

PENGARUH WAKTU POSTSINTERING HEAT TREATMENT (PHT) PADA KONDUKTIVITAS IONIK ELEKTROLIT PADAT CALCIA STABILIZED ZIRCONIA (CSZ) YANG MENGANDUNG SILICA (SiO₂) DAN MAGNESIA (MgO)

Herdyka Sulistiardi¹, Dani Gustaman Syarif², Endi Suhendi¹

¹Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Pendidikan Indonesia Jl. Setiabudhi 229, Bandung 40154

²Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jl. Tamansari 71, Bandung 40132
e-mail: Herdykasulistiardi@gmail.com

Diterima: 26-10-2015

Diterima dalam bentuk revisi: 01-03-2016

Disetujui: 07-03-2016

ABSTRAK

PENGARUH WAKTU POSTSINTERING HEAT TREATMENT (PHT) PADA KONDUKTIVITAS IONIK ELEKTROLIT PADAT CALCIA STABILIZED ZIRCONIA (CSZ) YANG MENGANDUNG SILICA (SiO₂) DAN MAGNESIA (MgO). Pengaruh waktu *Postsintering Heat Treatment* (PHT) pada konduktivitas ionik elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO₂ dan MgO telah diteliti. PHT dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan konduktivitas ionik elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO₂ dan MgO. Elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO₂ dan MgO dibuat menggunakan metode *pressing* dengan komposisi CSZ, SiO₂, dan MgO berturut-turut 99 % berat, 0,5 % berat, dan 0,5 % berat. Pelet kemudian disinter pada suhu 1450 °C selama 4 jam dan PHT pada suhu 1350 °C dengan variasi waktu 0 jam, 4 jam, dan 8 jam. Analisis struktur kristal menunjukkan bahwa pelet yang telah dibuat membentuk kristal kubik dan tidak terpengaruh PHT. Analisis densitas menunjukkan bahwa terjadi peningkatan densitas seiring peningkatan waktu PHT tetapi peningkatan tersebut tidak begitu signifikan. Analisis struktur mikro menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan ukuran butir yang signifikan seiring peningkatan waktu PHT, namun terjadi perubahan distribusi pori. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa seiring peningkatan waktu PHT terjadi pula peningkatan konduktivitas ionik elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO₂ dan MgO.

Kata kunci: SOFC, elektrolit padat, CSZ, PHT, konduktivitas Ionik.

ABSTRACT

EFFECT OF POSTSINTERING HEAT TREATMENT (PHT) TIME ON IONIC CONDUCTIVITY OF CALCIA STABILIZED ZIRCONIA (CSZ) SOLID ELECTROLYTE CONTAIN SILICA (SiO₂) AND MAGNESIA (MgO). Effect of *Postsintering Heat Treatment* (PHT) time on ionic conductivity of CSZ solid electrolyte contain SiO₂ and MgO has been studied. The purpose of PHT is enhancement ionic conductivity of CSZ solid electrolyte containing SiO₂ and MgO. The CSZ solid electrolyte containing SiO₂ and MgO has been made by pressing method with composition of CSZ, SiO₂, and MgO were 99 wt.%, 0,5 wt.%, and 0,5 wt.%, respectively. Later, the pellet were sintered at 1450 °C for 3 hours and PHT at 1350 °C with variation of PHT time of 0 hours, 4 hours, and 8 hours. Crystal structure analysis showed that pellet formed cubic crystal and there is no PHT effect. Density analysis showed that the density increased along with increased PHT time although the increased not significant. Micro structure analysis showed that there is no significant grains size difference along with increased PHT time, but increased PHT time has changed pore distribution. Based on researched which has done it was known that increased PHT time can increase ionic conductivity of CSZ solid electrolyte containing SiO₂ and MgO.

Keywords: SOFC, solid electrolyte, CSZ, PHT, ionic conductivity.

1. PENDAHULUAN

Setiap tahun terjadi peningkatan kebutuhan energi. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan permintaan energi sampai 2050 yang diperkirakan akan terus meningkat sekitar 1,5 sampai 3 kali lipat (1). Salah satu cara pemenuhan energi tersebut dengan cara pengembangan *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC). Secara umum SOFC memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan energi konvensional, diantaranya efisiensinya sekitar 60 %, polusi udara rendah, polusi suara rendah, dan desainnya fleksibel sesuai kebutuhan (2).

