

ANALISIS STRUKTUR MORFOLOGI DAN KRISTAL MATERIAL KERAMIK PIEZOELEKTRIK KOMERSIAL UNTUK APLIKASI TRANSDUSER AKUSTIK

Rindang Kembar Sari

Staf Pengajar Kimia di Jurusan Tarbiyah STAIN Sjech M. Djamil Djambek Bukittinggi

E_mail: rindangkembarsari@gmail.com

ABSTRACT

This research was characterized the properties of commercially available piezo electric ceramic material. The properties investigated are morphology and crystal structure. The analysis of morphology structure use SEM-EDAX and optical microscopy, and crystal structure use XRD. The samples of research are ceramic with HNO₃ acid solution and ceramic without HNO₃ acid solution. The purpose of sample was acid to eliminate conductive layer of silver. The construction of samples are three parts. Parts of the sample are silver metal conductor, ceramic, and brass substrate. The results of investigation are: (1) There are very clearly distinct interlayer between the three parts of the sample. For the ceramic sample without acid, the ceramic part has smooth grain size compared with conductive coating of silver and brass substrate, but it has rough grain size with acid. (2) The chemical elements of piezoelectric ceramic are Zr, Pb, and Ti. The sample has largest percentage of Pb element. The chemical element of the conductive coating is silver (Ag). (3) Types of piezoelectric ceramic phase without acid are Ag and PZT phases [Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃], and the sample with acid is only PZT phase.

Keyword: *Analysis of stucture, morphology structure, crystal structure, piezoelectric, ceramic, and acoustic transducer.*

PENDAHULUAN

Berkembangnya industri-industri mu takhir seperti elektronika dan kedirangan taraan hanya mungkin terjadi karena pertumbuhan ilmu pengetahuan dan teknologi dari keramik canggih yang terka dang disebut pula keramik halus, teknis, spesial, atau keramik rekayasa. Komputer, pengumpul energi surya, reaktor nuklir dan kimia, pesawat angkasa luar, mesin kapal, mobil, dan industri adalah sebagian contoh peralatan/piranti yang memanfaatkan kema juan keramik baru dalam dasawarsa terakhir. Teknologi abad 21 nanti juga akan banyak ditopang oleh bahan keramik.

Piezoelektrik pertama kali ditemukan oleh Pierre and Jacques Curie pada tahun 1880 (B.Jaffe, W.R., Cook & H. Jaffe, 1971). Langevin mengembangkan sebuah tranduser ultrasonik piezoelektrik selama perang dunia pertama. Pada tahun 1935,

Pengembangan ini berhasil membuka peluang terkait aplikasi dari material piezo elektrik seperti transduser ultrasonik, mikro pon, aselerometer dan sebagainya (Lang gevin, 1950). Aplikasi keramik piezo elektrik meningkat pesat dalam beberapa dekade ini. Semenjak beberapa perusahaan Jepang fokus pada pengembangan proses baru dan aplikasi, kemudian membuka pasar komersial baru untuk berbagai devais piezoelektrik (B.Jaffe, W.R., Cook & H. Jaffe, 1971, W. G. Cady, 1964).

Masyarakat modern tergantung pada material keramik piezoelektrik untuk ber bagai keperluan hidup sehari-hari, seperti transduser, sensor dan komponen rangkaian elektronik. Berbagai peralatan kantor dan rumah tangga yang ditemui banyak terbuat dari keramik piezoelektrik. Pada bidangomotif, keramik piezoelektrik dipakai untuk sumber pengapian, atomisasi bahan

bakar, sensor ketukan, pengukuran tekanan ban, alarm keamanan, dan sistem audio (*sound*). Secara komersial banyak ditemui aplikasi keramik piezoelektrik seperti hidrophone, kipas (fan), sensor produksi, pencah, dan sistem keamanan. Peralatan-peralatan komputer banyak terbuat dari keramik piezoelektrik seperti pada printer ink jet, aktuator mikro disk drive, dan keyboard. Barang-barang konsumsi di rumah tangga juga menggunakan keramik piezoelektrik seperti lonceng telepon, speaker, alat penyemprot, alarm untuk sistem keamanan, detektor asap, sensor ultrasonik untuk otomatisasi, dan lain-lain. Di industri, keramik piezoelektrik digunakan untuk pembersih ultrasonik, pengelasan ultra sonik, klep pneumatik dan lain-lain. Pada bidang medis, keramik piezoelektrik digunakan pada sistem monitor jantung janin, sistem diagnosis aliran darah, alat ukur/kontrol aliran, alarm monitor pasien, pompa insulin, ultrasonic imaging, dan lain-lain (Phillip, James, R, 2000).

