

ANALISIS DAN KARAKTERISTIK ELEKTROLIT PADAT La-Gd *DOPED* CeO₂ (LGDC) UNTUK APLIKASI INTERMEDIATE TEMPERATURE SOLID OXIDE FUEL CELL (IT-SOFC)

Syoni Soepriyanto¹, Yesi Aristanti², Thia Theresia^{3*}

^{2,3} Teknik Metalurgi dan Material, Institut Teknologi dan Sains Bandung

¹ Teknik Metalurgi, Institut Teknologi Bandung

email : *thiatheresia@gmail.com

ABSTRAK : SOFC memiliki potensi besar untuk menjadi teknologi yang bersih, efisien, dan fleksibel dalam mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik. Temperatur operasi SOFC yang tinggi (1000 °C) merupakan kekurangan yang menghambat komersialisasi SOFC. Ceria menjadi basis yang berpotensi untuk menjadi material elektrolit padat yang bekerja pada temperatur menengah (400-700 °C). La-Gd *doped* Ceria (LGDC) dibuat dengan variasi persen mol Gd₂O₃ yaitu 0%, 10%, 15%, dan 20%. Preparasi serbuk menggunakan *dry mixing* dan dikompaksi dengan tekanan 40 kN menghasilkan sampel berbentuk *pellet* yang memiliki diameter 0,8 cm. Sampel tersebut kemudian disintering dengan variasi temperatur 1200 °C, 1300 °C, dan 1400 °C serta waktu penahanan 3, 4, dan 5 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur sintering, waktu sintering, dan penambahan persen mol Gd₂O₃ meningkatkan nilai densifikasi dan tertinggi pada sampel dengan komposisi 20% mol Gd₂O₃ dengan temperatur sintering 1400 °C dan waktu sintering 5 jam yaitu sebesar 50,26%. Semakin banyak Gd₂O₃ yang ditambahkan maka nilai konduktivitas ionik juga semakin meningkat. Nilai konduktivitas ionik tertinggi terdapat pada sampel dengan komposisi 20% mol Gd₂O₃ yaitu sebesar 0,0634 S/cm pada temperatur operasi 600 °C. Hubungan antara konduktivitas ionik dengan temperatur dinyatakan dengan nilai energi aktivasi. Sampel dengan konduktivitas ionik tertinggi memiliki nilai energi aktivasi sebesar 0,54 eV.

Kata Kunci : IT-SOFC, elektrolit padat, LGDC, konduktivitas ionik

ABSTRACT : SOFC tech has great potential to be the cleanest, most efficient, and flexible technology for the conversion of chemical to electrical energy. SOFC operating temperature is high (1000 °C) that makes serious deficiency and inhibits commercial scale of SOFC. Ceria-based is a great solid electrolyte materials for Intermediate Temperature (400-700 °C) Solid Oxide Fuel Cell (IT-SOFC). La-Gd doped Ceria (LGDC) which doped 0, 10, 15, 20 mol % Gd₂O₃. Powder preparation was used dry mixing method compacted which a pressure of 40 kN and was produced pellet-shaped samples with a diameter of 0,8 cm. The samples were sintered at 1200 °C, 1300 °C, and 1400 °C for 3, 4, and 5 hours. The results showed that increasing sintering temperature, sintering time, and increase value mol % Gd₂O₃ densification. The highest value in the sample densification with the composition 20 mol % Gd₂O₃ at 1400 °C and sintering time of 5 hours is equal to 50,26%. The more Gd₂O₃ were added, increasing the value of ionic conductivity. The highest ionic conductivity values found in the samples with the composition of 20% mol Gd₂O₃ is equal to 0,0634 S/cm at 600 °C. Relationship between ionic conductivity and temperature can be expressed by the value of energy activation. Sample with the highest ionic conductivity has value energy activation is equal to 0,54 eV.

