumina cukup luas, bidang mekanik (*bearing, cutting tools, inner lining*), bidang elektronik (isolator listrik, substrat elektronik), bidang medis sebagai bio material dan bahan refraktori suhu tinggi. Pemilihan bahan aditif mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), karena mempunyai keunggulan dari segi kekuatan mekaniknya [3] dan juga lebih tahan terhadapkejut suhu (*thermal shock resistance*) atau berkaitan dengan nilai koefisien ekspansi termal yang rendah. Perpaduan antara alumina dan mullite pada material keramik  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  adalah sangat tepat, apabila dilihat dari aplikasinya: *hot plate, roller kiln, crucible* dan *lining brick*. Komponen-komponen diatas merupakan kelengkapan tungku yang dibutuhkan pada industri keramik, gelas dan pengecoran logam.

Sebagai bahan pemikiran, bahwa komponen tersebut beredar di Indonesia ternyata masih diimport dari luar negeri. Tak kalah pentingnya juga adalah ketersediaan bahan baku alam di Indonesia cukup banyak, baik berupa mineral bauxit sebagai sumber  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan pasir silika sebagai sumber  $\text{SiO}_2$ . Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian dan kajian yang berkaitan dengan alih teknologi dan penguasaan tentang pembuatan keramik alumina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) dapat diterapkan khusus-

nya di Indonesia.

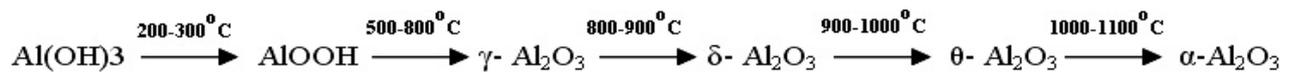
Pada tulisan ini dibahas tata cara pembuatan keramik  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  dengan variasi penambahan aditif mullite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) dan suhu sintering. Serbuk mullite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) dibuat dengan perbandingan 2 mole silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan 3 mole alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), digiling selama 24 jam dan dibakar/kalsinasi pada suhu  $1300^\circ\text{C}$  dan ditahan pada suhu tersebut selama 2 jam [4]. Komposisi mullite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) yang ditambahkan pada pembuatan keramik alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) adalah 10, 15, 20 dan 25% (berat)  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , variasi suhu: 1300, 1400, 1500 dan  $1600^\circ\text{C}$ , merupakan lanjutan penelitian sebelumnya [5]. Karakteristik yang diamati: densitas, porositas, kekerasan (Hv), kuat patah, koefisien ekspansi termal dan analisa struktur mikro dengan menggunakan XRD dan SEM.

## II. DASAR TEORI

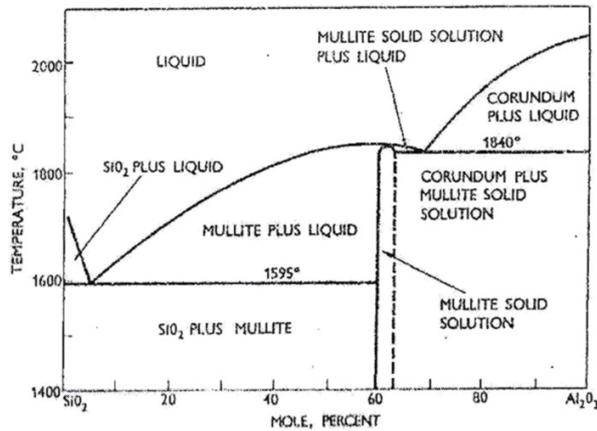
Senyawa alumina bersifat polimorf dan struktur  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  atau sering disebut dengan corundum [6], mempunyai struktur kristal Tumpukan Padat Heksagonal (*Hexagonal Closed Packed = HCP*), bentuk struktur yang paling stabil pada suhu tinggi. Bilangan koordinasi dari struktur corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) adalah 6 maka tiap ion  $\text{Al}^{+3}$  dikelilingi 6 ion  $\text{O}^{2-}$  dan tiap ion  $\text{O}^{2-}$  dikelilingi oleh 4 ion  $\text{Al}^{+3}$  untuk mencapai muatan netral. Struktur  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  dengan formula spinel adalah  $\text{Al}_8\text{O}_{12}$  dan bila dibandingkan struktur dasarnya  $\text{A}_3\text{B}_6\text{O}_{12}$  atau  $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_4$ , dimana A dan B adalah kation valensi dua dan tiga, maka kekurangan satu kation dan hal ini merupakan bentuk cacat struktur (*vacancy defect*) pada kristal tersebut [6]. Struktur  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  merupakan senyawa alumina yang terbentuk melalui penguraian gelatin  $\text{Al}(\text{OH})_3$  dan bohmit  $\text{AlOOH}$  dengan reaksi seperti ditunjukkan Gambar 1 [7].

