



KARAKTERISTIK FISIK DAN KONDUKTIVITAS SPESIFIK BATAS BUTIR DARI ELEKTROLIT PADAT GADOLINIUM CERIA (GC) UNTUK APLIKASI SEL BAHAN BAKAR OKSIDA PADAT TEMPERATUR MENENGAH

Agung Nugroho* dan Syoni Soepriyanto

Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10 Bandung, Indonesia 40132

*E-mail : agung.x6@gmail.com

Masuk tanggal : 07-06-2019, revisi tanggal : 26-07-2020, diterima untuk diterbitkan tanggal 29-07-2020

Abstrak

Pada penelitian ini, serbuk elektrolit padat dengan komposisi $Ce_{0,8}Gd_{0,15}Sm_{0,05}Nd_xO_{1,9}$ dibuat dengan variasi $x = 0; 0,025; 0,05; \text{ dan } 0,075$. Serangkaian percobaan dilakukan untuk menghasilkan elektrolit padat dengan ukuran butir mencapai skala nanometer (nm). Percobaan-percobaan ini diawali dengan preparasi serbuk elektrolit menggunakan metode *sol-gel* dengan prekursor berupa nitrat tanah jarang. Material untuk pengujian dibuat dalam bentuk pelet dengan dimensi 1 cm dengan cara kompaksi dengan gaya 40 kN untuk menghasilkan pelet basah. Selanjutnya, proses *sintering* dilakukan terhadap pelet basah dengan variasi temperatur yaitu 1200, 1300 dan 1400 °C dengan waktu penahanan selama 5 jam. Perubahan dimensi dari pelet sebelum dan sesudah *sintering* diukur untuk menentukan nilai densitas relatif dari setiap pelet. Pengujian EIS (*electronic impedance spectroscopy*) dilakukan pada rentang temperatur 350-600 °C pada selang pengukuran 50 °C dan frekuensi 2 MHz-20 Hz. Data-data impedansi kemudian dimodelkan dan dilakukan simulasi *fitting* dengan bantuan paket program Zview. Beberapa pelet elektrolit hasil *sintering* pun dianalisis dengan menggunakan XRD (*x-ray diffractometer*) dan SEM (*scanning electron microscopy*) untuk mendapatkan karakteristik fisik dari elektrolit padat hasil *sintering*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *sol-gel* telah berhasil membuat elektrolit padat dengan ukuran butir rata-rata sebesar ± 500 nm. Struktur kristal yang dihasilkan dari pelet hasil proses *sintering* berupa *cubic fluorite*. Terakhir, dalam tulisan ini juga dibahas mengenai hubungan struktur mikro hasil sintesis dengan konduktivitas ionik batas butir dari 2 struktur mikro yang berbeda.

Kata Kunci: Gadolinium ceria (GC), elektrolit padatan, sel bahan bakar oksida padat

Abstract

In this study, solid electrolyte powder with a composition of $Ce_{0,8}Gd_{0,15}Sm_{0,05}Nd_xO_{1,9}$ was made with variations of $x = 0; 0.025; 0.05; \text{ and } 0.075$. A series of experiments were carried out to produce solid electrolytes with grain sizes reaching a nanometer scale (nm). These experiments began with electrolyte powder preparation using the sol-gel method with a precursor in rare earth nitrate. The test samples were made in pellets with dimensions of 1 cm by composting with a force of 40 kN to produce wet pellets. Furthermore, the sintering process is carried out on wet pellets with temperature variations of 1200, 1300, and 1400 °C with a holding time of 5 hours. Changes in dimensions of pellets before and after sintering are measured to determine the value of the relative density of each sample. EIS (electrochemical impedance spectroscopy) testing using an impedance analyzer is carried out in a temperature range of 350-600 °C at a measurement interval of 50 °C and a frequency of 2 MHz-20 Hz. Impedance data is then modeled by fitting simulations methods by using the Z-view program package. Some electrolytic pellets synthesized were analyzed using XRD (x-ray diffractometer) and SEM (scanning electron microscopy) to obtain the physical characteristics of the solid electrolyte. The results showed that the sol-gel method had succeeded in making solid electrolytes with an average grain size of ± 500 nm. The crystal structure produced from pellets resulting from the sintering process is cubic fluorite. In the end, this paper will also discuss the relationship between the microstructure of the synthesis results with the boundary ionic conductivity of 2 different microstructures.