Tingginya kebutuhan akan keramik ini menjadi salah satu faktor penyebab pesatnya perkembangan teknologi material keramik piezoelektrik. Salah satu sifat yang menarik dari keramik piezoelektrik yaitu mengubah energi listrik dan energi mekanik atau sebaliknya. Karena itu, keramik piezoelektrik ini dapat diaplikasikan sebagai transduser akustik.

Material keramik piezoelektrik saat ini sudah banyak ditemui dipasaran. Namun, karakteristik dari material keramik ini belum dimiliki atau tidak diketahui. Disisi lain, penggunaan keramik ini untuk berbagai aplikasi ditentukan oleh karakteristiknya. Berdasarkan permasalahan ini hal ini maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian tentang material keramik piezoelektrik dengan judul "Analisis Struktur Morfologi dan Kristal Material Keramik Piezoelektrik Komersial Untuk Aplikasi Transduser Akustik".

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan topografi dan struktur mikro

permukaan dari tipikal material keramik piezoelektrik komersial yang ada di pasaran; menentukan secara kualitatif unsur-unsur yang terdapat dalam tipikal material keramik piezoelektrik komersial, dan; mengetahui struktur kristal dari tipikal material keramik piezoelektrik komersial.

Untuk mencapai tujuan yang telah ditentukan maka uji yang dilakukan berupa teknik mikroskopi, dan teknik XRD.

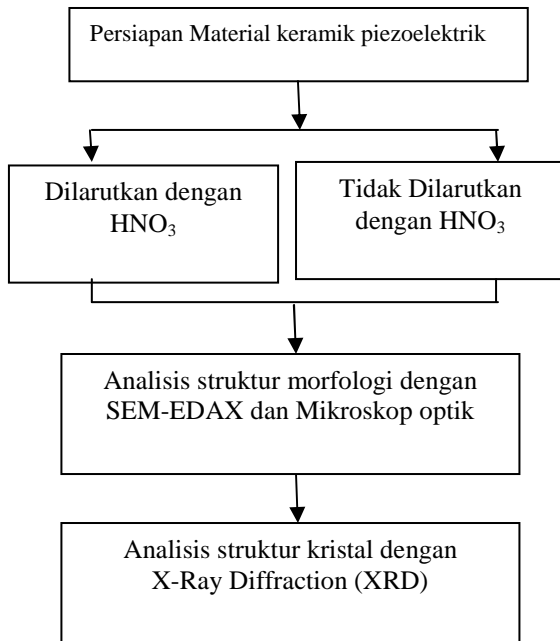
METODE PENELITIAN

Keramik piezoelektrik yang menjadi sampel dalam penelitian ini adalah keramik piezoelektrik yang dijual di pasaran. Sampel ini bisa didapatkan atau diperoleh di Elektronik Jaya Plaza, yang berlokasi di jalan Jenderal Ahmad Yani, Kosambi Bandung. Konstruksi sampel terdiri dari tiga bagian yaitu bagian lapisan konduktif, keramik, dan substrat logam kuningan.

Sampel yang diteliti diberi dua perlakuan yaitu sampel dimasukan kedalam larutan HNO_3 pekat untuk melepaskan lapisan konduktif dari material keramik piezoelektrik (dengan perlakuan asam), dan sampel tanpa perlakuan asam. Diameter sampel yang digunakan terdiri dari dua macam yaitu berdiameter 4 dan 2,2 cm.

Struktur morfologi sampel dianalisis menggunakan mikroskop optik untuk mempelajari topografi permukaan material keramik piezoelektrik, dan analisis menggunakan mikroskop elektron yaitu *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui struktur mikro material keramik piezoelektrik, analisis energi dispersif sinar-X (EDAX) dipakai untuk menganalisis unsur material keramik piezoelektrik, analisa difraksi sinar-X untuk mengetahui struktur kristal material keramik piezoelektrik.

Diagram alir pada Gambar 1 memperlihatkan proses penelitian yang dilakukan, mulai dari persiapan sampel hingga uji yang dilakukan.

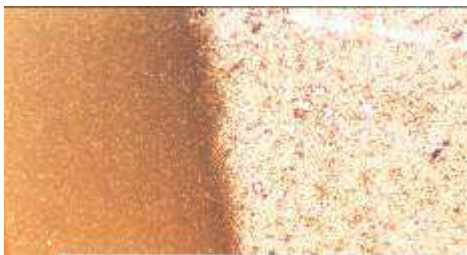


Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Struktur Morfologi

Bentuk topografi permukaan sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm tanpa perlakuan asam diperoleh melalui pengambilan citra mikroskop optik. Bentuk mikrograf diambil pada perbesaran 5X seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Mikrograf sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm tanpa perlakuan asam dengan perbesaran 5X.