Transformasi fasa  $\gamma$  ke  $\alpha$  pada suhu di atas  $1000^\circ\text{C}$  menghasilkan struktur mikro dengan derajat hubungan porositas yang tinggi. Perubahan bentuknya termasuk *irreversible* dan bentuk a polimorfnya stabil dengan titik lebur  $2050^\circ\text{C}$ .

\*E-MAIL: angg005@lipi.go.id



Gambar 1: Reaksi penguraian gelatin Al(OH)<sub>3</sub> dan bohmit AlOOH



Gambar 2: Diagram fasa sistem biner

Mullite (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>) tidak dijumpai dalam alam, merupakan material sintesis sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, diagram fasa sistem biner Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> [7]. Mullite memiliki titik lebur 1840°C dan terbentuk pada komposisi sekitar 60 - 63% mole Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan sekitar 37 - 40% SiO<sub>2</sub>. Keunggulan mullite [8] pada saat digunakan tahan sampai mendekati titik leburnya, mempunyai sifat fisis yang khas adalah densitas = 3,96 g/cm<sup>3</sup> dan koefisien ekspansi termal = (4,5 - 5,6) x 10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

Preparasi serbuk sangat menentukan sifat produk keramik yang dihasilkan, termasuk kemurnian bahan baku yang digunakan, homogenitas campuran dan kehalusan serbuk. Ada beberapa cara preparasi serbuk: konvensional, kimia basah/larutan dan dalam fasa gas; pada percobaan ini dipilih cara konvensional [4], yaitu berupa campuran padat-padat (*solid-solid mixing*) dengan menggunakan ball mill. Waktu penggilingan berpengaruh terhadap tingkat homogenitas dan kehalusan serbuk [9]. Preparasi serbuk mullite (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>) dengan perbandingan 2 mole silika (SiO<sub>2</sub>) dan 3 mole alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) diperlihatkan pada diagram alir Gambar 3.

Pembuatan keramik α-alumina dengan penambahan aditif mullite (10, 15, 20 dan 25% berat) dilakukan dengan tahapan sebagai berikut: campur/giling serbuk alumina dan mullite dengan ball mill, dikeringkan dalam oven, cetak tekan (*die pressing*) dan disinter pada suhu: 1300, 1400, 1500 dan 1600°C. Diagram alir pembuatan keramik α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan aditif mullite (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>) diperlihatkan pada Gam-

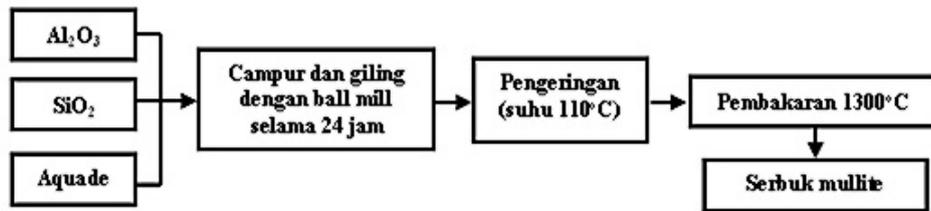
bar 4. Karakterisasi benda uji yang dilakukan antara lain [10]: densitas, porositas, kekerasan (Hv), kuat patah, dan koefisien ekspansi termal. Sedangkan struktur mikro di analisa dengan menggunakan XRD dan SEM. Pengukuran densitas dan porositas mengacu pada ASTM C. 373-72, kekerasan (Hv) diukur dengan Micro Hardness Tester (ASTM D-785), kuat patah dengan cara *triple point bending* mengacu pada ASTM C.170-90, dan koefisien ekspansi termal mengacu pada ASTM D.696-91. Untuk mengetahui fasa dan struktur keramik yang terbentuk diamati dengan XRD dengan cara membandingkan nilai jarak antar bidang, d dengan nilai d standar yang diperoleh dari *Joint Committee on Powder Diffraction Standart* (JCPDS) atau dengan Hanawalt File. Sedangkan bentuk dan ukuran partikel size dari keramik α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dilakukan dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