SOFC adalah salah satu jenis *fuel cell* yang menggunakan keramik sebagai bahan elektrolitnya. SOFC konvensional beroperasi pada suhu tinggi sekitar 1000 °C (3-4). Bagian yang paling penting dalam SOFC adalah elektrolit padatnya karena menentukan efisiensi dan suhu operasi. Bahan yang dapat digunakan sebagai elektrolit padat SOFC adalah *Calcium Stabilized Zirconia* (CSZ). CSZ telah diteliti sebagai elektrolit padat SOFC (5) dan memiliki konduktivitas ionik yang relatif tinggi (6). Harga *Calcium* (CaO) yang relatif lebih murah (7) dan ketersediaan yang lebih melimpah terutama di Indonesia (8) membuat CSZ menarik untuk dikembangkan lebih lanjut.

Zirconia (ZrO₂) sebagai bahan utama pembuat CSZ dapat dibuat dari pasir Zirkon (ZrSiO₄), namun proses ekstraksi ZrO₂ dari bahan alam seperti pasir Zirkon tersebut selalu menghasilkan ZrO₂ dengan ketidakmurnian berupa *Silica* (SiO₂). Telah diketahui bahwa keberadaan SiO₂ pada ZrO₂ mengurangi konduktivitas ioniknya (9).

Menghilangkan atau mengurangi efek SiO₂ pada konduktivitas ionik CSZ dapat menggunakan metode *scavenging* dan perlakuan panas. Bahan yang dapat digunakan sebagai *scavenger* adalah *Magnesia* (MgO) karena telah diketahui pada (10) bahwa penambahan MgO pada *Gadolinium Doped Ceria* (GDC) yang mengandung SiO₂ dapat meningkatkan konduktivitas ioniknya sedangkan perlakuan panas yang diberikan adalah *Postsintering Heat Treatment* (PHT). PHT adalah perlakuan panas yang diberikan setelah proses sintering. PHT telah diketahui mampu meningkatkan konduktivitas ionik pada CSZ (11).

2. TATA KERJA

Pembuatan pelet elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO₂ dan MgO menggunakan metode *pressing-sintering*. Serbuk CSZ, SiO₂, dan MgO dicampur dengan komposisi CSZ, SiO₂, dan MgO berturut-turut sebesar 99 % berat, 0,5 % berat, dan 0,5 % berat. Setelah dicampur serbuk digerus selama satu jam, lalu dikompaksi dengan tekanan 50 kg/cm² dan diameter 0,8 cm. Kemudian pelet disinter pada suhu 1450 °C selama 3 jam. PHT dilakukan pada suhu 1350 °C dengan variasi waktu, yaitu: 0 jam, 4 jam, dan 8 jam. Karakterisasi dilakukan menggunakan X-Ray Diffractometer (XRD) untuk meng-analisis struktur kristal, pengukuran geometri pelet untuk menghitung densitas, *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk meng-analisis struktur mikro, dan pengukuran impedansi menggunakan LCR meter untuk menghitung konduktivitas ionik. Pengukuran impedansi dilakukan

pada rentang frekuensi 20 Hz sampai 50 MHz dengan suhu pengukuran 500°C .