Pada Gambar 2 terlihat interlayer yang jelas antara bagian keramik sebelah kiri dengan bagian lapisan konduktif sebelah kanan. Bagian keramik memiliki butiran permukaan yang lebih halus dibanding lapisan konduktif. Sedangkan

mikrograf pada perbesaran 100X diperlihatkan oleh Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Mikrograf sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm tanpa perlakuan asam dengan perbesaran 100X.

Gambar 3 juga memperlihatkan interlayer antara bagian keramik sebelah kiri dengan bagian lapisan konduktif sebelah kanan seperti hasil mikrograf pada perbesaran 5X. Butiran keramik memiliki ukuran sangat halus dan hampir tidak kelihatan. Sedangkan lapisan konduktif memiliki bentuk butiran permukaan-cembung atau berbentuk gelembung air.



Gambar 4. Mikrograf sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm dengan perlakuan asam pada perbesaran 5X.

Melalui cara yang sama, pengambilan citra mikroskop optik juga dilakukan untuk sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm dengan perlakuan asam, dan diperoleh mikrograf pada perbesaran 5X seperti terlihat pada Gambar 4.

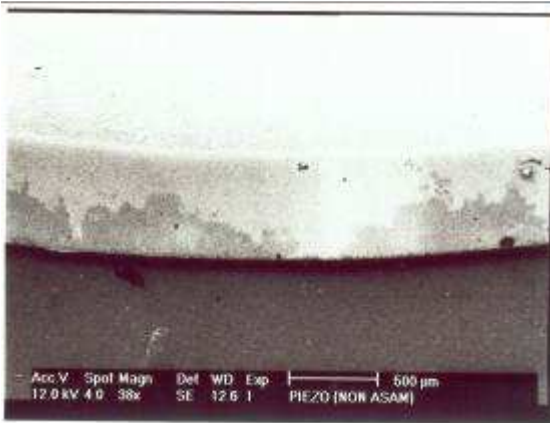
Logam kuning pada bagian kiri Gambar 4 terlihat mengalami korosi akibat

larutan HNO_3 . Sementara itu, bagian keramik disebelah kanan memiliki ukuran butiran yang sangat halus dibandingkan dengan ukuran butiran keramik pada Gambar 2 untuk perbesaran yang sama. Jika citra mikroskop optik diambil pada perbesaran 100X, maka akan terlihat mikrograf seperti Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Mikrograf sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm dengan perlakuan asam pada perbesaran 100X.

Interlayer antara logam kuningan sebelah kanan dengan keramik bagian sebelah kiri terlihat dengan jelas. Ukuran butiran keramik terlihat lebih halus dibandingkan dengan butiran keramik pada Gambar 4.

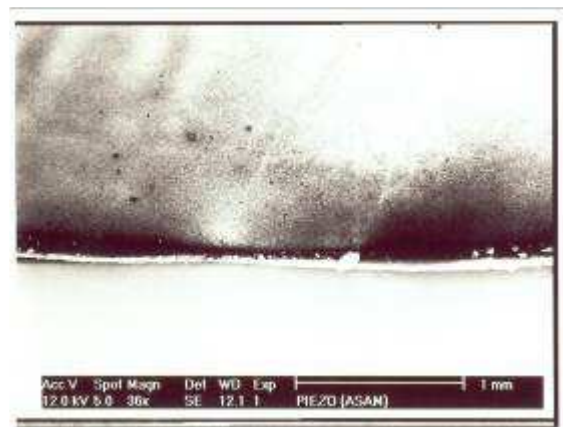


Gambar 6. Foto SEM sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm tanpa perlakuan asam

Sementara itu, struktur mikro dari sampel keramik piezoelektrik diperoleh melalui analisa menggunakan SEM. Hasil SEM untuk sampel keramik berdiameter 4 cm tanpa perlakuan asam diperlihatkan oleh Gambar 6.

Hasil SEM pada Gambar 6 memperlihatkan interlayer ketiga bagian dari sampel dengan jelas. Butiran lapisan konduktif pada bagian teratas dari Gambar 6 tampak lebih kasar dibandingkan dengan butiran keramik pada bagian tengah dan butiran logam kuningan pada bagian bawah.

Analisa yang sama dilakukan terhadap sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm yang diberi perlakuan asam, dan hasil struktur mikro permukaan sampel terlihat seperti pada Gambar 7.