Keywords : IT-SOFC, solid electrolytes, LGDC, ionic conductivity

1. PENDAHULUAN

Perkembangan energi bersih dan ramah lingkungan telah menjadi topik utama penelitian beberapa tahun terakhir dan masih terus dikembangkan, khususnya pada konversi energi. Konversi energi merupakan proses perubahan bentuk suatu energi menjadi bentuk energi yang lain. *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) memiliki potensi besar untuk menjadi teknologi yang bersih, efisien, dan fleksibel dalam mengkonversi energi kimia menjadi

energi listrik. Hal tersebut didukung karena SOFC memiliki efisiensi konversi energi yang cukup tinggi hingga mencapai 65% (Raharjo, 2007). Selain itu, SOFC juga memiliki fleksibilitas dalam penggunaan bahan bakar, sistem desain yang sederhana, dan emisi polusi yang rendah. Namun, temperatur operasi SOFC yang tinggi menjadi kendala yang menghambat pemakaian untuk aplikasi secara komersial.

Yttria Stabilized Zirconia (YSZ) adalah material yang umum digunakan sebagai elektrolit SOFC. Akan tetapi, konduktivitas yang cukup tinggi agar dapat dipakai dalam sel bahan bakar baru dicapai pada rentang temperatur operasi 700-1000 °C, sehingga masih kurang praktis jika diaplikasikan pada alat elektronik yang umumnya beroperasi pada temperatur rendah^[1]. Salah satu cara yang dilakukan dalam pengembangan SOFC adalah menurunkan temperatur operasi pada daerah menengah antara 400-700 °C. Dua pendekatan yang umumnya digunakan untuk mencapai tujuan tersebut adalah dengan mereduksi ketebalan elektrolit atau menggunakan material elektrolit alternatif dari hasil penambahan beberapa paduan namun tetap menghasilkan konduktivitas ionik yang tinggi pada temperatur menengah. Hal tersebut juga dapat mengurangi penggunaan energi dan biaya.

Lapisan tipis elektrolit berbasis Ceria (CeO_2) yang *didoping* unsur tanah jarang sangat potensial karena menghasilkan konduktivitas ionik yang lebih tinggi dibanding YSZ^[1]. Maric dkk (2003) menyatakan bahwa elektrolit YSZ konvensional tidak dapat memenuhi harapan untuk mencapai konduktivitas tinggi pada suhu rendah meskipun dibuat dalam bentuk film tipis. Ceria yang *didoping* dengan La_2O_3 dan Gd_2O_3 merupakan contoh material populer yang dikaji karena memiliki konduktivitas yang tinggi di temperatur menengah. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa La_2O_3 dapat meningkatkan konduktivitas ionik pada keramik 8YSZ^[4]. Jari-jari ion Gd^{3+} dan La^{3+} hampir sama dengan jari-jari ion Ce^{4+} sehingga dapat masuk dan bergabung pada kisi Ceria. Akibatnya, konsentrasi vakansi ion oksigen lebih banyak terbentuk dengan mereduksi Ce^{4+} menjadi Gd^{3+} dan La^{3+} , serta dapat menghasilkan distorsi pada kisi yang relatif lebih kecil sehingga mencegah ketidakstabilan fasa. Adanya kekosongan ion oksigen meningkatkan transfer ion dan efisiensi proses oksidasi. Substitusi Ce dengan Gd sebanyak 10-20 % dapat menciptakan material elektrolit padat yang memiliki konduktivitas ionik yang tinggi^[3].

Penelitian Arabaci (2012) terkait Ceria yang *didoping* 10% mol Gd_2O_3 dan Jaiswal dkk (2013) terkait Ceria yang *didoping* 15% mol La_2O_3 menghasilkan energi aktivasi sebesar 0,89 eV pada temperatur operasi (T_0) 500 °C dengan nilai konduktivitas ionik masing-masing sebesar $3,4\text{E}-02$ S/cm dan $2,02\text{E}-04$ S/cm. Energi aktivasi merupakan energi yang harus dilewati agar reaksi kimia dapat terjadi. Energi aktivasi yang rendah menyebabkan ion lebih mudah berpindah dalam material tersebut yang pada akhirnya melahirkan nilai konduktivitas ionik yang tinggi.

Dalam penelitian ini, akan membahas mengenai karakteristik dan mekanisme sintering yang berkaitan dengan densifikasi, penyusutan linier, sifat mekanik seperti kekerasan, analisis struktur mikro dan fasa yang terbentuk, serta menentukan nilai konduktivitas ionik menggunakan LCR Meter beserta pengaruhnya terhadap energi aktivasi pada elektrolit padat La-Gd *doped* CeO_2 (LGDC) dengan variasi persen mol dopan Gd_2O_3 , temperatur sintering, dan waktu sintering.