Keywords: Gadolinium ceria (GC), solid electrolyte, solid oxide fuel cell

1. PENDAHULUAN

Sumber daya energi alternatif yang dapat menghasilkan listrik dengan efisien dan ekonomis, menjadi topik penting dunia abad ke-21 karena kebutuhan energi dunia yang selalu meningkat. Untuk itu, sel bahan bakar, khususnya sel bahan bakar oksida padat (*solid oxide fuel cell*, SOFC), menjadi nitrat dalam menyediakan energi alternatif. SOFC dapat memproduksi listrik dengan efisiensi yang tinggi >70% tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca. Komponen utama dari devais ini terdiri dari tiga bagian yang semuanya dalam bentuk padatan, yaitu anoda, katoda, dan elektrolit. Diantara ketiganya, elektrolit memainkan peranan penting dalam menentukan kinerja devais ini.

Temperatur operasi yang tinggi (800-1000 °C) yang digunakan untuk mengaktifasi elektrolit padat dalam SOFC, merupakan masalah utama dalam operasional devais elektrokimia ini. Dalam upaya menurunkan temperatur operasi menuju temperatur menengah (450-700 °C), berbagai metode diperlukan mulai dari pencarian elektrolit padat alternatif, modifikasi komposisi, mikrostruktur, hingga pembuatan elektrolit padat lapisan tipis.

YSZ (*yttria stabilized zirconia*) telah dikenal secara luas sebagai sistem elektrolit padat yang digunakan dalam komponen elektrolit dalam berbagai devais elektrokimia, mulai dari sensor, SOFCs, hingga SOECs (*solid oxide electrolyte cells*). Meskipun begitu, pada temperatur yang lebih rendah, konduktivitas ionik elektrolit padat YSZ menurun sehingga belum dapat digunakan untuk aplikasi temperatur menengah.

Elektrolit padat berbasis GC (gadolinium ceria), menjadi kandidat kuat dan berpotensi untuk dijadikan alternatif YSZ untuk mengatasi masalah konduktivitas ionik yang rendah. Melalui penambahan dopan Nd₂O₃ yang memiliki kation dengan ukuran ion yang serupa dengan Ce⁴⁺, Fu dan Chen [1] berhasil membuat NDC (*neodymium doped ceria*) dengan konduktivitas sebesar $4,615 \times 10^{-2}$ S/cm pada 800 °C, dimana telah memenuhi nilai minimum untuk dapat digunakan sebagai komponen elektrolit. Lebih lanjut, modifikasi mikrostruktur dengan melakukan pendekatan metode sintesis sistem elektrolit padat menuju ukuran nano dan pembuatan elektrolit padat dalam bentuk lapisan tipis, dipercaya dapat meningkatkan performa kelistrikan dari sistem elektrolit padat yang digunakan [2]. Pada penelitian ini, akan dibahas pengaruh penambahan variasi dopan Nd³⁺ terhadap karakteristik fisik dan konduktivitas ionik spesifik batas butir dari elektrolit padat

berbasis GC pada serbuk dengan rumus kimia Ce_{0,8}Gd_{0,15}Sm_{0,05}Nd_xO_{1,9}.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

