

# PENGARUH KOMPOSISI Fe TERHADAP KINERJA MEMBRAN RAPAT PENGHANTAR ION OKSIGEN PADA OKSIDA PEROVSKIT $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$

M.L. Hariyanto<sup>1,\*</sup>, H. Setiawati<sup>1</sup>, S. Ilmiah<sup>1</sup>, L. Mabruroh<sup>1</sup>, A. Aliyatulmuna<sup>1</sup>, H. Fansuri<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

<sup>2</sup>Laboratorium Studi Energi dan Rekayasa, LPPM

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

\*Corresponding author : e-mail: [h.fansuri@chem.its.ac.id](mailto:h.fansuri@chem.its.ac.id)

## Abstrak

Oksida perovskit  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF) telah dikenal luas sebagai bahan membran penghantar ion oksigen. Salah satu yang telah dilaporkan adalah  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  dengan  $0 \leq y \leq 1$ . Konduktivitas ion oksigen pada oksida perovskit tersebut dipengaruhi oleh rasio molar Co/Fe. Disamping itu juga dilaporkan tentang LSCF dalam bentuk fiber dapat memproduksi syngas dengan kemurnian kemurnian oksigen 97,15%. Pada penelitian ini dilakukan kajian tentang pengaruh komposisi Fe terhadap kinerja membran penghantar ion pada perovskit  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$ . Oksida tersebut digunakan metode *solid-state* dengan nilai  $0.1 \leq y \leq 0.5$  pada suhu sintering  $1100^\circ\text{C}$ . Sampel dilakukan karakterisasi menggunakan LCR meter (Konduktivitas ion), SEM-EDX (Morfologi permukaan), dan Vicker hardness (uji kekerasan) serta TMA (uji muai). Hasil karakterisasi diperoleh sampel dengan konduktivitas ion, uji kekerasan tinggi serta daya muai yang rendah ditunjukkan pada komposisi  $y = 0.2$  yaitu  $\sigma = 6.3928 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,  $V_H = 720,34 \text{ N/m}^2$ , dan daya muai adalah 1,6011 mm. Membran penghantar ion oksigen pada oksida perovskit  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  dipengaruhi oleh komposisi Fe terhadap Co.

*Katakunci : Perovskit, LSCF, Solid-state, Penghantar Ion Oksigen*

## Abstract

*Perovskite oxides  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF) has been widely recognized as a materials that has a good oxygen ion conductivity. One that has been reported is  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  with  $0 \leq y \leq 1$ . Oxygen ion conductivity in perovskite oxides are influenced by the molar ratio Co / Fe. In this research about the influence of the composition of Fe towards the oxygen ion conductivity in perovskite  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$ . The oxide is used solid-state method with a value of  $0.1 \leq y \leq 0.5$  at the sintering temperature  $1100^\circ\text{C}$ . The highest ionic conductivity indicated in the composition  $y = 0.3$  is  $\sigma = 6.70814 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$  and decrease ionic conductivity occurred at the composition  $y = 0.5$  is  $\sigma = 4.63604 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Oxygen ion conductivity of perovskite oxide  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-\delta-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  influenced of composition Fe.*

*Keywords: Perovskite, LSCF, Solid-state, Ion conductivity*

## 1. PENDAHULUAN

$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF) adalah oksida perovskit turunan oksida  $\text{LaCoO}_3$ . Oksida perovskit LSCF diperoleh dari substitusi Sr pada La dan Fe pada Co dalam  $\text{LaCoO}_3$ . Teroaka dkk.

(1985) menemukan substusi Sr pada La bertindak sebagai akseptor, yaitu meningkatkan pembentukan kekosongan oksigen. Sedangkan substitusi Fe pada Co mempengaruhi struktur dan sifat listrik. Matsumoto dkk. (1980) menemukan LSCF sebagai aktivitas tertinggi sebagai evolusi

oksigen dalam larutan basa. LSCF juga telah diteliti tentang permeabilitas oksigen (B.C.H Steele, dkk.1998) dan aktivitas katalitik oksidasi (W.Weston, dkk. 1998) serta sifat konduksi elektronik dan ionik (J.W. Stevenson, dkk. 1996 dan C.C Chen, dkk. 1995).

