

PENGARUH ADITIF NIOBIA (Nb_2O_5) TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK KERAMIK ALUMINA-ZIRKONIA ($Al_2O_3-ZrO_2$).

Saeful Hidayat*, Dani Gustaman Syarif *, Yudha Triarsono**

* Puslitbang Teknik Nuklir-BATAN

** Jurusan Metalurgi UNJANI, Bandung

ABSTRAK

PENGARUH ADITIF NIOBIA (Nb_2O_5) TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK KERAMIK ALUMINA-ZIRKONIA ($Al_2O_3-ZrO_2$). Telah dilakukan penelitian pembuatan keramik Alumina-Zirkonia ($Al_2O_3-ZrO_2$) yang ditambah aditif Niobia (Nb_2O_5), pada suhu sinter yang relatif rendah ($1480^{\circ}C$). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan aditif Nb_2O_5 terhadap struktur mikro dan sifat mekanik keramik $Al_2O_3-ZrO_2$. Penelitian dilakukan dengan menyinter pelet $Al_2O_3-ZrO_2$ yang ditambahi Nb_2O_5 sebanyak 0 hingga 1 % mol pada suhu $1480^{\circ}C$ di dalam atmosfer udara selama 1 jam, kemudian mengukur densitas pelet dan menganalisis pelet sinter dengan bantuan mikroskop optik dan elektron (SEM) dan difraksi sinar-X serta melakukan pengukuran kekerasan dan ketangguhan retak. Hasil pengukuran densitas menunjukkan adanya peningkatan densitas pelet sinter dengan makin besarnya penambahan konsentrasi aditif Nb_2O_5 . Sementara itu, hasil analisis difraksi sinar-X memperlihatkan bahwa pelet sinter $Al_2O_3-ZrO_2$ mengandung fase ke dua $Nb_2Zr_6O_{17}$ dan hasil analisis metalografi memperlihatkan bahwa ukuran butir pelet sinter $Al_2O_3-ZrO_2$ bertambah besar dengan makin besarnya konsentrasi Nb_2O_5 yang ditambahkan. Hasil uji kekerasan dan ketangguhan retak menunjukkan adanya kenaikan kekerasan dan ketangguhan retak dengan bertambahnya aditif Nb_2O_5 .

Kata kunci : Keramik, Struktur mikro, Kekerasan, Ketangguhan retak, $Al_2O_3-ZrO_2$, Nb_2O_5 .

ABSTRACT

EFFECT OF Nb_2O_5 ADDITION ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE $Al_2O_3-ZrO_2$ CERAMICS. Production of $Al_2O_3-ZrO_2$ ceramics added with Nb_2O_5 at relatively low sintering temperature ($1480^{\circ}C$) has been done. The aim of the research is to know the effect of Nb_2O_5 additive on the microstructure and mechanical properties of the $Al_2O_3-ZrO_2$ ceramics. The research was conducted by sintering $Al_2O_3-ZrO_2$ added with 0-1 % mole Nb_2O_5 at

1480°C in air for 1 hour and measuring the density of the sintered pellets, and analyzing the sintered pellets using optical microscope, electron microscope (SEM) and X-ray diffractometer, and determining the hardness and fracture toughness. The result of the density measurement showed that the density of the sintered pellets increased with increasing of Nb₂O₅ concentration. The metallographic analysis showed that the grain size of the Al₂O₃-ZrO₂ sintered pellets increased with increasing of Nb₂O₅ concentration. Meanwhile, the X-ray diffraction analysis showed that the Al₂O₃-ZrO₂ sintered pellets contained Nb₂Zr₆O₁₇ second phase. The result of the hardness and fracture toughness test showed that the hardness and the fracture toughness increased with increasing of Nb₂O₅.

Key words : ceramic, microstructure, hardness, fracture toughness, Al₂O₃-ZrO₂, Nb₂O₅.

PENDAHULUAN

Saat ini, salah satu bahan teknik yang makin luas penggunaannya adalah keramik, meskipun telah dikenal sejak lama. Perkembangan ilmu bahan di bidang keramik memungkinkan penggunaan keramik di berbagai bidang industri, misalnya bahan *tip insert* (ujung pahat potong) untuk perkakas potong, karena mempunyai sifat fisis dan mekanis yang sesuai untuk komponen tersebut.

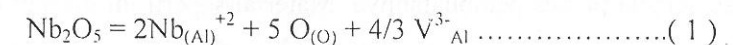
Keramik Alumina-Zirkonia (Al₂O₃-ZrO₂) adalah salah satu jenis keramik yang memiliki sifat mekanis dan fisis bahan yang relatif baik. Terutama dari sisi kekokohan (*toughness*) dan kekerasannya serta tahan temperatur tinggi [1,2].

Pembuatan keramik Al₂O₃-ZrO₂ membutuhkan temperatur penyinteran yang cukup tinggi, yaitu di sekitar 1600°C-1800°C. Penggunaan temperatur tinggi pada saat proses pembuatan, membutuhkan biaya proses yang relatif tinggi bila dibandingkan dengan penggunaan temperatur rendah, karena makin tinggi temperatur, makin tinggi energi yang diperlukan. Hal ini perlu dihindarkan, karena dengan biaya proses yang tinggi akan menurunkan daya saing produk di pasaran. Untuk itu penelitian yang mengarah ke penurunan temperatur sinter bahan, dengan tanpa memberikan efek negatif, perlu dilakukan.