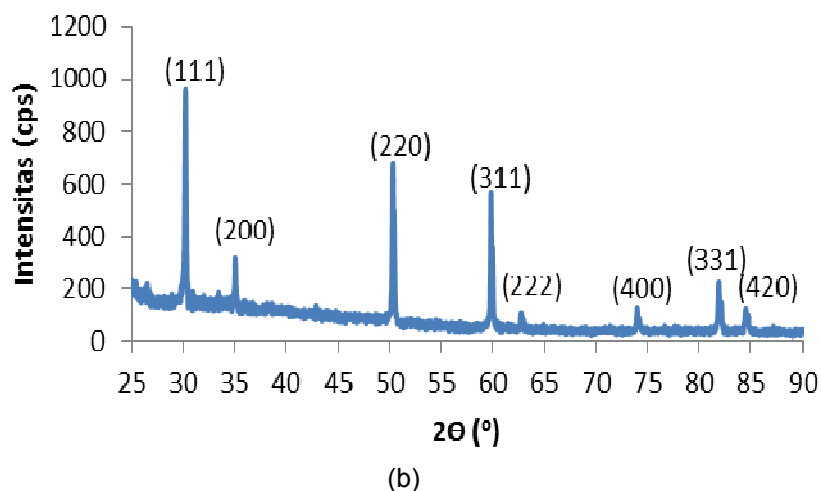
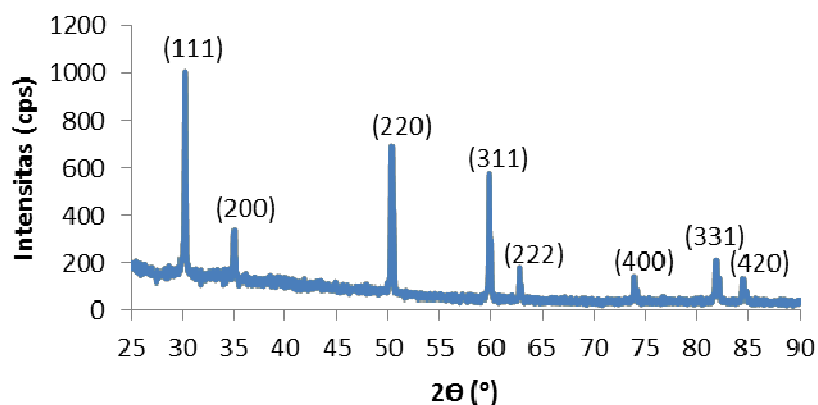
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Struktur Kristal

Struktur kristal elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dapat diketahui melalui karakterisasi menggunakan alat XRD. Pola difraksi sinar-X elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO ditunjukkan oleh Gambar 1.

Berdasarkan Gambar 1.(a) dan 1.(b) didapatkan grafik pola difraksi sinar-X puncak intensitas terhadap sudut difraksi

(2θ) yang hampir sama, yaitu pola difraksi CSZ. Hal ini menunjukkan bahwa fase SiO_2 dan MgO tidak muncul lagi. Kemungkinan MgO sudah larut dalam CSZ sedangkan SiO_2 tidak muncul atau tidak terlihat karena konsentrasinya kecil. PHT yang dilakukan tidak berpengaruh terhadap struktur kristal CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO . Terdapat 8 puncak pada Gambar 1.(a) dan 1.(b) dengan nilai 2θ masing-masing sebesar: $30,195^\circ$, $34,995^\circ$, $50,335^\circ$, $59,835^\circ$, $62,805^\circ$, $73,035^\circ$, $81,855^\circ$, $84,495^\circ$, dan $30,225^\circ$, $35,025^\circ$, $50,355^\circ$, $59,835^\circ$, $62,745^\circ$, $73,965^\circ$, $81,885^\circ$, $84,525^\circ$.



Gambar 1. Pola difraksi sinar-X CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO . (a) PHT 0 jam dan (b) PHT 8 jam.

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan didapatkan orientasi bidang (hkl)

untuk elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dengan waktu PSHT 0 jam dan 8 jam adalah (111), (200), (220), (311), (222), (400), (331), dan (420). Data hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan data sudut difraksi dan orientasi bidang *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS) untuk bahan CSZ ternyata diperoleh nilai yang hampir sama atau mendekati antara data hasil perhitungan dengan data JCPDS. Berdasarkan orientasi bidang yang diperoleh diketahui bahwa elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dengan waktu PHT 0 jam dan 8 jam memiliki struktur kristal CSZ kubik dengan jenis *Face Centered Cubic* (FCC).

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan didapatkan nilai parameter kisi elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dengan waktu PHT 0 jam dan 8 jam sebesar 5,130 Å dan 5,122 Å. Parameter kisi dengan waktu PHT 0 jam dan 8 jam memiliki nilai yang hampir sama atau mendekati yang menunjukkan bahwa penambahan SiO_2 dan MgO serta PSHT yang dilakukan tidak berpengaruh terhadap parameter kisi. Hasil ini didukung oleh data jari-jari ion Zr^{4+} yang memiliki nilai sama dengan jari-jari ion Mg^{2+} . Data jari-jari ion ditunjukkan oleh Tabel 1. Untuk SiO_2 kemungkinan tersegregasi pada batas butir sehingga tidak berpengaruh pula pada parameter kisi. Selain itu, konsentrasi SiO_2 dan MgO yang sedikit menjadi penyebab tidak adanya pengaruh terhadap struktur kristal elektrolit padat CSZ. PHT yang dilakukan kemungkinan hanya mengubah