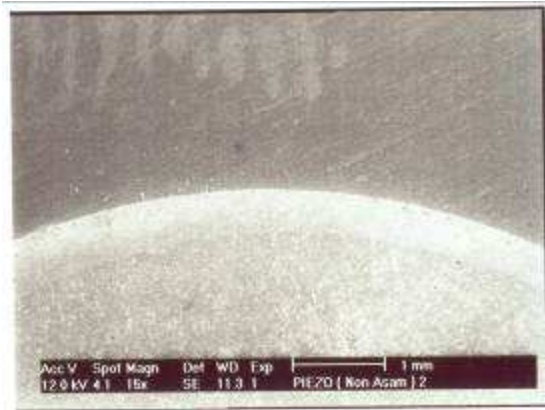


Gambar 7. Foto SEM sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm dengan perlakuan asam

Keramik pada bagian atas yang diperlihatkan oleh Gambar 7 dengan logam kuningan pada bagian bawah memiliki interlayer yang jelas, sedangkan interlayer dengan lapisan konduktif tidak terlihat lagi. Penyebab hilangnya interlayer dengan lapisan konduktif adalah pemberian asam pada sampel sehingga lapisan konduktif tersebut larut oleh HNO_3 . Ukuran butiran keramik dari sampel yang diberi perlakuan asam ini terlihat lebih halus dibandingkan ukuran butiran keramik untuk sampel yang sama tanpa perlakuan asam pada perbesaran yang sama. Selain itu, hasil SEM yang diperlihatkan oleh Gambar 7 menunjukkan bahwa material keramik dengan perlakuan asam cenderung berpori yang

ditandai dengan warna-warna gelap pada keramik.

Analisa melalui SEM juga dilakukan untuk sampel keramik berdiameter 2,2 cm. Untuk sampel tanpa perlakuan asam, hasil SEM diperlihatkan oleh Gambar 8.

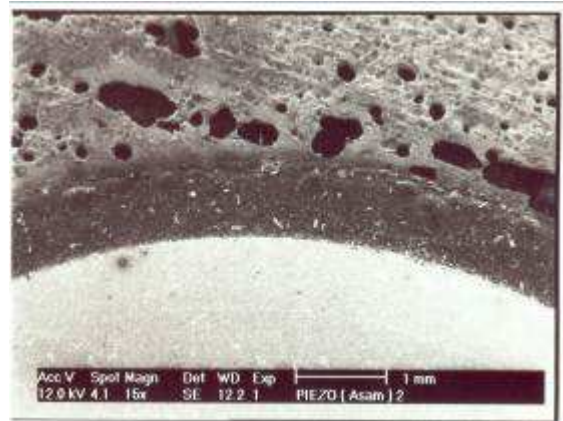


Gambar 8. Foto SEM sampel keramik piezoelektrik berdiameter 2,2 cm tanpa perlakuan asam

Pada sampel berdiameter 2,2 cm tanpa perlakuan asam juga terlihat interlayer dari ketiga bagian. Ukuran butiran keramik pada bagian tengah terlihat lebih halus dibandingkan dengan butiran lapisan konduktif pada bagian bawah dan butiran logam seng pada bagian atas Gambar 8.

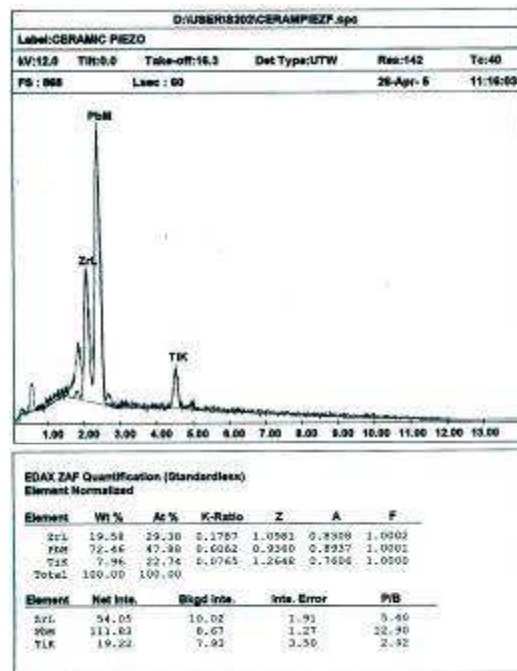
Perlakuan asam pada sampel keramik piezoelektrik berdiameter 2,2 cm memberikan bentuk struktur mikro permukaan sampelperserti terlihat pada Gambar 9.