Berdasarkan diagram fase Al₂O₃-Nb₂O₅ [3] proses sinter Al₂O₃-ZrO₂ pada temperatur rendah, diduga dapat dilakukan dengan menambahkan bahan aditif Niobia (Nb₂O₅). Aditif Nb₂O₅ yang ditambahkan diharapkan akan membentuk larutan padat atau menghasilkan fase cair batas butir yang dapat membantu proses penyinteran dan mengontrol struktur butir. Berdasarkan hal tersebut, telah dilakukan penelitian pembuatan keramik Al₂O₃-ZrO₂ dengan menambahkan aditif Nb₂O₅ untuk melihat pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan struktur mikro.

TEORI

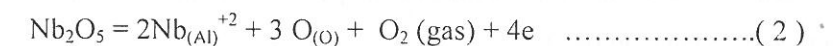
Jika oksida bervalensi 5 seperti Niobia (Nb₂O₅) ditambahkan sebagai aditif ke dalam oksida bervalensi 3 seperti alumina (Al₂O₃) sebagai matriks, dan oksida aditif tersebut membentuk larutan padat dengan alumina, maka cacat kekosongan aluminium (V_{Al}) dapat terbentuk sesuai reaksi persamaan (1). Namun reaksi persamaan (1) tidak selalu terjadi. Jika reaksi persamaan (1) tidak terjadi, maka reaksi yang dapat terjadi dalam rangka akomodasi ion Nb⁺⁵ oleh Al₂O₃ adalah reaksi sesuai persamaan (2).



dengan, Nb_(Al)⁺² = Ion Nb yang masuk ke subkisi Al,

O_(O) = Ion Oksigen yang masuk ke subkisi oksigen,

V_{Al}³⁻ = Cacat kekosongan aluminium.



dengan; Nb_(Al)⁺² = Ion Nb yang masuk ke subkisi Al,

O_(O) = Ion Oksigen yang masuk ke subkisi oksigen,

e = Cacat kekosongan aluminium.

Jika selama penyinteran reaksi yang terjadi adalah reaksi persamaan (1), maka secara teoritis proses penyinteran akan teraktivasi karena cacat kekosongan Al dapat meningkatkan difusi atom. Di sisi lain, jika reaksi yang terjadi mengikuti persamaan (2), maka proses penyinteran tidak teraktivasi.

Sementara itu, jika di dalam matriks alumina terdapat aditif yang mempunyai titik leleh yang lebih rendah dari pada suhu penyinteran, atau aditif yang hasil reaksinya dengan matriks atau aditif lain memiliki suhu leleh yang lebih rendah dari pada suhu penyinteran, maka secara teoritis proses penyinteran juga akan teraktivasi karena selama penyinteran akan terbentuk fase cair di batas butir. Peristiwa seperti ini dikenal juga sebagai penyinteran fase cair (*liquid phase sintering*)[4,5].

Alumina murni relatif sangat keras dan kuat, tetapi untuk penggunaan tertentu seperti cutting tool, ketangguhan retak alumina murni masih harus ditingkatkan. Berbagai cara dapat dilakukan dan salah satunya adalah melalui penguatan fase kedua. Untuk menambah ketangguhan retak alumina, biasanya ke dalamnya ditambahkan material penguat seperti whisker SiC dan zirkonia [5] yang tetap tidak mengalami perubahan fase selama proses pembuatannya. Material seperti ini disebut juga sebagai keramik komposit. Ketangguhan retak adalah ukuran seberapa kuat sebuah material dapat menahan rambatan retak (*crack*). Berbagai cara dapat digunakan untuk menentukan harga ketangguhan retak. Salah satunya adalah metode indentasi [5,6]. Untuk ketangguhan retak mode I (*opening mode*) biasanya ditulis sebagai K_{IC} dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3)[6] dengan mengacu kepada persamaan (4), persamaan (5) dan Gambar 1.

$$K_{IC} = B(Hv.W) \dots\dots\dots (3)$$

K_{IC} = Ketangguhan retak (*fracture toughness*)

B = Konstanta

Hv = Kekerasan vickers

W = Ketahanan retak

$$W = P/4c \dots\dots\dots (4)$$

W = Ketahanan retak

P = Beban indenter

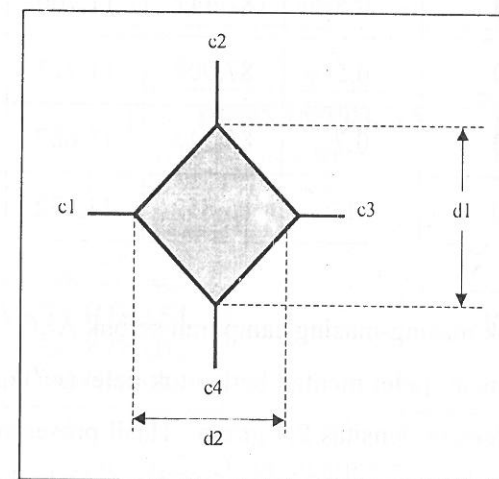
c = Rata-rata panjang retakan di ujung indentasi = $(c1+c2+c3+c4)/4$ (Lihat Gambar 1)

$$Hv = 1,8544.P/d^2 \dots\dots\dots (5)$$

Hv = Kekerasan Vickers (Kg/mm^2)

P = Beban indenter (Kg)

d = Rata-rata panjang diagonal indentasi (mm) ($d = (d1 + d2)/2$, lihat Gambar 1)



Gambar 1. Indentasi dan retak pada ujung-ujungnya.