Selain itu Y. Teroaka dkk. (1988, 1991) dan S. Sekido dkk. (1990) menemukan bahwa permeabilitas oksigen LSCF meningkat dengan meningkatnya konduktivitas ionik. Qing Xu, dkk. (2004) meneliti bahwa pada suhu 800 °C komposisi  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_3$  (LSCF 6482) memiliki konduktivitas ion oksigen  $3.73 \times 10^{-2} (\Omega^{-1}\text{cm}^{-1})$  dan pada suhu sintering 1200 °C menghasilkan konduktivitas elektronik  $1.26 \times 10^3 (\Omega^{-1}\text{cm}^{-1})$ . Selain itu Qing Xu mengungkapkan bahwa mempelajari komposisi LSCF menjadi penelitian yang menjanjikan bagi banyak orang. Diantaranya katode untuk sel bahan bakar oksida padat (Y. Teraoka dkk. 1991), membran pemisahan oksigen (S.J. Beson dkk. 1999), dan reaktor membran untuk produksi syngas serta katalis untuk oksidasi pada hidrokarbon (C.Y. Tsai dkk. 1998).

L. W. Tai dkk. (1995) bagian pertama menemukan konduktivitas ion  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$  ( $0 \leq y \leq 1$ ) dipengaruhi Co. Padahal oksida perovskit tersebut dipengaruhi oleh rasio Co/Fe. Oleh karena itu pada makalah ini dilaporkan hasil-hasil pengkajian tentang kaitan antara komposisi Fe dengan pola konduktivitas ion oksigen pada oksida perovskit  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  ( $0.1 \leq y \leq 0.5$  dengan interval 0.1)

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Preparasi dan Karakterisasi LSCF

Membran LSCF dibuat dari serbuk LSCF. Serbuk LSCF disiapkan dari campuran  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dengan komposisi yang sesuai dengan stoikiometri yang diinginkan. Keempat serbuk oksida tersebut digerus menggunakan *ball mill* selama 24 jam dengan metanol sebagai pendispersi. Setelah dikeringkan dari metanol, campuran serbuk penggerusan dikalsinasi pada suhu 1000°C selama 2 jam berdasarkan metode kalsinasi yang

dilaporkan oleh Claudia Torres-Garibay dkk. (2009).

Oksida perovskit LSCF yang dihasilkan selanjutnya dianalisis dengan XRD untuk menentukan komposisi fasa kristalinnya. Analisis XRD dilakukan terhadap serbuk LSCF dengan  $2\theta$  antara  $10^\circ$  sampai  $100^\circ$  dengan interval  $0,02^\circ$  dan laju  $0.5^\circ/\text{menit}$  serta sinar X dari sumber Cu dengan panjang gelombang ( $\lambda$ )  $1,54056 \text{ \AA}$ . Analisis dilakukan pada, step  $0,02^\circ$ . Sementara itu morfologi LSCF diamati menggunakan mikroskop elektron (SEM) Zeiss EVO 10 MA.

### 2.2 Preparasi Pelet LSCF

Oksida perovskit LSCF yang dihasilkan selanjutnya dicetak menjadi pelet berdiameter 12 mm dengan ketebalan  $\pm 2$  mm. Pelet tersebut dibuat dengan memberikan tekanan secara uniaksial di dalam cetakan pelet berbahan baja tahan karat (stainless steel/SS) jenis 316. Tekanan yang diberikan adalah 4 ton ( $629,95 \text{ kg/cm}^2$ ) selama 15 menit. Pelet yang terbentuk selanjutnya disinter pada suhu  $1100^\circ\text{C}$  selama 4 jam yang dilaporkan oleh Qing Xu dkk. (2004), Atanu Dutta dkk. (2009) dan Jae-Il jung dkk. (2010).

### 2.3 Pengukuran Konduktivitas ion

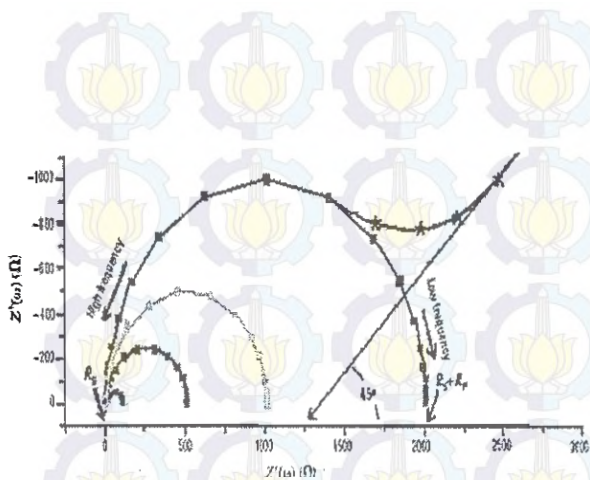
Konduktivitas ion oksigen pelet oksida perovskit LSCF diukur dengan metode impedansi menggunakan LCR meter. Pengukuran konduktivitas ion oksigen dilakukan pada suhu 300 sampai  $500^\circ\text{C}$ .