2.1. Preparasi Sampel

Untuk melihat pengaruh dopan Nd³⁺ terhadap karakteristik fisik dan elektrik dari elektrolit padatan GC (gadolinium ceria), serbuk dengan komposisi Ce_{0,8}Gd_{0,15}Sm_{0,05}Nd_xO_{1,9} dibuat dengan teknik *doping* ganda [13] variasi x (at%) = 0; dan *multidoping* [11] dengan variasi x (at%) = 0,025; 0,05; dan 0,075. Sintesis serbuk dilakukan dengan metode *sol-gel* dengan prekursor berasal dari nitrat tanah jarang seperti Ce(NO₃)₃.6H₂O, Gd(NO₃)₃.6H₂O, Sm(NO₃)₃.6H₂O, dan Nd(NO₃)₃.6H₂O. Serbuk kemudian ditimbang secara stoikiometrik sesuai komposisi yang ingin dibuat. Kemudian prekursor dilarutkan dengan aquades dan dicampur dengan asam sitrat sebagai katalis. Larutan selanjutnya dipanaskan pada temperatur 90 °C di atas *hot plate* dengan bantuan *magnetic stirrer* hingga larutan membentuk gel. Setelah itu, gel dikeringkan dalam oven pada temperatur 110 °C selama 24 jam dan kemudian dikalsinasi pada temperatur 600 °C selama 2 jam.

Serbuk hasil kalsinasi selanjutnya dicampur dengan binder PVA (polivinil alkohol) sebanyak 3% berat dan kemudian dikompaksi menggunakan *dies* berdiameter 10 mm dengan beban 40 kN hingga terbentuk pelet silinder. Dimensi pelet diukur dan kemudian pelet dilakukan proses *sintering* di dalam *muffle furnace*. Temperatur *sintering* divariasikan mulai dari 1200, 1300, dan 1400 °C dengan waktu penahanan selama 5 jam. Dimensi dan massa dari masing-masing sampel sebelum *sintering* dan sesudahnya, diukur untuk mendapatkan karakteristik rapat massa dari setiap sampel.

2.2. Karakterisasi Sampel

Pengujian EIS (*electrochemical impedance spectroscopy*) untuk mengetahui karakteristik listrik dari elektrolit padat GC dilakukan menggunakan *impedance analyzer* (Agilent E4980A/AL). Elektroda standar dalam penelitian ini berupa pasta perak yang dibuat dengan metode *screen printing* pada kedua sisi pelet elektrolit padatan. Pasta perak yang sudah terlapis pada permukaan pelet elektrolit, kemudian dipanaskan pada temperatur 600 °C selama 1 jam. Selanjutnya, sampel dihubungkan dengan kawat platina (Pt) dengan bantuan pasta Ag. Kemudian, set sampel dimasukkan ke dalam *vertical tube furnace*. *Interface* yang telah

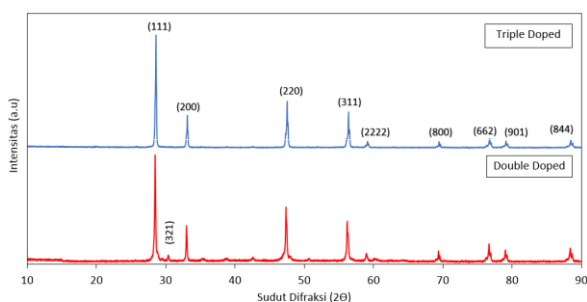
terhubung dengan *impedance analyzer* dihubungkan dengan sampel. Pengujian EIS dilakukan pada rentang temperatur 600 – 350 °C dengan selang pengukuran 50 °C dan pada rentang frekuensi 20 Hz – 2 MHz. Sinyal tegangan AC yang digunakan yaitu 20 mV. Hasil pengujian berupa kurva-kurva bode dan kurva Nyquist. Kedua jenis kurva ini selanjutnya diolah dengan menggunakan perangkat lunak Zview (Scribnerr Associates, USA).