BAHAN DAN TATA KERJA

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah oksida logam berbentuk serbuk p.a., yaitu Oksida Aluminium (Al_2O_3) dengan kemurnian 99.9%, Zirkonia (ZrO_2) dan Niobia (Nb_2O_5) dengan kemurnian masing 99.99%. Komposisi bahan campuran keramik $Al_2O_3-ZrO_2$ dan penambahan aditif Nb_2O_5 dibuat dalam satuan %

mol dan % berat. Komposisi paduan tersebut dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan tata kerja penelitian dapat dilihat pada Gambar 2, berupa diagram alir tahapan penelitian.

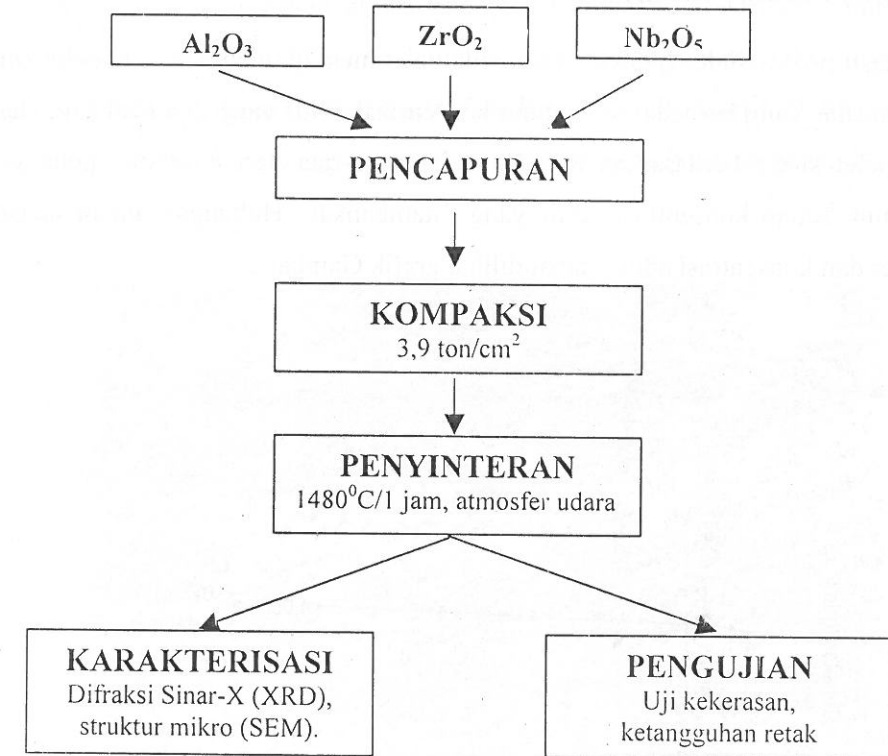
Tabel 1. Komposisi campuran keramik Al_2O_3 - ZrO_2 dan aditif Nb_2O_5 .

No	Al_2O_3 %-mol	ZrO_2 %-mol	Nb_2O_5 %-mol	Al_2O_3 %-berat	ZrO_2 %-berat	Nb_2O_5 %-berat
1	90	10	0	88,184	11,816	0
2	89,9	10	0,1	87,948	11,797	0,255
3	89,7	10	0,3	87,447	11,760	0,763
4	89,5	10	0,5	87,009	11,723	1,268
5	89,3	10	0,7	86,544	11,687	1,769
6	89	10	1	85,852	11,632	2,516

Proses kompaksi untuk masing-masing campuran serbuk Al_2O_3 - ZrO_2 dan aditif Nb_2O_5 yang dibuat, menghasilkan pelet mentah berbentuk pelet (*pil*) dengan diameter ± 10 mm dan tebal ± 4 mm dengan densitas $2,4 \text{ gr/cm}^3$. Hasil proses sinter pada pelet mentah tersebut, menghasilkan pelet sinter dengan densitas yang berbeda, tergantung konsentrasi aditif yang ditambahkan. Proses sinter dilakukan pada suhu 1480°C . berdasarkan acuan diagram fase Al_2O_3 - Nb_2O_5 . [3].

Pengukuran densitas pelet mentah dan pelet sinter dilakukan dengan cara mengukur dimensi tiap pelet sebanyak 6 pelet untuk masing-masing komposisi, kemudian ditimbang, hasilnya dirata-ratakan untuk menghasilkan harga densitas rata-rata.

Proses metalografi dilakukan untuk mendapatkan gambar struktur mikro dan ukuran/ besar butir. Pengukuran ukuran butir dilakukan menggunakan metode Heyn pada masing-masing pelet dari 6 pelet untuk setiap komposisi. Hasil pengukuran dirata-ratakan untuk menghasilkan ukuran butir rata-rata.