### IV. HASIL DAN DISKUSI

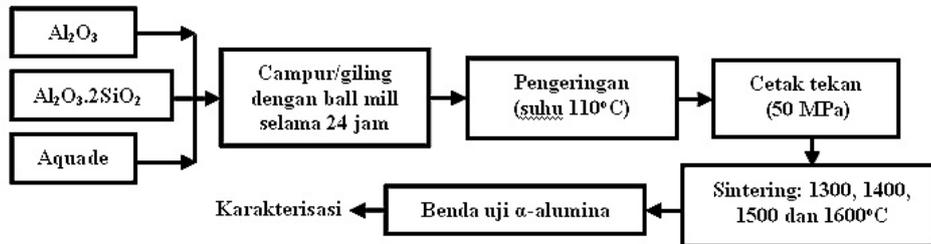
Hasil pengukuran porositas dan densitas masing-masing diperlihatkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Dari Gambar 5 dan Gambar 6, terlihat bahwa semakin tinggi suhu sintering dan semakin banyak jumlah aditif mullite yang ditambahkan menyebabkan jumlah pori semakin kecil, atau keramik α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang dihasilkan cenderung bertambah padat.

Fenomena ini menunjukkan bahwa energi berupa panas mengaktifkan proses difusi antara butiran sehingga terjadi pertumbuhan butir dan eliminasi pori yang ada diantara butir, akibatnya terjadi proses densifikasi yang diikuti dengan penyusutan volum tetapi tidak diikuti perubahan massa. Pada penambahan 20, 25% aditif mullite dan suhu sintering 1500, 1600°C, diperoleh nilai porositas dan densitas cenderung mengecil dan mendekati konstan. Pembuatan keramik α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tanpa aditif dengan suhu 1650°C diperoleh nilai densitas 3,25 g/cm<sup>3</sup> dan porositas 13,38% [11], teoritis densitas alumina sekitar 3,9 g/cm<sup>3</sup> dan porositas mendekati nol. Sedangkan hasil percobaan untuk penambahan 20, 25% aditif mullite dan suhu sintering 1500, 1600°C, diperoleh nilai porositas sekitar 0,64 -1,53% dan densitas sebesar 3,34-3,47 g/cm<sup>3</sup>. Hasil pengukuran kekerasan, Hv dan kuat patah masing-masing terhadap % penambahan aditif mullite dan suhu sintering ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.

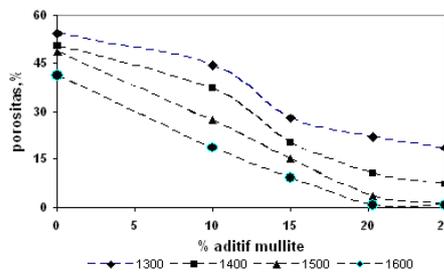
Dari hasil pengukuran kekerasan, Hv dan kuat patah menunjukkan adanya korelasi berbanding lurus dengan penambahan aditif mullite dan suhu sintering. Berarti semakin banyak aditif mullite dan semakin tinggi suhu sintering maka material keramik α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cenderung bertambah kuat dan keras. Sampel keramik α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan suhu sintering 1600°C dan penambahan aditif sebesar 20% dan 25% mullite