Interlayer antara bagian keramik bagian bawah dari Gambar 9 dengan logam seng bagian atas juga terlihat jelas, sedangkan interlayer dengan lapisan konduktif bisa dikatakan tidak terlihat lagi, karena lapisan konduktif sudah larut oleh HNO₃. Ukuran butiran keramik sampel dengan perlakuan asam ini juga terlihat lebih halus dibandingkan butiran keramik tanpa perlakuan asam untuk perbesaran yang sama.



Gambar 9. Foto SEM sampel keramik piezoelektrik berdiameter 2,2 cm dengan perlakuan asam

Analisis melalui EDAX dilakukan untuk menentukan unsur-unsur yang terkandung dalam sampel keramik piezoelektrik. Hasil EDAX untuk sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm yang diberi perlakuan asam diperlihatkan oleh Gambar 10 berikut.

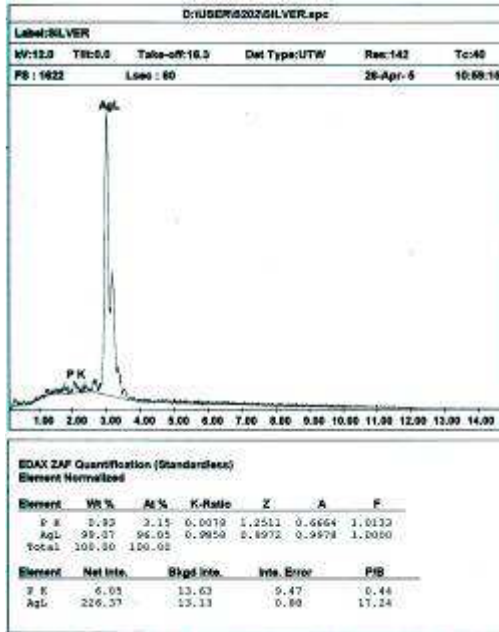


Gambar 10. Hasil EDAX sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm dengan perlakuan asam

Berdasarkan grafik yang diperlihatkan Gambar 10, sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm dengan perlakuan asam tersusun dari unsur-unsur Zr,

Pb, Ti dengan persentase berat secara berturut-turut 19,58, 72,46, dan 7,96%.

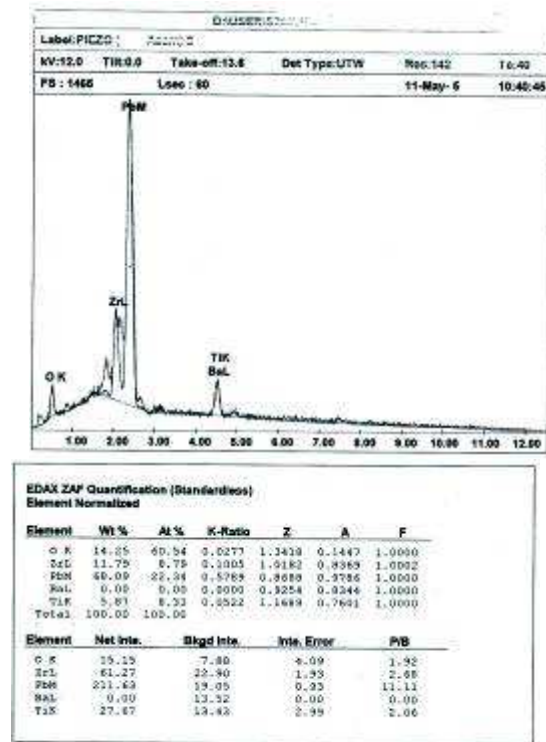
Sementara itu hasil EDAX untuk sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm sebelum diberi perlakuan asam diperlihatkan oleh Gambar 11.



Gambar 11. Hasil EDAX sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm tanpa perlakuan asam

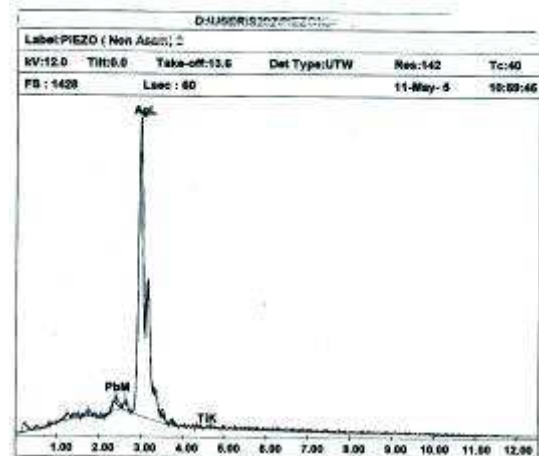
Gambar 11 memperlihatkan hasil EDAX keramik piezoelektrik untuk diameter 4 cm. Sampel masih dilapisi lapisan konduktif (belum diberi perlakuan asam). Grafik yang diperoleh menunjukkan bahwa unsur penyusun lapisan konduktif dari keramik piezoelektrik adalah unsur perak (Ag) dengan persentase berat 99,07%.