Gambar 2. Diagram alir tahapan penelitian

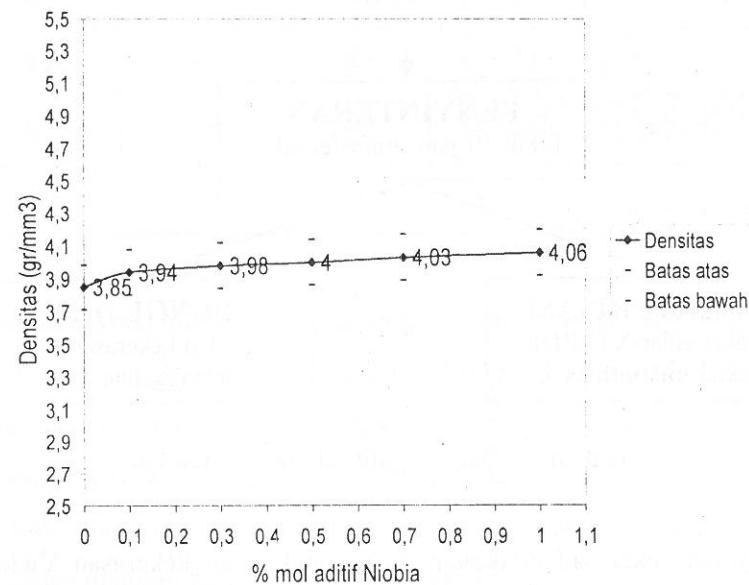
Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan uji kekerasan Vickers dengan jumlah pengujian sebanyak 10 titik dan menghasilkan kekerasan Vickers (HV) rata-rata untuk setiap sampel. Perhitungannya dilakukan dengan menggunakan persamaan (5).

Pengujian ketangguhan retak dilakukan dengan menggunakan alat uji kekerasan Vickers dengan bantuan persamaan (3) sampai dengan (5). Besar beban

pengujian disesuaikan sedemikian rupa sehingga menghasilkan retakan pada bekas indentor (*indentasi*). Pengujian dilakukan pada 6 sampel dan menghasilkan ketangguhan retak rata-rata.

HASIL DAN PEMBAHASAN

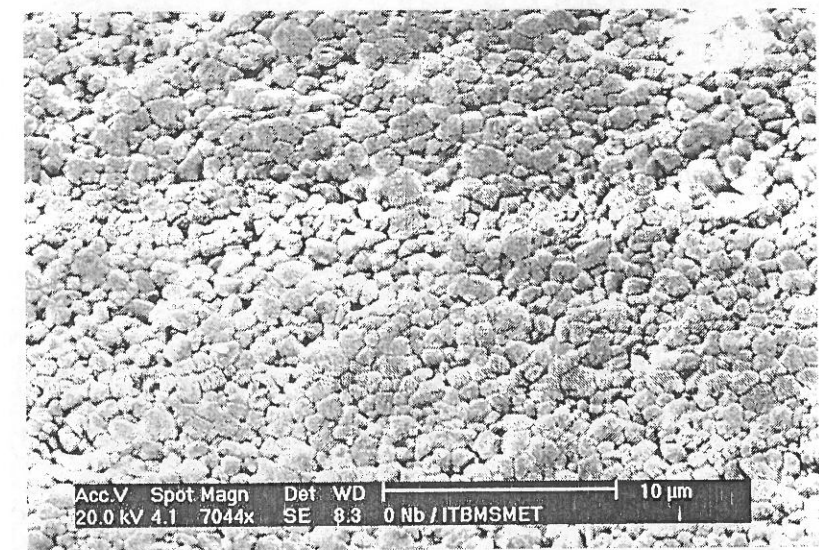
Hasil proses sinter (*penyinteran*) pada pelet mentah, menghasilkan pelet sinter dengan densitas yang berbeda, tergantung konsentrasi aditif yang ditambahkan. Harga densitas pelet sinter berdasarkan harga densitas rata-rata dari 6 sampel pelet yang diukur untuk setiap konsentrasi aditif yang ditambahkan. Hubungan antara densitas pelet sinter dan konsentrasi aditif, dapat dilihat grafik Gambar 3.



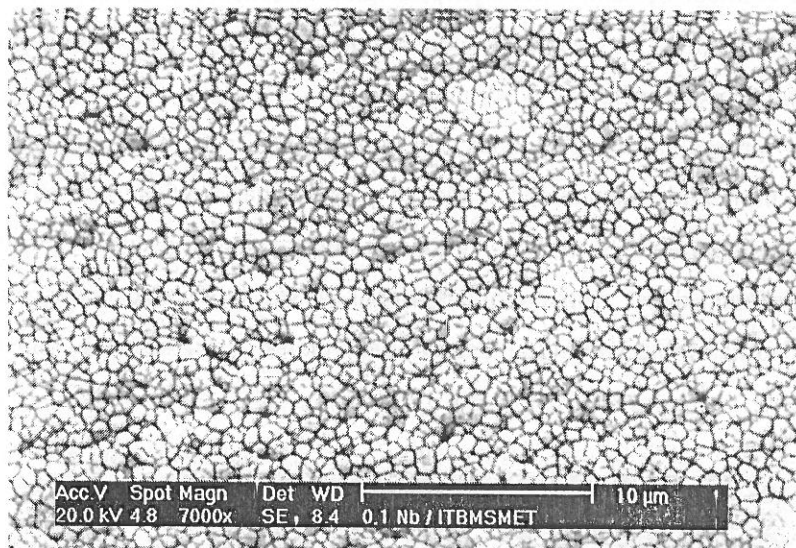
Gambar 3. Grafik hubungan antara densitas pelet sinter dan konsentrasi aditif Niobia.

Pada Gambar 3, terlihat adanya peningkatan densitas pelet sinter mengikuti penambahan konsentrasi aditif. Hal ini menunjukkan, bahwa penambahan aditif niobia mempengaruhi proses pematangan (*sintering*).