Karakteristik fisik dari pelet elektrolit berbasis GC dilakukan dengan menggunakan SEM-EDX JEOL 6510A (*scanning electron microscope energy dispersive x-ray*) dan XRD Rigaku (*x-ray diffractron*). Karakterisasi ini bertujuan untuk memastikan kehomogenan sampel hasil sintesis, analisis morfologi dan penentuan struktur kristal hasil sintesis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis XRD dan SEM EDS

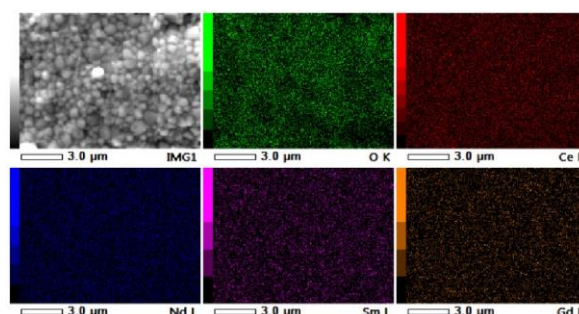
Hasil pengujian XRD (*x-ray diffractron*) dari representasi material hasil rekayasa *doping* dengan teknik *doping* ganda (0% Nd) dan *multidoping* (2,5% Nd), diperlihatkan pada Gambar 1. Gambar 1 memperlihatkan pola difraktogram hasil karakterisasi XRD pada dua buah pelet yang disinter pada temperatur 1300 °C. Dari pola yang dihasilkan, karakteristik puncak difraksi untuk dua pelet GC yang dibuat dengan metode *doping* yang berbeda, memiliki pola yang sama, dengan keempat puncak difraksi tertinggi diwakili oleh bidang (111), (220), (311), dan (200).



Gambar 1. Pola difraksi sinar-x pelet GC *double doped* (0% Nd) dan *multidoped* (2,5% Nd)

Bidang-bidang kristal (111), (220), (311), dan (200), merepresentasikan struktur kristal *cubic fluorite* (JCPDS no. 34-394) yang mengindikasikan bahwa seluruh dopan terlarut dalam kisi ceria (CeO_2) [3], [12]. Larutnya dopan ke dalam kisi ceria menunjukkan bahwa *doping* telah terjadi pada pelet-pelet yang dibuat. Struktur *cubic fluorite* sendiri menjadi syarat utama suatu elektrolit padat dapat digunakan sebagai komponen sel. Kemampuan struktur

kristal *cubic fluorite* yang unik, yakni dapat memberikan pergerakan ion O^{2-} untuk secara bebas berpindah dari satu tempat ke tempat yang lain dalam kisi ceria pada temperatur operasi menengah (450 – 600 °C) [4], membuat struktur kristal ini menjadi superior dibandingkan struktur kristal lain untuk dapat digunakan sebagai elektrolit dalam divais konduktor ion oksida seperti SOFC (*solid oxide fuel cell*) maupun sensor.



Gambar 2. Hasil EDX *mapping* pada pelet GC hasil *sintering* T= 1400 °C

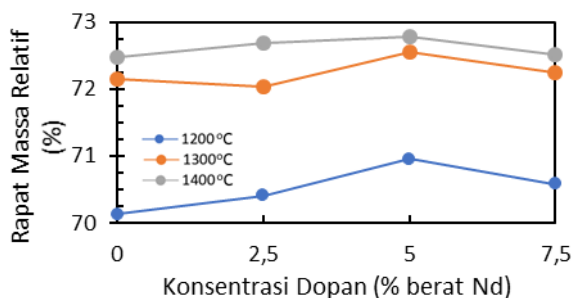
Hasil pengamatan SEM-EDX (*scanning electron microscope energy dispersive x-ray*) diperlihatkan pada Gambar 2. Gambar 2 memperlihatkan hasil pengujian EDX *mapping* dari pelet $\text{Ce}_{0,8}\text{Gd}_{0,15}\text{Sm}_{0,05}\text{Nd}_x\text{O}_{1,9}$ ($x = 0,025$); yang disintesis pada temperatur *sintering* 1400 °C. Dari Gambar ini dapat dilihat bahwa metode sintesis *sol-gel* yang digunakan untuk membuat pelet pada penelitian ini menghasilkan distribusi unsur-unsur dopan yang merata pada seluruh bagian butir maupun batas butir.