2. METODE PERCOBAAN

Percobaan dimulai dengan melakukan preparasi bahan serbuk Ceria (CeO_2) 99,99%, Gadolinia (Gd_2O_3) 99,99%, Lanthania (La_2O_3) 99,99%, seperti penimbangan komposisi dengan total massa campuran 0,25 gram dan homogenisasi menggunakan metode *dry mixing* yang ditambah dengan *polyvinyl alcohol* (PVA) sebagai *binder* sebanyak 3% dari total massa sampel dan 2-3 tetes alkohol 70% untuk mengoptimalkan kerja *binder*. Pembuatan sampel dilakukan dengan cara kompaksi 40 kN hingga berbentuk *pellet* berdiameter 0,8 cm, kemudian dilakukan pengukuran awal dimensi sampel berupa tebal, diameter, dan massa sebelum sintering. Selanjutnya sampel disintering menggunakan *High Temperature Tube Furnace* kondisi *inert* dengan variasi temperatur 1200 °C, 1300 °C, dan 1400 °C selama 3 jam, 4 jam, dan 5 jam. Dimensi dan massa sampel kembali diukur setelah sintering. Selanjutnya sampel diuji

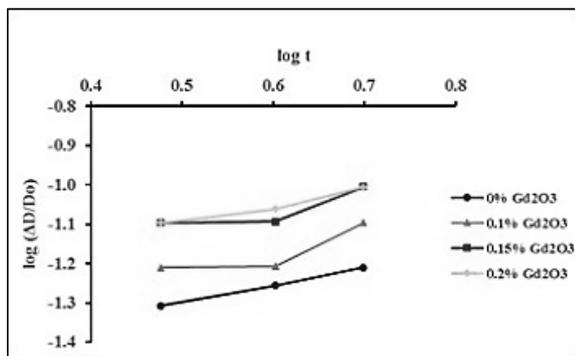
konduktivitas ionik dengan menggunakan *LCR Meter* pada rentang temperatur 350-600 °C dan frekuensi 20 Hz – 2 MHz serta pengujian kekerasan menggunakan *Micro Hardness Vickers*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Densifikasi dan Penyusutan Linier

Produk yang telah melalui tahap sintering akan mengalami perubahan sifat fisik seperti porositas berkurang, terjadi penyusutan, ukuran rata-rata butiran menjadi lebih besar, dan terbentuknya ikatan yang lebih kuat antar partikel^[6]. Terdapat dua mekanisme perpindahan massa saat sintering yaitu mekanisme adhesi dan mekanisme densifikasi (penyusutan linier). Untuk menentukan mekanisme perpindahan massa menggunakan regresi linier dari persamaan :

$$\log \left[\frac{\Delta L}{L_0} \right] = \frac{2}{n} \log t + C_1$$



Gambar 3.1 Mekanisme perpindahan massa pada Ts 1400 °C

Hasil plot $\log \Delta L/L_0$ dengan $\log t$ pada Gambar 3.1 menghasilkan kemiringan garis untuk memperoleh nilai n seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Nilai densifikasi dan mekanisme perpindahan massa pada Ts 1400 °C

Temperatur (°C)	Rasio mol Gd ₂ O ₃ (%)	Densifikasi (%) di tiap variasi waktu sintering			Nilai n
		3	4	5	
1400	0	12.59	13.37	18.95	4.59
	10	20.17	20.61	31.17	4.08
	15	25.40	28.03	31.33	5.15
	20	30.54	32.49	50.26	4.99

Nilai n sebesar 4,59 ; 5,15 ; 4,99 pada temperatur 1400 °C mendekati mekanisme

perpindahan massa difusi kisi pada batas butiran. Mekanisme tersebut merupakan mekanisme densifikasi yang menyebabkan penyusutan pada sampel hasil sintering. Adapun nilai n sebesar 2,58 pada sampel Ts 1300 °C mendekati mekanisme evaporasi kondensasi yang merupakan salah satu tipe dari mekanisme adhesi, yaitu terjadi perpindahan massa dari permukaan partikel serbuk ke daerah leher hingga menyebabkan degradasi permukaan partikel serbuk tanpa mengalami penyusutan^[6]. Untuk nilai n lain yang tidak dapat diketahui perpindahan massanya disebabkan karena terdapat lebih dari satu atom dopan yang berdifusi bersama-sama sehingga terjadi mekanisme sintering multikomponen yang didahului reaksi homogenisasi.