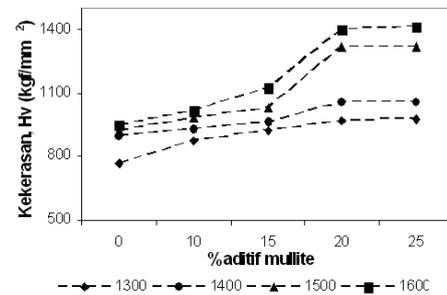
Gambar 3: Diagram alir preparasi serbuk mullite ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )



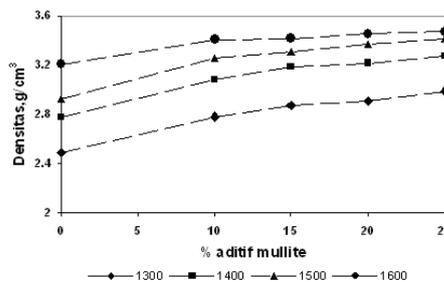
Gambar 4: Diagram alir pembuatan keramik  $\alpha-Al_2O_3$  dengan aditif mullite ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )



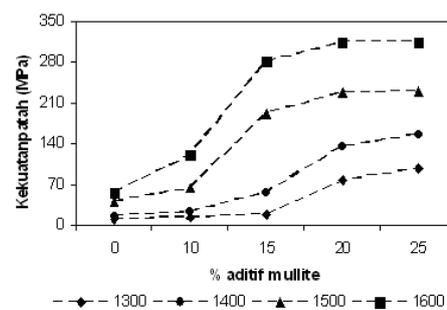
Gambar 5: Hubungan Porositas terhadap % aditif mullite



Gambar 7: Hubungan kekerasan, Hv terhadap % aditif mullite



Gambar 6: Hubungan Densitas terhadap % aditif mullite

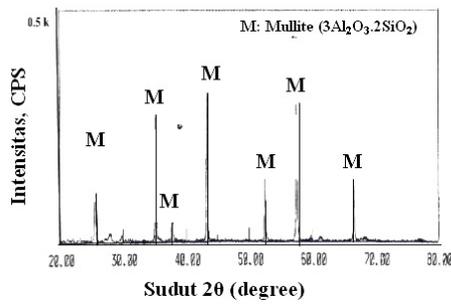


Gambar 8: Hubungan Kuat patah terhadap % aditif mullite

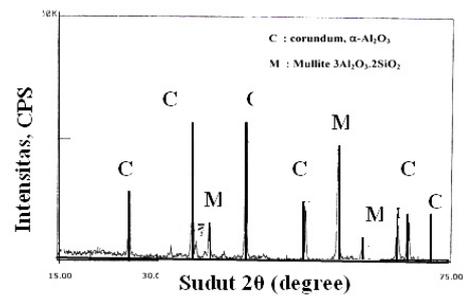
menghasilkan nilai kekerasan, Hv dan kuat patah yang paling tinggi dan mendekati konstan. Nilai kekerasan, Hv pada suhu sintering 1600°C dan penambahan aditif sebesar 20% dan 25% mullite adalah berkisar 1400 - 1450 kgf/mm<sup>2</sup> dan kuat patah sekitar 313 MPa. Nilai kekerasan, Hv untuk keramik  $\alpha-Al_2O_3$  menurut teoritis adalah sekitar 1500-1800 kgf/mm<sup>2</sup> dan kuat patah sekitar 350 MPa. Berdasarkan hasil pengukuran densitas, porositas, kekerasan dan kuat patah, diperoleh kondisi optimum adalah pada suhu sintering 1600°C dan pe-

ambahan aditif sebesar 20% dan 25% mullite. Untuk selanjutnya pengukuran koefisien ekspansi termal dan analisa struktur mikro yang diamati hanya terbatas pada sampel tersebut dan sampel kontrol (tanpa aditif) yang disinter pada suhu 1600°C.