3.2. Analisis Rapat Massa dan Struktur Mikro

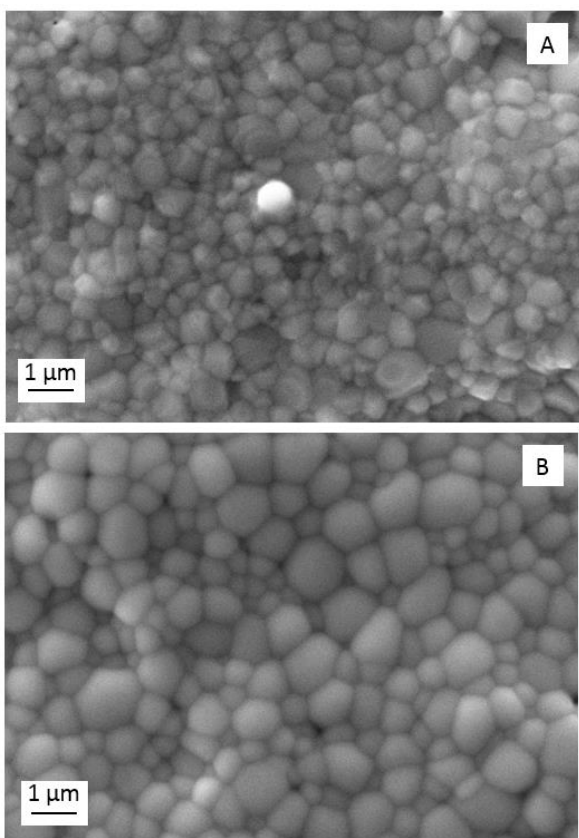
Gambar 3 memperlihatkan hubungan rapat massa relatif dengan konsentrasi dopan dari pelet yang telah dibuat pada rentang temperatur *sintering* 1200-1400 °C dengan waktu tahan selama 5 jam. Pada Gambar 3 terlihat bahwa rapat massa relatif meningkat dengan meningkatnya temperatur *sintering*. Temperatur *sintering* yang tinggi memungkinkan atom-atom dalam material pelet mendapatkan energi yang lebih banyak untuk berdifusi dan membentuk butiran yang lebih rapat. Oleh karenanya, rapat massa relatif material pun meningkat dengan meningkatnya temperatur sinter.

Di samping itu, rapat massa juga dipengaruhi oleh persen penambahan dopan. Dari Gambar 3, rapat massa relatif cenderung meningkat dengan meningkatnya konsentrasi dopan dan mencapai nilai maksimum pada % berat sebanyak 5 % dan selanjutnya menurun. Menurut Masmui, dkk., [5] penurunan rapat

massa relatif ini disebabkan oleh perbedaan parameter kisi antara dopan dalam kisi Ce. Meningkatkan % dopan ke dalam kisi Ce pada titik tertentu, akan mengakibatkan parameter kisi membesar akibat distorsi kisi di dalamnya, sehingga memperlambat pergerakan ion. Rapat massa relatif optimum dari penelitian ini dihasilkan oleh pelet dengan penambahan % berat sebanyak 5% Nd.



Gambar 3. Rapat massa relatif elektrolit padat GdCe dengan berbagai konsentrasi dopan



Gambar 4. Struktur mikro permukaan pelet GC yang dibuat pada temperatur *sintering* 1400 °C yang diproses dengan (A) metode *multidoping* (2,5% Nd) dan (B) *doping* ganda (0% Nd)

Struktur mikro dengan perbesaran 10.000 kali dari representasi pelet GC yang dilakukan *doping* dengan metode *doping* ganda (0% Nd) dan *multidoping* (2,5% Nd), diperlihatkan oleh Gambar 4. Gambar 4 (A) memperlihatkan struktur mikro dari permukaan pelet yang