Analisis EDAX juga dilakukan terhadap sampel keramik piezoelektrik berdiameter 2,2 cm. Hasil yang diperoleh untuk sampel ini dengan perlakuan asam diperlihatkan Gambar 12. Berdasarkan grafik yang ditampilkan, unsur-unsur penyusun dari sampel adalah Zr, Pb, dan Ti dengan persentase berat secara berturut-turut 11,79, 68,09, dan 5,87%.



Gambar 12. Hasil EDAX sampel keramik piezoelektrik berdiameter 2,2 cm dengan perlakuan asam

Analisa yang sama juga dilakukan terhadap sampel keramik piezoelektrik berdiameter 2,2 cm tanpa perlakuan asam, dan diperoleh hasil seperti Gambar 13. Hasil EDAX terhadap keramik piezoelektrik yang masih dilapisi lapisan konduktif (belum diberi perlakuan asam) pada Gambar 12 ini juga menunjukkan bahwa unsur penyusun dari lapisan konduktif keramik piezoelektrik adalah unsur perak (Ag) dengan persentase berat 96,64%.



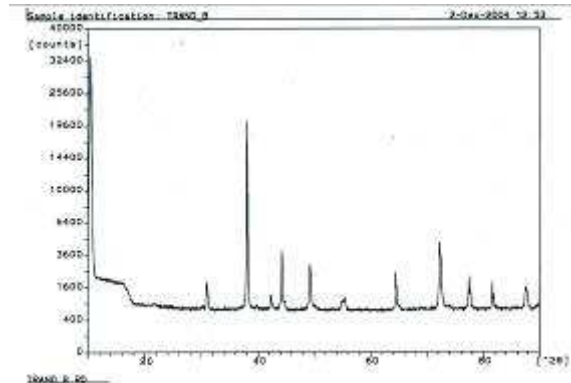
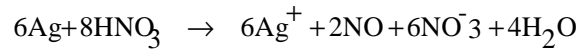
EDAX ZAF Quantification (Standardless)						
Element Normalized						
Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
PbM	3.36	1.78	0.0311	0.3760	1.0563	1.0004
AgL	96.64	98.22	0.3497	1.0033	0.3789	1.0000
TiK	0.00	0.00	0.0000	1.1632	0.7072	1.0000
Total	100.00	100.00				
Element	Net Ints.	Bgnd Ints.	Ints. Error	P/PB		
PbM	6.30	18.47	10.20	0.34		
AgL	203.25	15.70	0.34	12.95		
TiK	0.00	7.03	0.00	0.00		

Gambar 13. Hasil EDAX sampel keramik piezoelektrik berdiameter 2,2 cm tanpa perlakuan asam

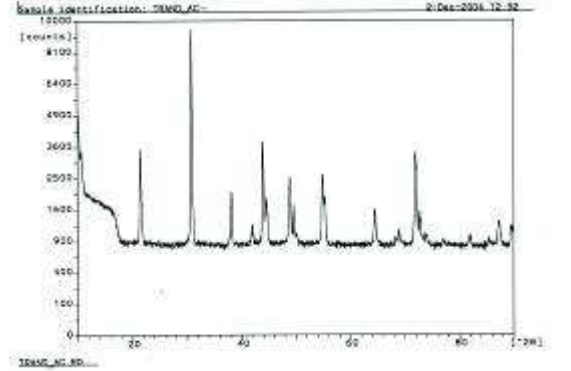
Difraksi sinar-X dilakukan untuk mengetahui jenis fasa yang terbentuk pada sampel keramik piezoelektrik. Difraksi sinar-X dilakukan terhadap dua macam sampel keramik piezoelektrik yaitu sampel tanpa perlakuan asam dan sampel dengan perlakuan asam. Berdasarkan hasil difraksi sinar-X yang diperlihatkan Gambar 14 dapat dinyatakan bahwa sampel keramik piezoelektrik tanpa perlakuan asam terdiri dari dua fasa yaitu fasa perak (Ag) dan fasa $[Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3]$ (PZT). Setiap sudut 2θ fasa Ag memberikan puncak yang tinggi dan tajam, sedangkan fasa PZT memberikan puncak yang lebih lebar dan pendek.