Menurut Bambang P. dkk. (2007), konduktivitas ion oksigen diukur berdasarkan data impedansi (Z) total. Data impedansi total (kompleks) dapat diperoleh dari impedansi real ( $Z'$ ) dan impedansi imajiner ( $Z''$ ) yang dihubungkan pada persamaan berikut:

$$Z = Z' + iZ'' \dots\dots\dots (1)$$

Dengan  $i = \sqrt{-1}$

Jika nilai impedansi real ( $Z'$ ) diproyeksikan pada sumbu -X dan nilai impedansi imajiner ( $Z''$ ) diproyeksikan pada sumbu-Y, maka akan diperoleh grafik seperti ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Grafik Nyquist dengan menunjukkan dengan adanya Warburg (1).

Grafik pada Gambar 5 disebut grafik Nyquist. Pada grafik terlihat impedansi Warburg yang ditunjukkan oleh garis 45° pada frekuensi rendah. Impedansi Warburg disebabkan oleh transfer muatan ke dan dari elektrode. Dari persamaan 1, maka impedansi total :

$$|Z| = (Z'^2 + Z''^2)^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

Maka notasi impedansi kompleks adalah :  $Z = R_{tot} - i/\omega.Cdl \dots\dots\dots(3)$

Untuk mendapatkan nilai  $R_{tot}$ , maka kita harus mendapatkan  $Z''=0$  dengan cara melakukan ekstrapolasi membentuk setengah lingkaran seperti pada gambar di atas. Dari nilai  $Z=R_{tot}$  ini, kita dapat menentukan konduktivitas bahan dengan menggunakan persamaan :

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots(4)$$

dimana:

$R$  = Resistensi bahan (Ohm)

$\rho$  = hambatan jenis bahan (ohm.m)

$l$  = tebal bahan (m)

$A$  = luas penampang bahan (m<sup>2</sup>)

Dikarenakan  $\sigma = 1/\rho$ , maka rumus persamaan (4) menjadi

$$\sigma = \frac{l}{R.A} \dots\dots\dots(5)$$

dimana :

$\sigma$  = Konduktivitas.. (Ω<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>) atau (S/m)

$l$  = tebal sampel ..(m)

$R$  = Resistensi bahan ..(Ω)

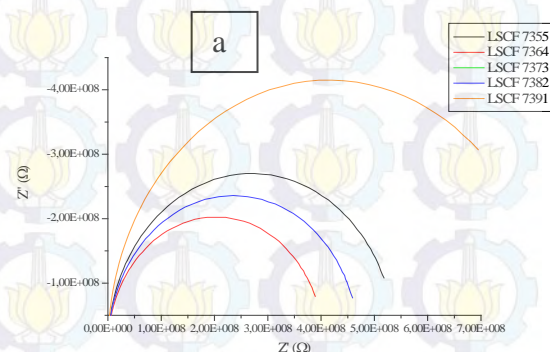
$A$  = luas penampang elektrode.....(m<sup>2</sup>)