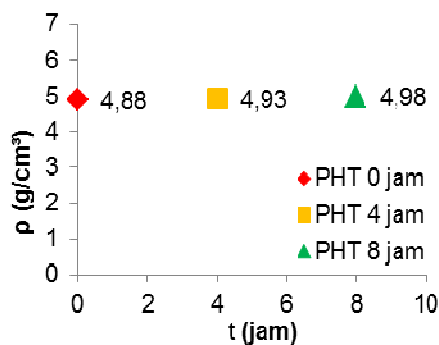
distribusi SiO_2 dan MgO pada elektrolit padat CSZ namun tidak merubah struktur kristalnya.

Tabel 1. Jari-jari ion (4).

No.	Ion	Jari-jari (pm)
1.	Zr^{4+}	86
2.	Mg^{2+}	86

3.2 Densitas dan Struktur Mikro

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan didapatkan nilai densitas elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dengan waktu PHT 0 jam, 4 jam, dan 8 jam berturut-turut sebesar 4,9 g/cm³, 4,93 g/cm³, dan 4,97 g/cm³. Terjadi peningkatan pada densitas seiring peningkatan lama waktu PHT walaupun peningkatan densitas tersebut tidak begitu signifikan. Hal ini menunjukkan tidak terjadi *densification* (pemadatan) yang signifikan. Tidak terjadinya *densification* yang signifikan kemungkinan disebabkan suhu PHT kurang tinggi atau *densification* sudah optimum pada saat *sintering*. Grafik densitas terhadap waktu PHT ditunjukkan oleh Gambar 2.

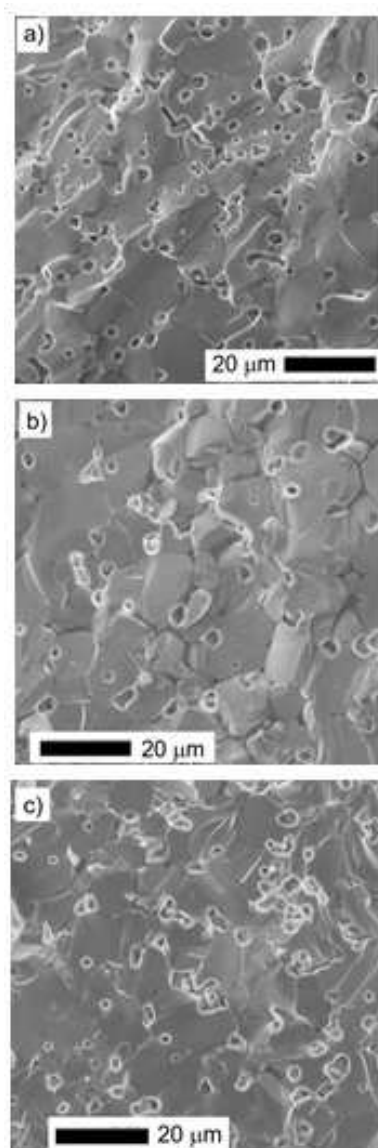


Gambar 2. Grafik densitas terhadap waktu PHT.

Struktur mikro elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dapat

dikarakterisasi menggunakan SEM. SEM dilakukan terhadap elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dengan waktu PHT 0 jam, PHT 4 jam, dan PHT 8 jam.

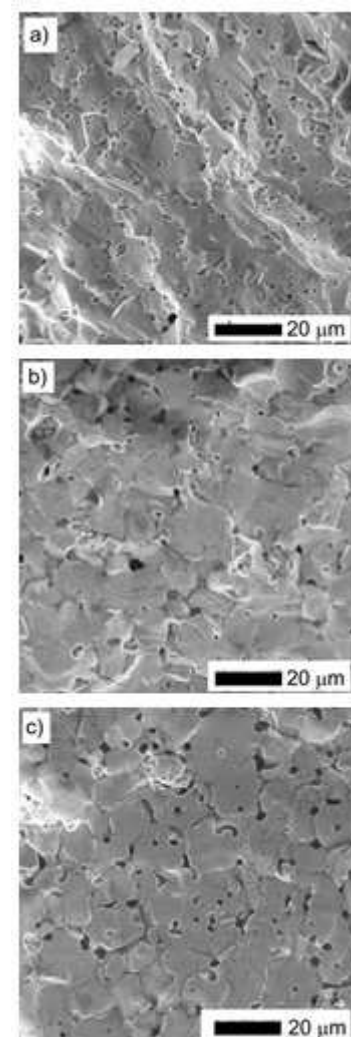
Hasil SEM yang telah dilakukan ditunjukkan oleh Gambar 3. dan Gambar 4.