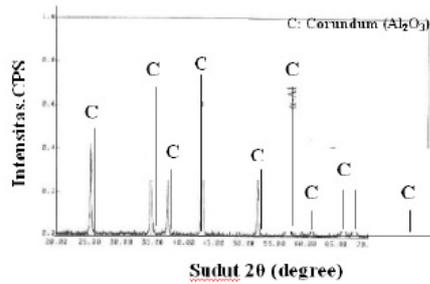
Hasil pengukuran koefisien ekspansi termal dari sampel tanpa aditif, aditif 20%, 25% mullite dan menurut literatur un-



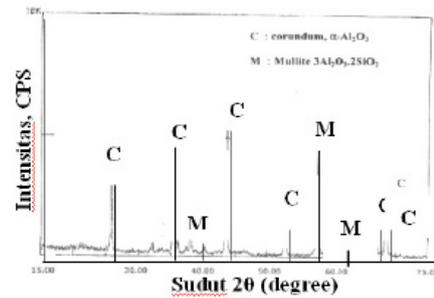
Gambar 9: Pola difraksi sinar X dari serbuk mullite, dikalsinasi 1300°C



Gambar 11: Pola difraksi sinar X keramik alumina, aditif 20% mullite yang disinter pada suhu 1600°C



Gambar 10: Pola difraksi sinar X dari alumina tanpa aditif, disinter 1600°C



Gambar 12: Pola difraksi sinar X keramik alumina, aditif 25% mullite yang disinter pada suhu 1600°C

tuk keramik alumina murni ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) serta keramik mullite ( $\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ ) diperlihatkan pada Tabel 1. Jadi jelas terlihat peran penambahan aditif mullite dapat menurunkan nilai koefisien ekspansi termal, akibatnya keramik  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  dengan penambahan aditif sekitar 20 % mullite dan suhu sintering 1600°C dapat dikatakan merupakan kondisi optimum. Semakin rendah nilai koefisien ekspansi termal dari dari suatu bahan maka benda tersebut semakin tahan terhadap kejutan suhu (*thermal shock resistance*), artinya semakin baik untuk aplikasi pada suhu tinggi. Dengan demikian fungsi penambahan mullite sebesar 20% dan suhu sintering 1600°C mempunyai peran tersendiri bila dibanding keramik  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  yang membutuhkan suhu sintering sekitar 1800-1900°C tanpa mempengaruhi sifat fisis lainnya.

TABEL I: Nilai koefisien ekspansi termal: sampel tanpa aditif, aditif 20%, 25% mullite dan keramik  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  serta keramik mullite ( $\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ ) menurut literatur.

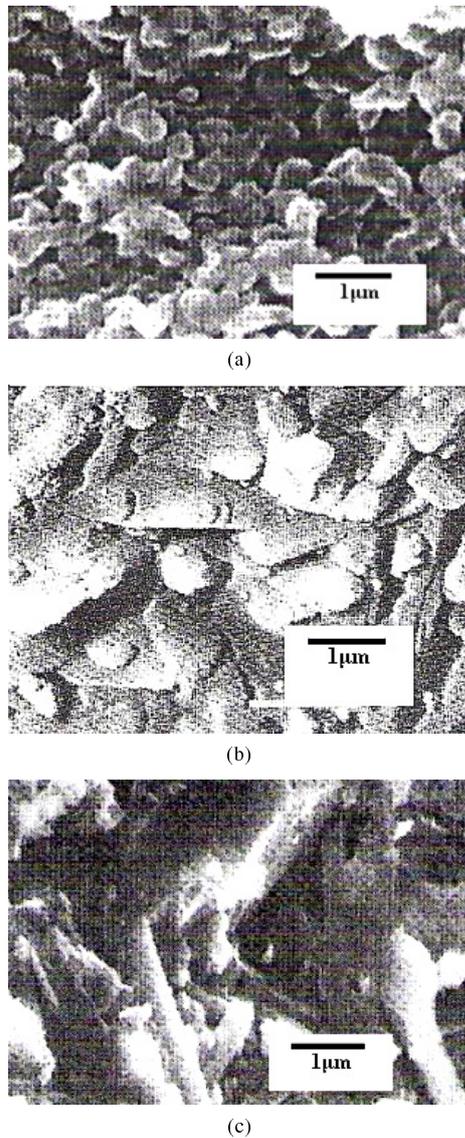
| Kondisi sampel                            | Koefisien ekspansi termal<br>$\alpha(10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$ |
|---|--|
| Tanpa aditif, suhu sintering 1600°C       | 8,6  |
| 20% aditif mullite, suhu sintering 1600°C | 6,3  |
| 25% aditif mullite, suhu sintering 1600°C | 6,1  |
| Keramik alumina murni (menurut literatur) | 8 - 9  |
| Keramik mullite (menurut literatur)       | 4,5 - 5,6  |