Adanya penyusutan linier yang ditandai dengan perpindahan massa dari butiran menuju daerah leher menyebabkan penyusutan jarak pusat antar partikel sehingga terjadi densifikasi. Dengan mengetahui perubahan diameter, tebal, dan massa sampel saat sebelum dan sesudah sintering dapat ditentukan nilai densifikasinya seperti pada Tabel 3.1 sesuai dengan persamaan :

$$\varphi = \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_t - \rho_g} \times 100\%$$

Semakin meningkatnya temperatur dan waktu sintering, maka semakin cepat atom bergerak untuk mengisi dan menutup pori. Akibatnya terjadi pemadatan dan penyusutan pada sampel. Ditunjukkan pada Tabel 3.1, dimana sampel dengan komposisi 20% mol Gd₂O₃ dan temperatur sintering 1400 °C selama 5 jam memiliki densifikasi tertinggi yaitu sebesar 50,26%. Sedangkan sampel yang memiliki densifikasi rendah dapat disebabkan karena proses konsolidasi serbuk yang tidak sempurna, sesuai dengan nilai n yang sulit diketahui konsep perpindahan massanya.

3.2 Analisis Sifat Mekanik

Sifat mekanik pada material elektrolit padat salah satunya adalah kekerasan agar memiliki ketahanan saat perakitan dan stabilitas jangka panjang.

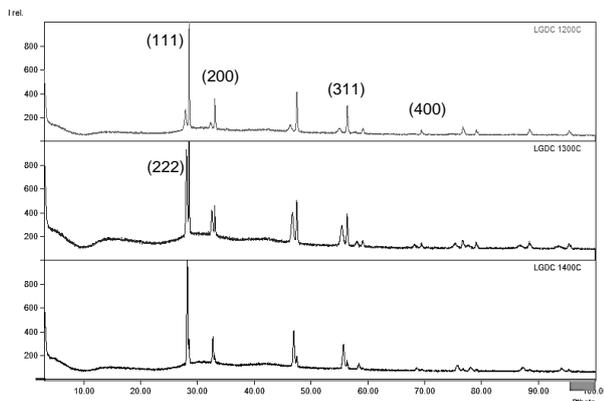
Tabel 3.2 Nilai uji kekerasan

Temperatur (°C)	Waktu (jam)	Nilai kekerasan pada variasi % mol Gd ₂ O ₃ (HVN)			
		0	10	15	20
1200	3	70.5	80.2	88.5	166.8
	4	108.0	80.5	103.3	178.2
	5	91.5	94.8	111.2	138.3
1300	3	63.8	74.3	97.8	136.9
	4	94.6	121.6	119.9	165.0
	5	120.9	133.7	137.8	199.9
1400	3	92.5	193.1	191.1	222.6
	4	106.2	126.1	220.2	323.9
	5	120.6	149.8	161.6	535.0

Tabel 3.2 menunjukkan bahwa seiring dengan lamanya waktu sintering dan meningkatnya temperatur sintering, maka nilai kekerasan yang dihasilkan akan semakin tinggi. Keaktifan atom untuk bergerak dan memadat semakin meningkat. Hal tersebut juga berkaitan dengan densifikasi, di mana sampel dengan nilai kekerasan tertinggi sebesar 535 HVN memiliki nilai densifikasi tertinggi sebesar 50,26%. Densifikasi mempengaruhi nilai konduktivitas ionik, karena semakin berkurangnya porositas maka lebih banyak vakansi oksigen yang dapat terbentuk hingga transfer ion oksigen akan semakin mudah dan meningkatkan konduktivitas ioniknya.