Gambar 3. Struktur mikro CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dengan perbesaran 1000x. (a) PHT 0 jam, (b) PHT 4 jam, dan (c) PHT 8 jam.

Berdasarkan Gambar 3.(a), (b), (c) dan 4.(a), (b), (c) secara kualitatif perbedaan

ukuran butir nampak tidak terlalu jauh berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa lama waktu PHT berpengaruh sedikit saja pada pertumbuhan butir.



Gambar 4. Struktur mikro CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dengan perbesaran 800x. (a) PHT 0 jam, (b) PHT 4 jam, dan (c) PHT 8 jam.

Hasil ini didukung dengan nilai peningkatan densitas yang tidak begitu signifikan. Kesesuaian tersebut semakin memperkuat bahwa tidak terjadinya *densification* yang signifikan pada elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO . Namun, terjadi fenomena yang lain, yakni: pergerakan pori dari *intragranular*

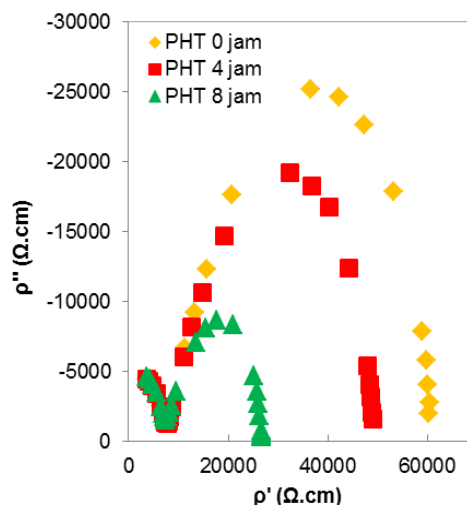
(dalam butir) ke *intergranular* (antar butir atau batas butir) atau titik pertemuan antara tiga butir. Fenomena tersebut menyebabkan terjadinya perubahan ukuran, jumlah, dan distribusi pori. Seiring peningkatan lama waktu PHT ukuran pori semakin besar, jumlah pori semakin sedikit, dan distribusi pori lebih terkonsentrasi karena terjadi pergerakan dan penggabungan pori-pori kecil dari *intragranular* ke *intergranular* atau titik pertemuan antara tiga butir membentuk pori yang lebih besar.

Hal ini kemungkinan terjadi karena adanya pengaturan kembali ion-ion pada elektrolit padat akibat dari energi panas yang diberikan pada proses PHT dan lama waktu PHT. Terjadinya pengaturan kembali tersebut dapat menggeser pori dari *intragranular* ke *intergranular* atau seolah-olah pori bergerak dari *intragranular* ke *intergranular*.

3.3 Sifat Listrik

Karakteristik listrik elektrolit padat ditunjukkan oleh resistivitas dan konduktivitas ioniknya. Kedua besaran tersebut saling terkait karena memiliki hubungan saling berbanding terbalik. Grafik Nyquist resistivitas imajiner (ρ'') terhadap resistivitas real (ρ') elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dengan waktu PHT 0 jam, 4 jam, dan 8 jam ditunjukkan oleh Gambar 5.

Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa grafik berupa dua kurva setengah lingkaran. Kurva setengah lingkaran sebelah kiri menunjukkan resistivitas butir sedangkan kurva setengah lingkaran sebelah kanan menunjukkan resistivitas batas butir.



Gambar 5. Grafik resistivitas imajiner (ρ'') terhadap resistivitas real (ρ') elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO (suhu pengukuran 500°C). (a) PHT 0 jam, (b) PHT 4 jam, dan (c) PHT 8 jam.