Hasil analisa difraksi sinar X dari serbuk mullite yang

dibuat dengan perbandingan 2 mole silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan 3 mole alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan dibakar (dikalsinasi) pada suhu 1300°C, diperlihatkan pada Gambar 9. Ternyata dengan suhu 1300°C fasa mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ ) sudah terbentuk, yang selanjutnya serbuk tersebut dijadikan sebagai aditif dalam pembuatan keramik alumina. Pada Gambar 10, hasil pola difraksi sinar X dari sampel alumina tanpa menggunakan aditif yang disinter pada suhu 1600°C, seluruh fasa yang muncul adalah corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). Corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) merupakan fasa yang stabil atau stuktur kristalnya tidak berubah terhadap perubahan suhu dan titik leburnya cukup tinggi, yaitu sekitar 2050°C. Apabila dilihat dari sifat mekanik yang dihasilkan pada pembuatan keramik  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  tanpa aditif yang disinter 1600°C masih jauh dari yang diharapkan atau belum tercapainya kondisi optimal.

Pada Gambar 11 dan Gambar 12, masing-masing menunjukkan pola difraksi sinar X dari keramik  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  dengan aditif 20% dan 25% mullite yang disinter pada suhu 1600°C. Dari kedua pola difraksi, seperti pada Gambar 11 dan Gambar 12 terlihat bahwa proses pembentukan sudah hampir sempurna dengan aditif 20% mullite dan suhu sintering 1600°C. Atau tidak ada perubahan yang signifikan dengan penambahan aditif mullite sebesar 25% dengan kondisi suhu 1600°C. Terdapat dua fasa yang terbentuk, masing-masing corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) sebagai fasa mayor dan mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ ) sebagai fasa minor. Fasa mullite akan mengisi rongga-rongga kosong diantara butir alumina dan sekaligus membentuk ikatan yang kuat diantara butiran alumina.

Hasil pengamatan dengan SEM untuk sampel alumina



Gambar 13: Foto SEM dari keramik alumina: (a). Tanpa aditif yang disinter  $1600^{\circ}\text{C}$ , (b). Dengan aditif 20% mullite yang disinter  $1600^{\circ}\text{C}$ , (c). Dengan aditif 25% mullite yang disinter  $1600^{\circ}\text{C}$ , (masing-masing perbesarannya 20.000 x).

tanpa aditif yang disinter  $1600^{\circ}\text{C}$ , dengan aditif 20% dan 25% mullite masing-masing disinter pada suhu  $1600^{\circ}\text{C}$ , diperlihatkan pada gambar 12, A, B dan C. Ternyata sampel alumina tanpa aditif dengan suhu sinter  $1600^{\circ}\text{C}$  masih berongga/berpori dan sebagian sudah terjadi aglomerat/cluster, bentuk butiran bulat tidak beraturan dan berukuran sekitar  $0,3 - 0,8 \mu\text{m}$ .

Dengan struktur mikro seperti tersebut menunjukkan bahwa proses sintering belum sempurna, artinya suhu sintering yang diterapkan kurang tinggi. Akibatnya sifat mekanik yang dihasilkan masih belum optimal dan benda uji yang diperoleh umumnya cenderung rapuh. Sedangkan untuk penambahan aditif sebesar 20% dan 25% mullite yang disinter pada suhu  $1600^{\circ}\text{C}$  menunjukkan pola yang mirip.