Sedangkan hasil difraksi sinar-X untuk sampel keramik piezoelektrik dengan perlakuan asam diperlihatkan Gambar 15.

Untuk sampel keramik piezoelektrik dengan perlakuan asam, puncak grafik untuk PZT-nya lebih tinggi dan lebih tajam (lebih kristalin) dibandingkan dengan puncak PZT untuk sampel tanpa perlakuan asam. Hal ini disebabkan oleh fasa Ag pada sampel keramik piezoelektrik dengan perlakuan asam sudah larut oleh asam kuat HNO_3 dengan reaksi sebagai berikut:



Gambar 14. Hasil difraksi sinar-X untuk sampel keramik piezoelektrik tanpa perlakuan asam



Gambar 15. Hasil difraksi sinar-X untuk sampel keramik piezoelektrik dengan perlakuan asam.

PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis citra mikroskop optik pada perbesaran 5X dan 100X untuk sampel keramik piezoelektrik berdiameter 4 cm dengan perlakuan asam dan tanpa perlakuan asam, dapat dijelaskan bahwa sampel tanpa perlakuan asam memiliki inter layer yang jelas antara bagian keramik, lapisan konduktif dan logam kuningan. Dari segi ukuran butiran, bagian keramik sampel tanpa perlakuan asam memiliki ukuran butiran lebih halus dibandingkan ukuran butiran lapisan konduktif. Hal ini diperkuat oleh data mikrograf pada perbesaran 100X. Sementara itu, hasil mikrograf pada perbesaran yang sama menunjukkan ukuran butiran keramik piezoelektrik dengan perlakuan asam lebih halus dibandingkan

ukuran butiran keramik sampel tanpa perlakuan asam. Perbedaan ini terjadi akibat pengaruh proses pengasaman sampel menggunakan larutan HNO_3 .

Data yang diperoleh menggunakan SEM memperlihatkan hasil yang sama dengan citra mikroskop optik. Keduanya adanya inter layer yang jelas antara bagian keramik, bagian lapisan konduktif, dan logam kuningan/seng. Kemudian juga memperlihatkan bentuk butiran bagian keramik lebih halus dibandingkan dengan butiran lapisan konduktif. Disisi lain, pemberian asam pada sampel keramik piezoelektrik menyebabkan lapisan konduktif terdegradasi dan butiran-butirannya tampak menjadi lebih halus. Jadi dapat disimpulkan bahwa hasil SEM yang memiliki ketelitian lebih tinggi menunjukkan hasil yang sama dengan hasil citra mikroskop optik.

Setelah mengetahui topografi dan struktur mikro sampel keramik piezo elektrik, maka perlu diketahui unsur-unsur yang terkandung dalam kedua sampel tersebut. Hasil EDAX menunjukkan unsur-unsur yang terkandung pada bagian keramik kedua sampel adalah Zr, Pb, Ti dengan Pb memiliki persentase yang paling besar. Sedangkan unsur yang dikandung oleh lapisan konduktif sampel piezoelektrik tanpa perlakuan asam adalah unsur perak (Ag).

Hasil EDAX ini diperkuat oleh hasil difraksi sinar-X yang memperlihatkan jenis fasa dari sampel keramik piezoelektrik tanpa perlakuan asam adalah fasa Ag dan fasa PZT [$\text{Pb}(\text{Ti}_x\text{Zr}_{1-x})\text{O}_3$]. Sedangkan sampel dengan perlakuan asam memiliki jenis fasa PZT saja. Dari bentuk puncak yang dihasilkan pada difraksi sinar-X untuk sampel dengan perlakuan asam yaitu lebih tajam dan sempit, maka dapat disimpulkan

bahwa sampel keramik piezoelektrik adalah berbentuk kristalin dengan fasa PZT.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis tentang karakterisasi dan pengukuran sifat mekano elektrik material keramik piezoelektrik yang tersedia dipasaran, khususnya keramik piezoelektrik yang dijual di pusat pertokoan Elektronik Jaya Plaza Bandung dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Keramik memiliki tiga bagian penyusun yaitu bagian substrat logam kuningan atau seng, bagian keramik yang memiliki struktur dengan butiran yang sangat halus, dan bagian lapisan konduktif berupa logam perak.
2. Lapisan konduktif keramik ternyata dapat dibuang hanya menggunakan larutan HNO_3 pekat. Sementara itu, pemberian perlakuan dengan larutan HNO_3 (diasamkan) menyebabkan tampilan butiran keramik dengan ukuran sedikit lebih halus dan cenderung berpori dibandingkan dengan sebelum lapisan konduktifnya dilarutkan dalam larutan HNO_3 .
3. Keramik piezoelektrik komersial baik yang berdiameter 4 maupun 2,2 cm ternyata dibangun dari unsur-unsur Zr, Pb, Ti dengan persentase berat masing-masing secara berturut-turut 19,58, 72,46, dan 7,96% untuk diameter 4 cm, 11,79, 68,09, dan 5,87% untuk diameter 2,2 cm. Data ini diperoleh saat diberi perlakuan asam. Sedangkan lapisan konduktif keramik disusun dari unsur perak (Ag) dengan persentase berat sekitar 99,07% untuk sampel berdiameter 4 cm dan 96,64%. Untuk sampel berdiameter 2,2 cm.
4. Jenis fasa dari keramik piezoelektrik tanpa perlakuan asam adalah fasa Ag