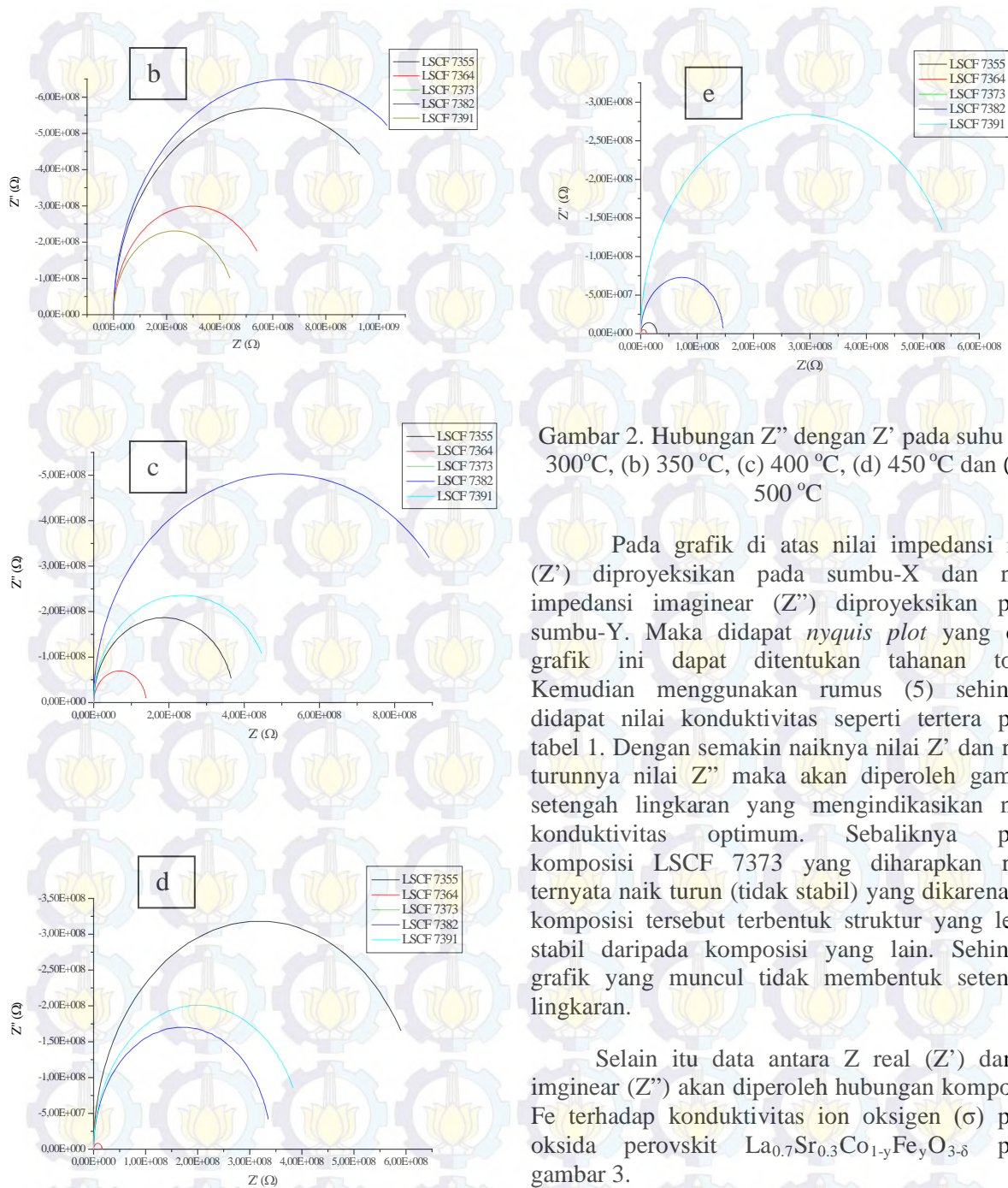
Impedansi kompleks akan digunakan untuk menguji interkasi antara komponen elektrode dan elektrolit dalam kemampuan migrasi dari elektron dan ioniknya dalam penelitian ini

### 3. HASIL DAN DISKUSI

#### 3.1 Analisis LCR

LCR menghasilkan data hubungan antara  $Z$  real ( $Z'$ ) dan  $Z$  imajiner ( $Z''$ ) yang ditunjukkan pada gambar 2.

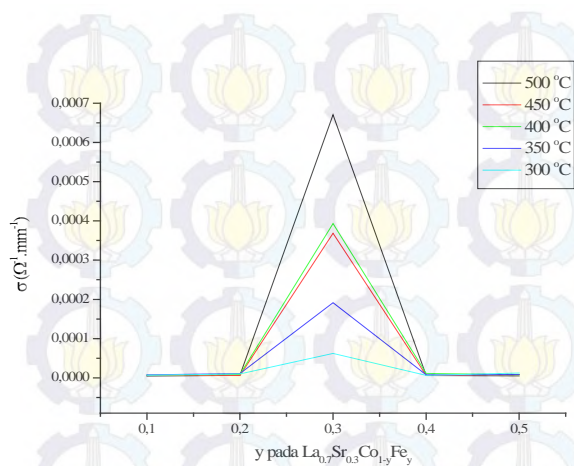




Gambar 2. Hubungan  $Z''$  dengan  $Z'$  pada suhu (a) 300°C, (b) 350°C, (c) 400°C, (d) 450°C dan (e) 500°C

Pada grafik di atas nilai impedansi real ( $Z'$ ) diproyeksikan pada sumbu-X dan nilai impedansi imajiner ( $Z''$ ) diproyeksikan pada sumbu-Y. Maka didapat *nyquist plot* yang dari grafik ini dapat ditentukan tahanan total. Kemudian menggunakan rumus (5) sehingga didapat nilai konduktivitas seperti tertera pada tabel 1. Dengan semakin naiknya nilai  $Z'$  dan naik turunnya nilai  $Z''$  maka akan diperoleh gambar setengah lingkaran yang mengindikasikan nilai konduktivitas optimum. Sebaliknya pada komposisi LSCF 7373 yang diharapkan naik ternyata naik turun (tidak stabil) yang dikarenakan komposisi tersebut terbentuk struktur yang lebih stabil daripada komposisi yang lain. Sehingga grafik yang muncul tidak membentuk setengah lingkaran.