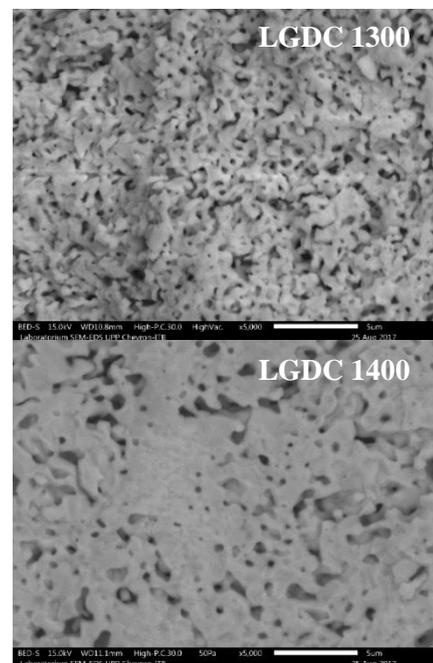
3.3 Analisis Fasa dan Struktur Mikro

XRD merupakan salah satu metode karakterisasi secara kualitatif dan kuantitatif yang mengukur hamburan sinar-X dari fasa kristalin. Sinar-X yang diarahkan pada sampel menimbulkan interaksi dan interferensi destruktif dan konstruktif.



Gambar 3.2 Difraktogram hasil XRD sampel LGDC

Pada Gambar 3.2 ditunjukkan hasil pengujian XRD pada sampel LGDC menggunakan Cu-K α di range 2 θ dari 3-100 °. Gambar 3.2 mengindikasikan bahwa fasa yang terdapat pada sampel LGDC adalah fasa kubik CeO₂. Dari hasil difraktogram diperoleh puncak difraksi yang sesuai dengan JCPDS No 34-394 bahwa karakteristik puncak difraksi (111), (200), (311), dan (400) pada fasa CeO₂ adalah struktur *fluorite*. Namun pada Ts 1300 °C ditemukan puncak Gadolinia (222) dengan fasa kubik yang menandakan bahwa ion dopan belum sepenuhnya tersubstitusi pada kisi CeO₂. Parameter kisi yang dihasilkan pada variasi Ts 1200-1400 °C berturut-turut sebesar 0,538 nm, 0,539 nm, dan 0,545 nm menunjukkan bahwa terjadi *solid solution* karena Ceria murni memiliki parameter kisi sebesar 0,541 nm. Pada penelitian Jaiswa dkk (2013) terkait LDC dan Oksuzomer dkk (2013) terkait GDC, diketahui bahwa terdapat kesamaan puncak difraksi CeO₂ yang sama dengan sampel LGDC pada 2 θ sebesar 29°, 34°, dan 59°. Sehingga penelitian terkait LGDC, GDC dan LDC sama-sama memiliki struktur kubik *fluorite*.



Gambar 3.3 Hasil SEM LGDC 20% mol Gd₂O₃ dengan waktu sintering 5 jam

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan jenis metode karakterisasi material untuk mengetahui struktur mikro dari suatu material.

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) merupakan suatu teknik analisis untuk mengetahui unsur dan karakteristik kimia spesimen dari energi Sinar-X yang dihasilkan. Hasil pengujian SEM permukaan patahan sampel LGDC pada Gambar 3.3 dengan perbesaran 5000x menggunakan fitur BED-S dimana perbedaan topografi dan komposisi akan diperlihatkan dengan jelas. Dari hasil yang ditunjukkan tidak tampak perbedaan signifikan pada warna sampel, hal tersebut mengindikasikan bahwa sampel sudah menjadi satu senyawa tunggal. Perbedaan temperatur sintering mempengaruhi densitas dan pertumbuhan butir. Semakin tinggi temperatur sintering maka densitas yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan melihat keberadaan porositas yang terdapat pada LGDC 1400 °C lebih sedikit dibandingkan dengan porositas pada LGDC 1300 °C sehingga nilai konduktivitas ioniknya pun meningkat.

3.4 Konduktivitas Ionik dan Energi Aktivasi

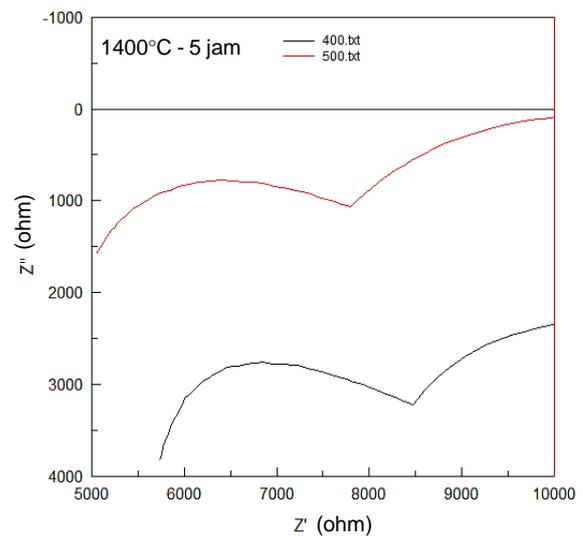
Konduktivitas ionik merupakan karakteristik penting dari material elektrolit padat sebagai aplikasi SOFC. Nilai konduktivitas ionik dipengaruhi oleh pergerakan ion melalui konsentrasi vakansi oksigen, densifikasi, dan temperatur operasi.