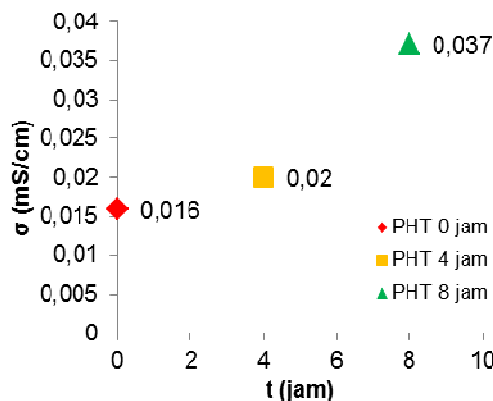
Terlihat pada grafik terjadi penurunan resistivitas batas butir seiring bertambahnya waktu PHT sementara resistivitas butir relatif sama.

Tabel 2. Hubungan waktu PHT, densitas, resistivitas total, dan konduktivitas ionik.

No	Waktu PHT (jam)	Densitas (g/cm^3)	ρ ($\Omega\cdot\text{cm}$)	σ (mS/cm)
1.	0	4,89	60879	0,016
2.	4	4,93	49353	0,020
3.	8	4,98	26815	0,037

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan didapatkan nilai konduktivitas ionik untuk elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO dengan waktu PHT 0 jam, 4 jam, dan 8 jam berturut-turut sebesar 0,016 mS/cm, 0,02 mS/cm, dan 0,037 mS/cm. Hubungan waktu PHT, densitas, resistivitas total (ρ), dan konduktivitas ionik (σ) ditunjukkan oleh Tabel 2. Nilai konduktivitas ionik mengalami

peningkatan seiring bertambahnya waktu PHT. Grafik peningkatan konduktivitas ionik elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO₂ dan MgO dengan waktu PHT 0 jam, 4 jam, dan 8 jam ditunjukkan oleh Gambar 6.



Gambar 6. Konduktivitas ionik elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO₂ dan MgO dengan waktu PHT 0 jam, 4 jam, dan 8 jam (suhu pengukuran 500 °C).

Berdasarkan Gambar 6., semakin lama waktu PHT dilakukan maka semakin meningkat pula konduktivitas ioniknya. Peningkatan konduktivitas ionik yang terjadi kemungkinan terjadi karena adanya peningkatan densitas (8) dan perubahan distribusi pori. Gambar 5 menunjukkan bahwa resistivitas batas butir yang mengalami penurunan signifikan. Hal ini menunjukkan distribusi pori sangat berpengaruh pada konduktivitas ionik. Keberadaan pori pada batas butir mengganggu *transport* ion antar butir karena pori berperan sebagai *blocking* (penghambat pergerakan ion). Distribusi pori yang lebih menyebar pada batas butir mengakibatkan *blocking* yang lebih besar daripada distribusi pori yang terkonsentrasi pada titik pertemuan antara tiga butir. Hal ini sesuai dengan SEM yang menunjukkan bahwa semakin

tersebar nya distribusi pori pada batas butir menyebabkan resistivitas batas butir meningkat dan konduktivitas ionik menurun sedangkan semakin terkonsentrasinya pori pada titik pertemuan tiga butir menyebabkan resistivitas batas butir menurun dan konduktivitas ionik meningkat.

Nilai konduktivitas ionik terbesar elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO₂ dan MgO adalah 0,037 mS/cm. Nilai tersebut masih jauh dari konduktivitas ionik elektrolit padat konvensional 8YSZ pada suhu 500 °C sebesar 0,3 mS/cm (4). Hasil ini membuktikan bahwa SiO₂ dengan konsentrasi kecil pada elektrolit padat CSZ sangat besar pengaruhnya dalam menurunkan nilai konduktivitas ionik dan meningkatkan resistivitas terutama pada batas butir. SiO₂. Fase batas butir yang terbentuk pada batas butir akan berperan sebagai *blocking barrier*. *Blocking* yang dihasilkan bergantung pada distribusi SiO₂. Fase batas butir kontinu membentuk lapisan fase batas butir yang mengelilingi butir sehingga terjadi *blocking effect* yang lebih besar pada transport ion oksigen melalui batas butir *blocking effect* fase batas butir diskontinu. Sedangkan fase batas butir diskontinu membentuk lapisan fase batas butir yang terletak pada daerah tertentu atau terkonsentrasi pada titik tertentu pada batas butir sehingga memungkinkan terjadinya transport ion oksigen melalui batas butir lebih banyak atau *blocking effect* yang dihasilkan lebih kecil daripada fase batas butir kontinu.