dan fasa PZT [$\text{Pb}(\text{Ti}_x\text{Zr}_{1-x})\text{O}_3$]. Sedangkan sampel keramik piezoelektrik dengan perlakuan asam memiliki jenis fasa PZT saja yang berbentuk kristalin. Hasil ini mendukung hasil EDAX sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- B.Jaffe, W.R., Cook & H. Jaffe (1971), **Piezoelectric Ceramics**, Academic Press, inc, New York.
- Langgevin (1950), **Euvres scientifiques de Paul Langevin**, Centre National de la recherche scientifique.
- W. G. CADY (1964), **Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals**, Dover Publications: New York.
- Phillip, James, R (2000), **Piezoelectric Teknologi Primer**. TechOnline, Bedford, MA
- Birnie III, D., Chiang, Y.T., Kingery, W.D. (1997) **Physical Ceramics**, 1st Ed. John Wiley & Sons, New York.
- Cullity, B.D. (1978), **Elements of X-Ray Diffraction, 2nd Edition.**, Addison-Wesley, Canada.
- Darijanto, T., Subandrio, A.S., Teti, I., Sayoga, R., Nainggolan, F.R. **Teknologi Keramik**, diedit oleh Darijanto, T., Soepriyanto, S., Indrianti, T.
- Dieter, George, E. (1990), **Metalurgi Mekanik**, terjemahan Djaprie, Sriati, Edisi Ketiga, Erlangga.
- Edward, P. Furlani. (2001), **Permanent Magnet and Electromechanical Devices Material, Analysis and Application**, Academic Press, New York.
- Giannelis, Emmanuel. P (1996), "**Piezoelektrik Material**". Cornell University's.
- Hartomo, Anton, J (1992), **Mengenal Keramik Canggih Cerdas dan Biokeramik**. Penerbit Andi Offset, Yogyakarta.
- [Http://www.physics.ohio-state.edu/~aulbur/dft.html](http://www.physics.ohio-state.edu/~aulbur/dft.html), *Density Functional Theory*, Thermogon, Inc
- Ivan. (2004), **What is a Piezoelectric transducer?**, Soluzioni Technologiche.
- Jordan, T.L (2001), **Piezoelectric Ceramics Characterization**. ICA SE, NASA, Virginia.
- Kingery. W.D, Bowen, H.K. Uhlmann, D.R. (1976), **Introduction to Ceramics, 2nd Ed**, John Wiley & sons. New York.
- Murata, Akira. (2001), **Piezoelectric Ceramic Sensor (Piezotite)**, Murata Manufacturing Co, Ltd.
- Reed, S. James. (1989), **Introduction to The Principles of Ceramic Processing**, John Wiley & Sons.
- Sabilla, J.P (1996), **A guide to Materials Characterization and Chemical Analysis, 2nd edition**, Wiley-VCH, USA. P.1-27, 143-147, 167-174, 261-273.
- Siswo Suwarno, M. (1996), **Scanning Electron Microscopy Sebagai Salah Satu Teknik Pemeriksaan Material**, Seminar on Advances in Materials Research & Development, Bandung.
- Smith, Michael. (2000), **Basic Electronic**, University of Hawaii at Manoa.
- Spanner, Karl. (1996), **Fundamentals of Piezoelectricity and Piezoelectronics**, PI-Polytec Group, Germany.
- Subbarao, E.C. (1972), **Experiments in Materials Science**, McGraw-Hill, New Delhi.
- Sunomo, Drs. (1997), **Instrumentasi: Osiloskop analog Versus Digital**, Elektro Online Indosat Net.
- West, Anthony. R. (1984), **Solid State Chemistry & its Application**, John Wiley & Sons. New York.
- West Anthony R. (1996), **Solid State Chemistry & Its Application**, John Wiley & Sons, Singapore, P.59-69, 102-1