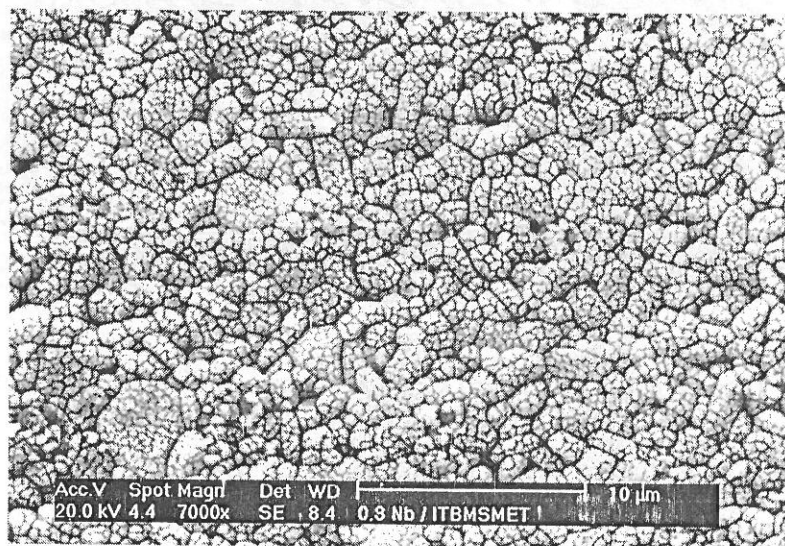
Hasil proses metalografi pada keramik $Al_2O_3-ZrO_2$, menunjukkan adanya kenaikan ukuran butir bahan akibat adanya penambahan konsentrasi aditif niobia. Struktur mikro keramik $Al_2O_3-ZrO_2$ untuk masing-masing konsentrasi aditif niobia yang ditambahkan, dapat dilihat pada Gambar 4 s/d 8. Grafik hubungan antara konsentrasi aditif niobia yang ditambahkan dan ukuran butir keramik, dapat dilihat pada Gambar 9.



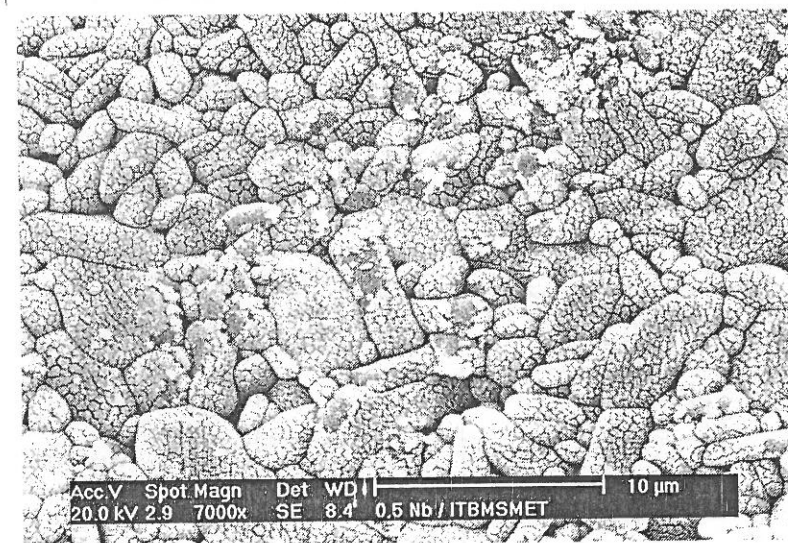
Gambar 4. Struktur mikro keramik Alumina-Zirkonia tanpa aditif Niobia dengan ukuran butir rata-rata sebesar 2 µm.



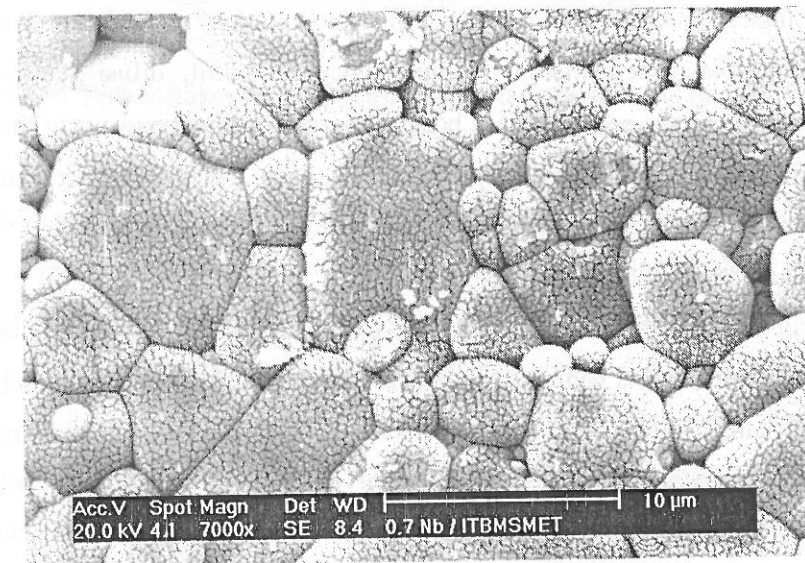
Gambar 5. Struktur mikro keramik Alumina-Zirkonia yang ditambah aditif Niobia sebesar 0,1 % mol, mempunyai ukuran butir rata-rata sebesar 3,46 μm.