Berdasarkan analisis SiO₂ pada batas butir dan hasil konduktivitas ionik yang dihasilkan pada penelitian ini maka sebelum

PHT kemungkinan SiO_2 membentuk lapisan fase batas butir yang kontinu sehingga menghambat transport ion oksigen antar butir melewati batas butir karena *blocking effect* yang besar pada batas butir sehingga resistivitas batas butir tinggi dan konduktivitas ioniknya rendah. Setelah dilakukan PHT kemungkinan SiO_2 yang membentuk lapisan fase batas butir kontinu menjadi lapisan fase batas butir diskontinu sehingga terjadi transport ion oksigen antar butir melalui batas butir lebih banyak karena *blocking effect* berkurang sehingga terjadi penurunan nilai resistivitas batas butir dan peningkatan konduktivitas ionik. Hal ini mungkin terjadi akibat energi panas yang diberikan pada proses PHT dan lamanya waktu PHT memberi kesempatan untuk mengatur kembali distribusi SiO_2 pada batas butir. Seiring peningkatan waktu PHT semakin diskontinu pula lapisan fase batas butir yang terbentuk. PHT yang dilakukan pada elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO berhasil meningkatkan konduktivitas ionik dan mengurangi efek buruk SiO_2 namun masih belum optimal untuk mencapai standar konduktivitas ionik elektrolit padat yang bagus.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa peningkatan waktu PHT pada elektrolit padat CSZ yang mengandung SiO_2 dan MgO tidak mempengaruhi struktur kristal, sedikit meningkatkan densitas, sedikit mempengaruhi ukuran butir, mengubah distribusi

pori, dan meningkatkan konduktivitas ionik.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Raharjo J, Dedikarni, Ramli WDW. Perkembangan teknologi material pada sel bahan bakar padat suhu operasi menengah. Jurnal Sains Materi Indonesia 2008; 10 (1): 28-34.
2. Indrayaningsih N, Muljadi, Febrianto EY. Studi awal penggabungan antar komponen sel bahan bakar berbasis keramik. Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia 2008; 8 (1): 12-23.
3. Laosiripojana N, Wiyaratnb W, Kiatkittipongc W, Arpornwichanopd A, Soottitantawatd A, Assabumrungratd S. Review on solid oxide fuel cell technology. Engineering Journal 2009; 13 (1): 65-83.
4. Syarif DG, Soepriyanto S, Ismunandar, Korda AA. Effect of LSGM addition on electrical characteristics of 8YSZ ceramics for solid electrolyte. Journal of the Australian Ceramic Society 2013; 4 (2): 52-59.
5. Septawendar E, Purwasasmita BS, Sutardi S. Effect of the hydrolysis catalyst NH_4OH on the preparation of calcia stabilized zirconia with sugar as a masking agent at low temperatures. Journal of the Australian Ceramic Society 2013; 49 (1): 101-108.
6. Kim N, Hsieh C, Huang H, Prinz FB, Stebbins JF. High temperature ^{17}O MAS NMR study of calcia, magnesia, scandia and yttria stabilized zirconia. Solid State Ionics 2007; 178: 1499-1506.
7. Rahmawati F, Prijamboedi B,

- Soepriyanto S, Ismunandar. Doping calcia and yttria into zirconia obtained from by product of tin concentrator to improve its ionic conductivity. Institut Teknologi Bandung Journal Sciences 2011; 43 (1): 9-18.
8. Muslim P, Syarif DG, Setiawan A. Pengaruh penambahan La₂O₃ terhadap konduktivitas ionik CSZ sebagai elektrolit padat. Jurnal Sains Materi Indonesia 2013; 15 (1): 7-11.
9. Drozd E. The Influence of the method of addition of Al₂O₃ to 3YSZ material on its thermal and electrical properties. J. Therm. Anal. Calorim. 2014; 118: 1345-1353.
10. Cho YH, Cho PS, Auchterlonie G, Kim DK, Lee JH, Kim DY, Park HM, Drennan J. Enhancement of grain-boundary conduction in gadolinia-doped ceria by the scavenging of highly resistive siliceous phase. Acta Materialia 2007; 55: 4807–4815.
11. Jung YS, Lee JH, Lee JH, Kim DY. Improvement of grain-boundary conduction in 15 mol % calcia-stabilized zirconia by postsintering heat-treatment. Journal of Electrochemical Society 2003; 150 (10): 49-53.