dilakukan *doping* dengan metode *multidoping*, sementara Gambar 4 (B) dengan metode *doping* ganda. Kedua pelet dibuat pada temperatur *sintering* 1400 °C. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa kedua struktur mikro memiliki struktur yang sangat padat dengan sedikit pori. Kemudian, hasil pengolahan gambar dengan bantuan perangkat lunak *imageJ*, menunjukkan bahwa ukuran butir rata-rata dari pelet GC hasil sintesis dengan metode *multidoping* (2,5% Nd) memiliki ukuran butir yang lebih kecil dibanding hasil sintesis dengan metode *doping* ganda (0% Nd), yaitu 449 nm berbanding 561 nm. Berdasarkan penelitian Priyardharsini, dkk., [6] adanya Nd dalam kisi Ce dapat mereduksi proses aglomerasi, sehingga pengumpulan elemen-elemen dalam wilayah tertentu menjadi berkurang dan menyebabkan pelet dengan %Nd yang lebih tinggi memiliki ukuran butiran yang lebih kecil.

3.3. Hubungan Struktur Mikro dan Karakteristik Spesifik Batas Butir

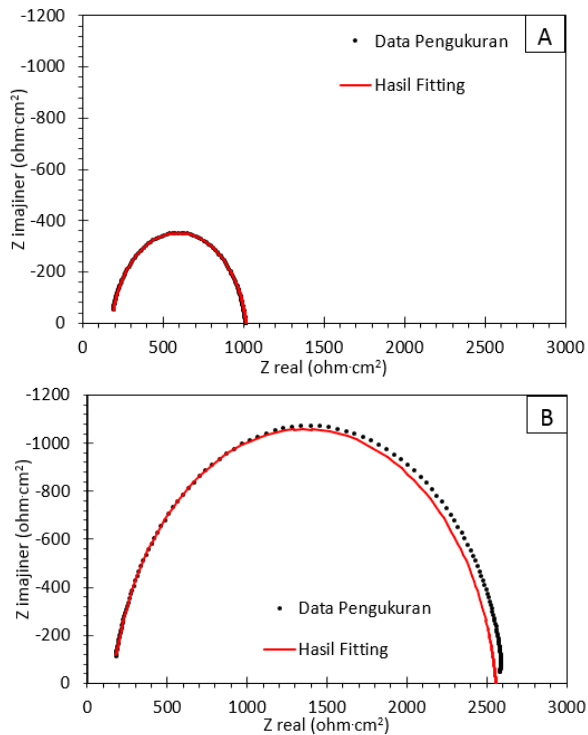
Gambar 5 memperlihatkan representasi kurva-kurva Nyquist dari pelet yang dilakukan *sintering* pada temperatur 1400 °C dengan 2 metode *doping* yang berbeda. Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa kurva Nyquist hasil pengujian EIS (*electrochemical impedance spectroscopy*) pada pelet yang disintesis dengan metode *multidoping* (%Nd > 0%), memiliki diameter yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil pengujian EIS pada pelet hasil sintesis dengan metode *double doping* (tanpa Nd). Dari situ terlihat bahwa ukuran butir yang diperlihatkan pada Gambar 4, sangat mempengaruhi besar spektra impedansi dalam suatu elektrolit padatan yang dibuat.

Perilaku butir dan batas butir dari kedua mikrostruktur pada Gambar 4 dan hubungannya dengan Gambar 5, secara umum dapat dianalogikan dengan *Brick Layer Model*. Berdasarkan *Brick Layer Model*, karakteristik butir dan batas butir dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 [7]-[8],

$$R_{bb}^{sp} = R_{bb} \frac{C_{bb}}{C_b} \quad (1)$$

dimana R_{bb}^{sp} merupakan resistivitas ionik spesifik batas butir, C_b kapasitansi butir, C_{bb} kapasitansi batas butir, dan R_{bb} adalah resistivitas ionik batas butir. Dari Persamaan 1, konduktivitas ionik spesifik (σ_{bb}^{sp}) batas butir yang merepresentasikan perilaku butir dan batas butir dapat dihitung menggunakan hubungan $\sigma_{bb}^{sp} = \frac{1}{R_{bb}^{sp}}$. Untuk

mendapatkan nilai dari kapasitas butir dan batas butir, simulasi dengan program *Zview* menggunakan model rangkaian listrik ekivalen yang terdiri dari rangkaian paralel-seri (R_b/CPE_b)-(R_{bb}/CPE_{bb}) dilakukan terhadap pelet dari mikrostruktur pada Gambar 4 (A) maupun (B).