Tabel 3.3 Nilai konduktivitas ionik LGDC pada temperatur sintering 1400 °C

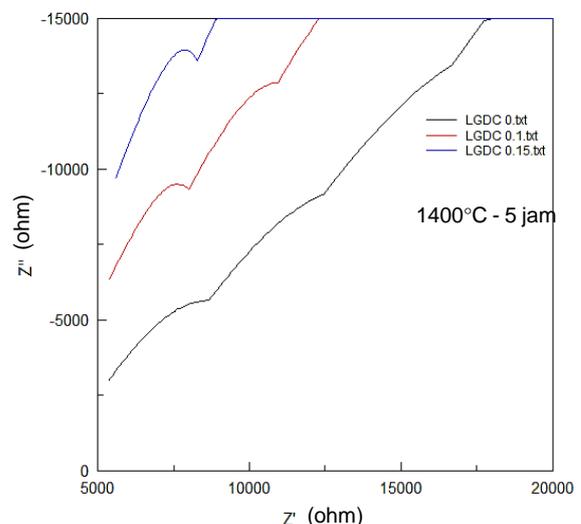
Waktu (jam)	Rasio mol Gd ₂ O ₃ (%)	Konduktivitas ionik di tiap rentang temperatur uji (10 ⁻³ S/cm)					
		350	400	450	500	550	600
3	0	0.5	1.4	1.5	1.7	2.0	4.1
	10	0.8	2.3	2.3	2.5	3.9	10.6
	15	0.8	2.2	2.2	6.3	10.6	25.2
	20	0.9	2.2	2.2	8.5	13.9	49.8
4	0	0.6	1.3	1.2	1.8	5.8	8.8
	10	1.1	2.3	2.3	3.2	10.4	23.0
	15	1.2	2.5	2.9	2.0	12.2	27.4
	20	2.1	3.3	4.6	13.9	23.2	51.7
5	0	1.9	3.1	5.1	12.1	12.8	20.8
	10	2.6	3.5	5.3	12.4	13.4	29.1
	15	3.0	4.2	8.6	11.4	16.9	30.5
	20	3.1	4.0	8.9	10.2	23.9	63.4

Pada Tabel 3.3 tampak bahwa nilai konduktivitas ionik meningkat seiring dengan meningkatnya

temperatur operasi dan banyaknya penambahan % mol Gd₂O₃ yang dicapai pada sampel LGDC sebesar 0,0634 S/cm. Nilai tersebut lebih tinggi dari penelitian Jaiswal dkk^[2] yang menunjukkan bahwa pada temperatur operasi 500 °C dan 600 °C konduktivitas ionik Ce_{0.85}La_{0.15}O_{1.925} (LDC) bernilai 2,02E-04 S/cm dan 9,4E-04 S/cm. Pada penelitian Oksuzomer dkk^[3] terkait Gd_xCe_{1-x}O_{2-x/2} (GDC) didapati nilai konduktivitas ionik sebesar 2,29E-02 S/cm di temperatur operasi 800 °C. Konsentrasi vakansi oksigen semakin tinggi seiring dengan banyaknya % mol dopan yang ditambahkan, sehingga perpindahan ion akan semakin mudah. Maka dapat disimpulkan bahwa penambahan % mol Gd₂O₃ pada material elektrolit padat La-Gd doped CeO₂ (LGDC) dapat meningkatkan nilai konduktivitas ioniknya.