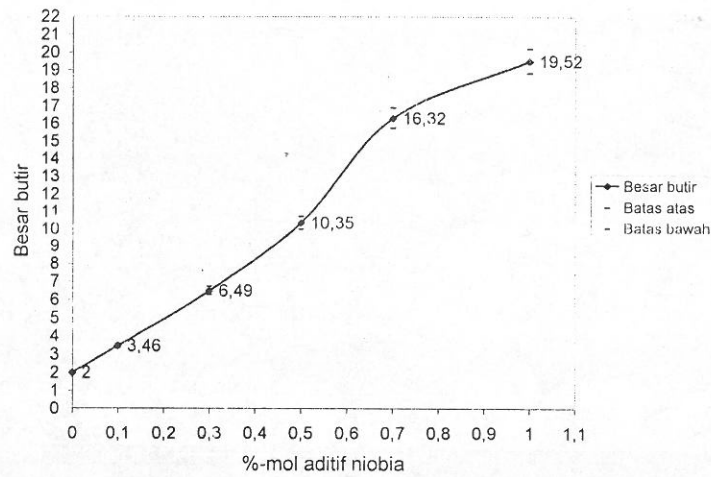
Gambar 6. Struktur mikro keramik Alumina-Zirkonia yang ditambah aditif Niobia sebesar 0,3 % mol, mempunyai ukuran butir rata-rata sebesar 6,49 μm



Gambar 7. Struktur mikro keramik Alumina-Zirkonia yang ditambah aditif Niobia sebesar 0,5 % mol, mempunyai ukuran butir rata-rata sebesar 10,35 μm.



Gambar 8. Struktur mikro keramik Alumina-Zirkonia yang ditambah aditif Niobia sebesar 0,7 % mol, mempunyai ukuran butir rata-rata sebesar 16,32 μm.



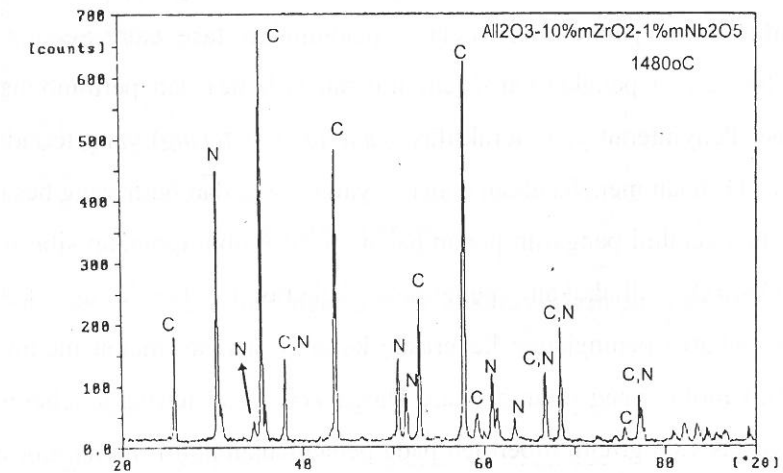
Gambar 9. Grafik hubungan antara besar butir rata-rata pelet sinter dan prosentase aditif Niobia.

Peningkatan densitas pelet sinter terjadi karena aditif yang ditambahkan telah meningkatkan derajat penyinteran. Karena kehadiran aditif, difusi semakin besar sehingga mempercepat pertumbuhan butir. Derajat penyinteran yang meningkat karena aditif juga telah mengurangi pori-pori pada pelet sinter terutama pori intragranular dan memperbesar densitas. Hal inilah yang menyebabkan struktur mikro yang dihasilkan hampir bebas pori.

Perubahan ukuran butir yang terjadi pada keramik $Al_2O_3-ZrO_2$, disebabkan oleh pengaruh aditif niobia yang meningkatkan derajat penyinteran. Pertumbuhan butir makin tinggi karena difusi atom (jika *solid state sintering*) atau evaporasi-kondensasi (jika *liquid phase sintering*) yang terjadi antar partikel (butir) makin besar. Makin membesarnya butir diiringi pula dengan pengurangan jumlah pori pada pelet sinter. Makin besar konsentrasi aditif, makin aktif pula pertumbuhan butir.

Analisis difraksi sinar-x pada pelet sinter untuk komposisi 1%-mol niobia menunjukkan adanya pembentukan senyawa/fasa baru pada keramik $Al_2O_3-ZrO_2$, yaitu

$Nb_2Zr_6O_{17}$. Data pola difraksi keramik $Al_2O_3-ZrO_2$ tersebut dapat dilihat pada Gambar 10. Seperti terlihat pada Gambar 10 terdapat 24 puncak pola difraksi pada daerah sudut $2\theta = 20^0-90^0$. Setelah d (\AA) hasil pengukuran dibandingkan dengan harga d (\AA) dari tabel Hanawalt, dapat dikatakan bahwa aditif Niobia membentuk senyawa (fase) baru, yaitu $Nb_2Zr_6O_{17}$.



Gambar 10. Pola difraksi keramik $Al_2O_3-ZrO_2$, yang memperlihatkan puncak senyawa baru $Nb_2Zr_6O_{17}$ (N) dan puncak Al_2O_3 (C).