Gambar 5. Plot Nyquist pelet $Ce_{0,8}Gd_{0,15}Sm_{0,05}Nd_xO_{1,9}$ hasil sintesis dengan (A) metode *multidoping* (2,5% Nd) dan (B) *doping* ganda (0% Nd) pada selang pengukuran $T=350\text{ }^\circ\text{C}$

Tabel 1. Karakteristik listrik butir dan batas butir untuk masing-masing struktur mikro pada Gambar 3

Struktur mikro	A	B
R_b (ohm-cm ²)	159,8	177
CPE_b (nF)	7,201	2,668
R_{bb} (ohm-cm ²)	876,1	2378
CPE_{bb} (nF)	112,76	23,547
D (nm)	449	561
δ (nm)	28,67	63,56
R_{bb}^{sp} (ohm-cm ²)	13718,79	20987,54
σ_{bb}^{sp} ($\times 10^{-5}$ S/cm ²)	7,29	4,76

Tabel 1 memperlihatkan hasil perhitungan tebal batas butir (δ), tahanan spesifik batas butir (R_{bb}^{sp}), dan konduktivitas spesifik batas butir (σ_{bb}^{sp}), yang diekstrak dari hasil simulasi program *Zview*. Dapat dilihat dari tabel tersebut bahwa struktur mikro yang lebih kecil (struktur mikro A pada Gambar 4), menghasilkan nilai tebal batas (δ) butir yang kecil. Hal ini berbanding terbalik terhadap nilai σ_{bb}^{sp} dimana nilai ini mengecil dengan membesarnya rata-rata ukuran butir (D) dan tebal batas butir (δ). Hal serupa ditemui

dalam penelitian Anirban, dkk., [8]-[9], mereka beranggapan bahwa fenomena ini terjadi karena struktur mikro yang lebih besar menyebabkan nilai kapasitansi batas butir mengecil, yang berdampak pada kemampuan *transport* ion yang lebih lambat.

4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, elektrolit padat berbasis GdCe dengan komposisi $Ce_{0,8}Gd_{0,15}Sm_{0,05}Nd_xO_{1,9}$ pada variasi $x = 0; 0,025; 0,05; \text{ dan } 0,075$; telah berhasil dibuat dengan metode sintesis *sol-gel*. Hasil karakterisasi XRD (*x-ray diffraction*) pada elektrolit padat hasil *sintering* memperlihatkan bahwa elektrolit padat yang dibuat memiliki struktur kristal *cubic fluorite* yang mana merupakan syarat utama supaya elektrolit padat dapat digunakan sebagai komponen elektrolit dalam divais SOFC (*solid oxide fuel cell*). Struktur mikro dari elektrolit yang dibuat menunjukkan bahwa rata-rata ukuran butir dari elektrolit padat ini ± 500 nm.

Representasi dari hasil pengujian EIS (*electrochemical impedance spectroscopy*) terhadap material dengan mikrostruktur yang berbeda menunjukkan bahwa material dengan ukuran butir yang lebih halus akan memiliki konduktivitas ionik spesifik batas butir yang lebih tinggi. Meningkatnya nilai konduktivitas batas butir kemudian akan meningkatkan kemampuan *transport* ion dalam elektrolit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Manajer Laboratorium Kimia Anorganik ITB Dr. Bambang Prijamboedi, M.Eng., yang telah memberi izin penggunaan fasilitas penelitian untuk pengujian impedansi menggunakan *impedance analyzer Agilent E4980A/AL*. Penulis juga berterima kasih kepada Ir. Edy Sanwani, M.T., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Metalurgi ITB yang telah memberikan izin penggunaan sarana penelitian di Program Studi Magister Teknik Metalurgi ITB.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. P. Fu dan S. H. Chen, "Preparation and characterization of neodymium-doped ceria electrolyte materials for solid oxide fuel cells," *Ceram. Int.*, vol. 36, no. 2, pp. 483–490, 2010.
- [2] P. C. C. Daza, R. A. M. Meneses, J. L. de Almeida Ferreira, J. A. Araujo, A. C. M. Rodrigues, dan C. R. M. da Silva, "Influence of microstructural characteristics on ionic