Butir seperti jarum (needle) adalah merupakan bentuk butiran mullite berukuran sekitar  $0,3 - 3,0 \mu\text{m}$ , berbeda dengan butiran alumina yang berbentuk bulat. Umumnya butiran mullite dan corundum saling mengikat satu sama lain dan rongga atau pori hampir tidak terlihat, karena porositas keramik alumina tersebut mendekati nol, atau tepatnya sekitar 0,64%. Hal ini menunjukkan bahwa sampel dengan penambahan aditif mullite sebesar 20% dan suhu sintering  $1600^{\circ}\text{C}$  merupakan yang terbaik dari semua komposisi yang dibuat.

## V. SIMPULAN

Penambahan aditif mullite sebesar 20% cukup signifikan memberikan pengaruh terhadap kualitas keramik alumina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) dan mampu menurunkan suhu sintering sekitar  $300^{\circ}\text{C}$  dari suhu sintering alumina murni. Kondisi optimum pada pembuatan keramik alumina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) dengan 20% mullite dan suhu sintering  $1600^{\circ}\text{C}$  menghasilkan karakteristik: densitas =  $3,47 \text{ g/cm}^3$ , porositas = 0,64%, kuat patah = 313 MPa, kekerasan,  $H_v = 1454 \text{ kgf/mm}^2$ , dan koefisien ekspansi termal =  $6,3 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Struktur mikro yang terbentuk adalah corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) sebagai fasa mayor dan mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) sebagai fasa minor. Bentuk dan ukuran corundum ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) adalah bulat, sekitar  $0,3 - 0,8 \mu\text{m}$  dan mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) berbentuk jarum (needle) dengan ukuran sekitar  $0,3 - 3,0 \mu\text{m}$ .

- [1] Kostorz Gernot, *High-Tech Ceramic*, Hal. 110-118, Academic Press, Zurich, (1988).
- [2] Montanaro, Sintering of Industrial Mullite, *Journal of The European Ceramic Society*, Nr. 17, p. 1715-1723, (1997).
- [3] Yet Ming Chiang, Dubas Birnie, W. D. Kingery, *Physical Ceramic Principles for Ceramic Science and Engineering*, John and Sons Inc., Canada, (1977).
- [4] Perdamean Sebayang, dkk., Pengaruh Penambahan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap Proses Sintering dan Sifat Fisis Keramik Porselin untuk Komponen Isolator Listrik, *Prosiding Seminar Nasional Material dan Lingkungan Dalam Pembangunan Industri*, Bandung 19 Oktober 1998, halaman: 10.1 - 10.10, ISBN 979-8580-19-2, (1998).
- [5] Perdamean Sebayang, Budiarto, Sintesa Keramik Alumina-Zirkonia sebagai Bahan Refraktori Suhu Tinggi, *Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi II*, hal.: 339-343, Serpong 29-30 Oktober 1997, ISSN 1410-2897, (1997)
- [6] Worrall W. E., *Clay and Ceramics Raw Material*, Elsevier Scientific Publishing Company, Vol. 4, 7. 3-7, London, (1986).
- [7] Clifton G. Bergeron, Subhash H. Risbud, *Introduction to Phase Equilibria in Ceramics*, The American Ceramic Society, Inc., Columbus Ohio, (2000).
- [8] Perdamean Sebayang, dkk., Penelitian Pengembangan Keramik Mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) dan Cordierite ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ) sebagai material refraktori, *Prosiding Seminar Fisika Jakarta*, Museum Migas-TMII, 9 Oktober 1995, (1995)

- [9] James S. Read, *Introduction to The Principles of Ceramic Processing*, John Willey & Sons, Inc., Singapore, (1988).
- [10] Perdamean Sebayang, *dkk.*, Pengaruh Aditif MgO terhadap Sifat Fisis Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> untuk Substrat Elektronik, Jurnal Fisika, Him-punan Fisika Indonesia, **Volume 2**, No. 4, Desember 1999, halaman 48 - 53, ISSN 0854 -3046, (1999)
- [11] Nikolic L. J., J. K. Baiely, M. M. Ristic, *Sintering of Alumina Derived from Alumina Gel*, Material Monograph Science, No. 4, p. 168-171, Elsevier, New York, (1999).