Pembentukan senyawa baru $Nb_2Zr_6O_{17}$ memperlihatkan bahwa ZrO_2 tidak inert terhadap aditif Nb_2O_5 , berarti ZrO_2 yang tinggal di dalam matriks Al_2O_3 telah berkurang sehingga di dalam komposit alumina-zirkonia terdapat fase kedua yang berpengaruh terhadap sifat mekanik material yaitu $Nb_2Zr_6O_{17}$. Material matriks alumina telah diperkuat oleh material baru $Nb_2Zr_6O_{17}$ selain oleh ZrO_2 . Data ini juga memperlihatkan bahwa mekanisme aktivasi penyinteran melalui persamaan (1) atau (2) tidak terjadi. Seharusnya jika Nb_2O_5 larut padat di dalam Al_2O_3 dan ZrO_2 inert, maka pertumbuhan butir di dalam keramik alumina dikontrol oleh proses akomodasi ion Nb^{5+} oleh Al_2O_3 . Kecepatan pertumbuhan butir di dalam alumina yang ditambahi Nb_2O_5 akan terjadi melalui pergantian sebagian ion Al^{3+} oleh ion Nb^{5+} . Akibat adanya

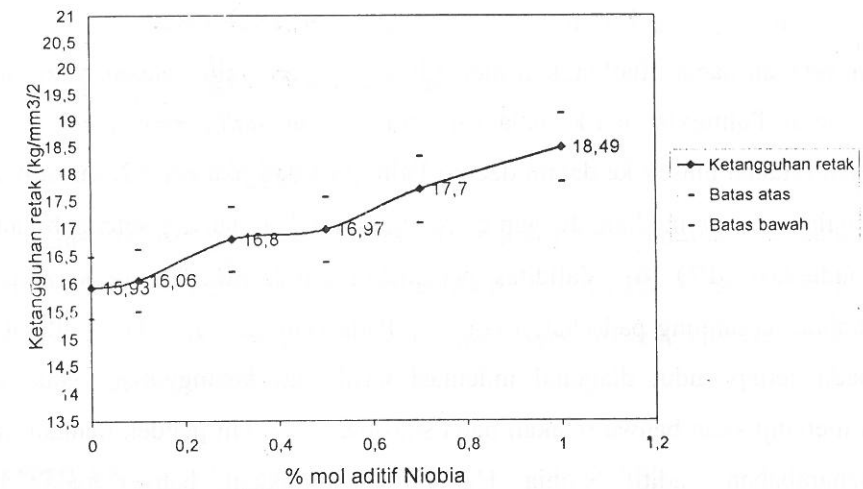
perbedaan muatan ion Nb^{5+} dan Al^{3+} , maka di dalam kristal Al_2O_3 terjadi cacat kristal kekosongan aluminium (V_{Al}^{3-}). Cacat kristal inilah yang mengaktivasi laju pertumbuhan butir. Namun skenario ini tidak terjadi pada pelet yang dihasilkan pada penelitian ini.

Skenario yang lebih tepat adalah bahwa selama penyinteran telah terbentuk senyawa $Nb_2Zr_6O_{17}$ dan fase cair. Reaksi pembentukan senyawa ini dan fase cair telah membantu proses penyinteran melalui penyinteran fase cair. Selama proses penyinteran telah terjadi pengkerutan (pengurangan volume) dan pertumbuhan butir yang teraktivasi. Penyinteran yang teraktivasi (*activated sintering*) yang terjadi akibat penambahan Nb_2O_5 telah menghasilkan densitas yang tinggi dan butir yang besar.

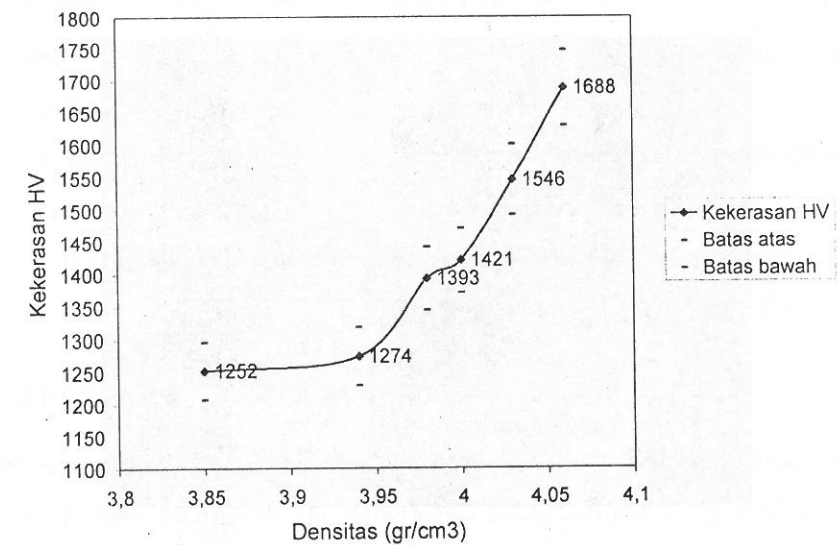
Untuk mengetahui pengaruh penambahan aditif niobia terhadap sifat mekanik keramik $Al_2O_3-ZrO_2$, dilakukan pengujian kekerasan. Hasil uji kekerasan menunjukkan adanya peningkatan kekerasan keramik dengan makin membesarnya konsentrasi aditif niobia yang ditambahkan. Harga kekerasan tertinggi sebesar 1688 HV dengan densitas $4,06 \text{ gr/cm}^3$ diperoleh pada penambahan aditif niobia sebesar 1%. Data kekerasan keramik $Al_2O_3-ZrO_2$ dapat dilihat pada Gambar 11.

Hasil pengujian ketangguhan retak pada pelet sinter menunjukkan adanya peningkatan ketangguhan dengan makin tingginya konsentrasi aditif yang ditambahkan. Pada Gambar 12, dapat dilihat kenaikan ketangguhan retak keramik akibat penambahan aditif niobia. Ketangguhan retak (K_{IC}) relatif meningkat hingga didapat harga K_{IC} sebesar $18,49 \text{ kg/mm}^{3/2}$ (maks).

Meningkatnya kekerasan keramik $Al_2O_3-ZrO_2$ disebabkan oleh adanya peningkatan nilai densitas keramik pada proses sinter akibat penambahan aditif niobia. Dengan makin tinggi nilai densitas, maka kekerasan keramik makin tinggi.