- conductivity of ceria based ceramic solid electrolytes," *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 2, pp. 2138–2145, 2018.
- [3] S. Soepriyanto, Y. Aristanti, T. Theresia, M. Sulthon, F. Baqir, W. P. Minwal, dan B. Dilasari, "Comparative effect of REO co-dopant (La, Y, Nd) on ionic conductivity of Gd-doped CeO₂ solid electrolyte for IT-SOFC," *J. Aust. Ceram. Soc.*, vol. 2, pp. 3–7, 2019.
- [4] F. S. da Silva dan T. M. de Souza, "Novel materials for solid oxide fuel cell technologies: A literature review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 41, pp. 26020–26036, 2017.
- [5] Makhsun dan E. Kartini, "Sintesis dan karakterisasi elektrolit padat berbasis gelas lithium (AgI)_{0,33}(LiI)_{0,33}(LiPO₃)_{0,34}," *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 12, no. 1, pp. 59-63, 2010.
- [6] N. Priyadharsini, M. Thamilselvan, S. Sangeetha, dan S. Vairam, "Effect of neodymium substitution on structural, optical, magnetic and antibacterial activity of zinc selenide nanoparticles," *J. Ovonic Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 87–93, 2016.
- [7] J. Wang, A. Du, D. Yang, R. Raj, dan H. Conrad, "Grain boundary resistivity of yttria-stabilized zirconia at 1400 °C," *J. Ceram.*, vol. 2013, pp. 1–4, 2013.
- [8] S. Anirban, P. T. Das, dan A. Dutta, "Effect of divalent cation addition on structure, conductivity and grain boundary properties in La doped ceria oxygen ion conductors," *Ceram. Int.*, vol. 45, no. 5, pp. 5751–5760, 2019.
- [9] S. Kobi, N. Jaiswal, D. Kumar, dan O. Parkash, "Ionic conductivity of Nd³⁺ and Y³⁺ co-doped ceria solid electrolytes for intermediate temperature solid oxide fuel cells," *Journal of Alloys and Compounds*, 658, 513–519, 2016.
- [10] N. W. Kwak, dan W. C. Jung, "Analysis of the grain boundary conductivity of singly and doubly doped CeO₂ thin films at elevated temperature," *Acta Materialia*, vol. 108, pp. 271–278, 2016.
- [11] Y. Liu, L. Fan, Y. Cai, W. Zhang, B. Wang, dan B. Zhu, "Superionic conductivity of Sm³⁺, Pr³⁺, and Nd³⁺ triple-doped ceria through bulk and surface two-step doping approach," *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 9, no. 28, pp. 23614–23623, 2017.
- [12] Y. Liu, Y. Meng, W. Zhang, B. Wang, M. Afzal, C. Xia, dan B. Zhu, "Industrial grade rare-earth triple-doped ceria applied for advanced low-temperature electrolyte layer-free fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 34, pp. 22273–22279, 2017.
- [13] N. Mahato, A. Banerjee, A. Gupta, S. Omar, dan K. Balani, "Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review," *Progress in Materials Science*, vol. 72, pp. 141–337, 2015.
- [14] A. Rafique, R. Raza, N. A. Arifin, M. K. Ullah, A. Ali, dan R. S. Wilckens, "Electrochemical and thermal characterization of doped ceria electrolyte with lanthanum and zirconium," *Ceramics International*, vol. 44, no. 6, pp. 6493–6499, 2018.
- [15] M. A. K. Rauz, M. A. R. Adecka, dan M. R. Ieczysàaw, "Impedance spectroscopy study of electrode-electrolyte system in solid oxide fuel cells," *Materiały Ceramiczne / Ceramic Materials - PTCer*, vol. 3, pp. 157–163, 2011.