Gambar 3.4 Nyquist plot impedansi imajiner terhadap impedansi real pada 20% mol Gd₂O₃



Gambar 3.5 Nyquist plot impedansi imajiner terhadap impedansi real pada suhu 350 °C

Gambar 3.4 dan 3.5 memperlihatkan *Nyquist plot* LGDC dengan variasi temperatur operasi dan % mol Gd₂O₃. Kurva berbentuk setengah lingkaran. Semakin kecil jari-jari pola setengah lingkaran yang dihasilkan, maka nilai konduktivitas ioniknya semakin tinggi. Untuk mendapatkan nilai konduktivitas ionik umumnya menggunakan ekstrapolasi impedansi dari pemodelan rangkaian listrik. Rangkaian listrik ekuivalen yang tepat dapat menginterpretasikan perilaku butir dan batas butir, sehingga dapat diperoleh nilai R (hambatan).

Hubungan konduktivitas ionik dengan temperatur dinyatakan dengan energi aktivasi (*E_a*) yang berasal dari kemiringan hasil regresi linier persamaan *Arrhenius* :

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

Didapat nilai *E_a* hasil plot ln σ terhadap 1000/T seperti pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Nilai energi aktivasi

Temperatur (°C)	Waktu (jam)	Energi aktivasi pada variasi % mol Gd ₂ O ₃ (10 ⁻² eV)			
		0	10	15	20
1200	3	16.5	31.0	33.4	41.0
	4	32.6	35.1	25.8	37.3
	5	10.3	38.7	17.3	34.7
1300	3	40.8	47.9	41.1	48.3
	4	38.8	58.4	43.8	55.3
	5	24.1	56.2	54.4	48.7
1400	3	31.5	39.1	60.7	71.7
	4	48.0	52.8	52.5	61.0
	5	45.9	44.7	42.9	54.1

Faktor pre-eksponensial sebagai fungsi konsentrasi pembawa muatan kemungkinan berperan pada penambahan % mol Gd₂O₃. Pada material terdapat dua jenis vakansi oksigen, yaitu vakansi oksigen bebas dan vakansi oksigen yang membentuk *cluster*^[5]. Pada temperatur tinggi, kemungkinan besar vakansi oksigen adalah oksigen bebas, sehingga konduktivitas ioniknya akan lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel tanpa penambahan % mol Gd₂O₃. Seperti pada sampel dengan energi aktivasi tertinggi sebesar 0,717 eV memiliki faktor pre-eksponensial sebesar 6,0486 dan

sampel dengan energi aktivasi terendah memiliki faktor pre-eksponensial sebesar -4,8028.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan 20% mol Gd₂O₃ dengan temperatur sintering 1400 °C penahanan 5 jam merupakan kondisi optimum yang didapat pada sampel LGDC. Pada kondisi tersebut terjadi mekanisme perpindahan massa yaitu difusi kisi pada batas butiran, dengan densifikasi sebesar 50,26%, nilai kekerasan 535 HVN, konduktivitas ionik 0,0634 S/cm di temperatur operasi 600 °C dan energi aktivasi sebesar 54,1x10⁻² eV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdullah M, Sriyanti I, Sintesis nanopartikel Nd-CeO₂ menggunakan metode *simple heating* untuk aplikasi *solid oxide fuel cells* (SOFCs), Jurnal Natur Indonesia 12 (2009) 1410-9379
- [2] Jaiswal N, Upadhyay S, Kumar D, Parkash O, Ionic conductivity investigation in lanthanum (La) and strontium (Sr) co-doped ceria system, Journal of Power Sources 222 (2013) 230-236
- [3] M.A.F. Oksuzomer, G. Donmez, V. Sariboga, T.G. Altincekic, Microstructure and ionic conductivity properties of gadolinia doped ceria (Gd_xCe_{1-x}O_{2-x/2}) electrolytes for intermediate temperature SOFCs prepared by the polyol method, Ceramics International 39 (2013) 7305-7315
- [4] Muslim, P. 2014. *Pengaruh Penambahan La2O3 terhadap Konduktivitas Ionik Keramik CSZ sebagai Elektrolit Padat*. Skripsi. Universitas Pendidikan Indonesia. Bandung : Perpustakaan UPI
- [5] Putri, E.L.I. 2013. *Karakteristik sintering sistem 8YSZ-4Ce-LSGM sebagai material elektrolit sel bahan bakar padat*. Skripsi. Jurusan Teknik Metalurgi, Institut Teknologi Bandung.
- [6] Soepriyanto S, Lumanauw D, Swandayani J, Analisis penyusutan linier pada produk sintering, Jurnal Teknologi Mineral (1995) No 2, vol II