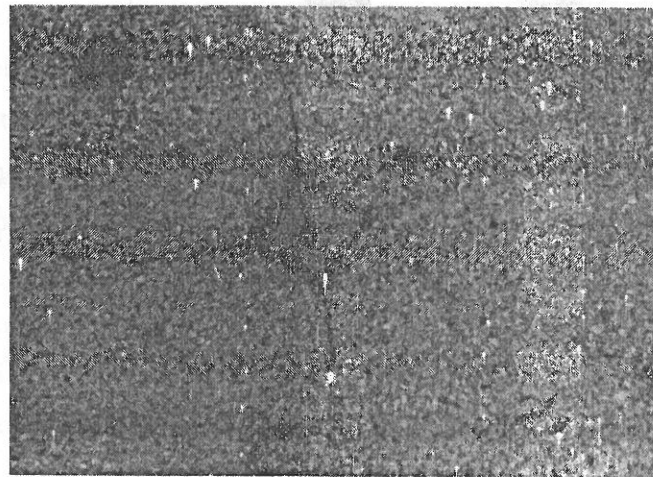


Gambar 11. Grafik hubungan antara kekerasan dan densitas pelet sinter

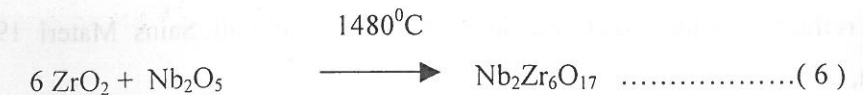


Gambar 12. Grafik hubungan antara ketangguhan retak dan konsentrasi aditif niobia.

Kenaikan harga K_{IC} berbanding lurus dengan harga kekerasannya. Berdasarkan ukurannya, retakan dapat digolongkan menjadi dua bagian, yaitu retakan yang masuk ke dalam daerah Palmqvist dan ke dalam daerah Median (*half-penny crack*) [6]. Jika $c/a < 2$, maka retakan masuk ke dalam daerah Palmqvist dan jika $c/a > 2$, maka retakan masuk ke dalam daerah median, dengan c = panjang retakan dan a = setengah panjang diagonal indentasi ($d/2$) [6]. Validitas persamaan untuk menghitung karakteristik mekanik bahan tergantung pada harga c/a . Pada Gambar 13, dapat dilihat foto retakan pada setiap sudut diagonal indentasi hasil uji ketangguhan retak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa retakan pada spesimen semakin pendek dengan makin besar penambahan aditif Niobia. Hal ini menunjukkan, bahwa makin besar konsentrasi $Nb_2Zr_6O_{17}$, makin sukar retak untuk menjalar. Peningkatan konsentrasi fase kedua $Nb_2Zr_6O_{17}$ yang terbentuk terjadi ketika konsentrasi aditif Niobia juga semakin banyak sesuai reaksi pada persamaan (6). Fase kedua $Nb_2Zr_6O_{17}$ yang makin banyak, makin kuat menahan laju penjalaran retakan.



Gambar 13. Foto retakan pada setiap sudut indentasi hasil uji ketangguhan retak.



Data sifat fisik dan mekanik bahan keramik pada penelitian ini, menunjukkan terdapatnya kemungkinan penggunaan keramik $Al_2O_3-ZrO_2$ yang ditambah Niobia sebagai bahan *tip insert* perkakas potong, yang memerlukan ketangguhan retak bahan yang cukup tinggi.

KESIMPULAN

1. Pada temperatur sinter $1480^\circ C$, penambahan aditif Niobia (Nb_2O_5) dapat meningkatkan derajat penyinteran keramik $Al_2O_3-ZrO_2$. Hal ini terlihat dari makin meningkatnya densitas dan ukuran butir keramik $Al_2O_3-ZrO_2$ setelah ditambah aditif niobia.
2. Penambahan aditif Niobia pada keramik $Al_2O_3-ZrO_2$, membentuk fase kedua ($Nb_2Zr_6O_{17}$).
3. Harga kekerasan dan ketangguhan retak keramik $Al_2O_3-ZrO_2$, meningkat dengan makin besarnya konsentrasi aditif Niobia.
4. Data hasil penelitian ini menunjukkan adanya kemungkinan keramik $Al_2O_3-ZrO_2$ dengan penambahan aditif Nb_2O_5 dapat digunakan sebagai bahan "*Tip insert*".

DAFTAR PUSTAKA

1. CLAUSSEN, NILS., Fracture toughness of Al_2O_3 with an unstabilized ZrO_2 dispersed phase, *Journal of The American Ceramics Society*, 59, (1-2), (1976), 49-51.

2. SEBAYANG P., BUDIARTO, Sintesa komposit keramik alumina zirkonia sebagai bahan refraktori suhu tinggi, Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi 1997, Jakarta, (1997), 339-343.
3. ANONYMOUS, Phase Diagram for Ceramists, The American Ceramic Society, Inc, Ohio, 6, 1987.
4. KINGERY, W.D., BOWEN, A.K., UHLMANN, D.R., Introduction to ceramics, 2nd, John Wiley & Sons, 1996.
5. BARSOUM MICHEL, Fundamentals of ceramics, McGraw-Hill, 1997.
6. SYARIF, DANI GUSTAMAN, Penentuan sifat mekanik pelet keramik UO_2 dengan metode indentasi, Buletin BATAN, Jakarta, 1997.