Selain itu data antara  $Z'$  dan  $Z''$  akan diperoleh hubungan komposisi Fe terhadap konduktivitas ion oksigen ( $\sigma$ ) pada oksida perovskit  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  pada gambar 3.



Gambar 3. Komposisi Fe terhadap konduktivitas ion oksigen ( $\sigma$ ) pada oksida perovskit  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$

Tabel 1 . Data hasil perhitungan komposisi fe terhadap konduktivitas ion oksigen pada oksida perovskit  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$ .

Komposisi Fe pada LSCF	Konduktivitas Ion Oksigen ( $\Omega^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ )				
	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C
0.1	6,647E-06	7,4695E-06	6,84375E-06	5,98884E-06	4,63604E-06
0.2	0,00001	1,06676E-05	8,53878E-06	5,99528E-06	6,39278E-06
0.3	6,23389E-05	0,000191403	0,000393407	0,000368411	0,000670814
0.4	6,3306E-06	7,77147E-06	1,14485E-05	6,06716E-06	5,93284E-06
0.5	1,21E-05	8,47003E-06	8,33424E-06	8,41206E-06	5,00404E-06

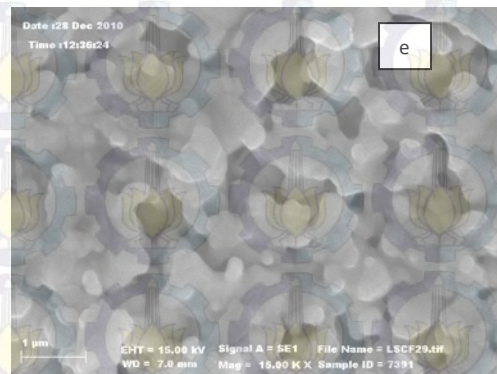
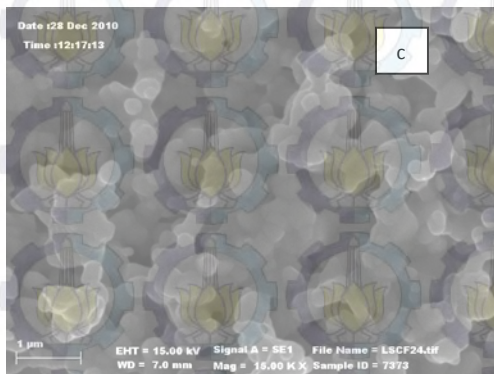
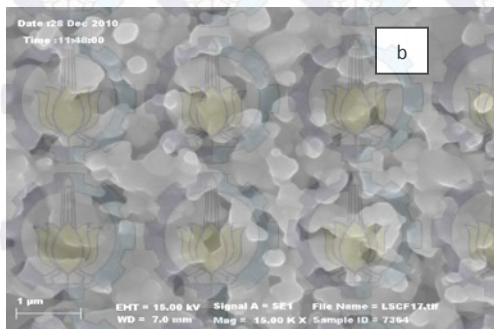
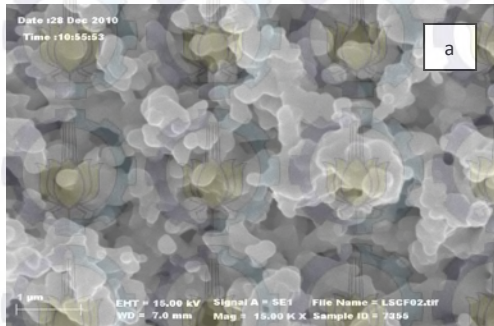
Dari data tabel 1 dan grafik gambar 2 dapat diindikasikan bahwa semakin rendah nilai resistensi totalnya maka akan diperoleh nilai konduktivitas ( $\sigma$ ) yang besar sesuai persamaan 8. Begitu juga komposisi Fe berpengaruh terhadap konduktivitas ion oksigen pada LSCF . Semakin banyak jumlah Fe yang didoping pada Co menyebabkan konduktivitas ion oksigen menurun. Ini juga didukung pada penelitian Anthony Petric, dkk. (200) dan Hong Lv, dkk. (2006) bahwa penambahan Fe dalam oksida menyebabkan nilai konduktivitas ion menurun. Dalam penemuan lain dijelaskan bahwa penambahan Fe mengakibatkan penurunan struktur kubik dan nonstoikiometri oksigen (Zhihao Chen, dkk. 2007). Pada LSCF 7373 diperoleh nilai konduktivitas yang tinggi jika dibandingkan dengan yang lainnya. Hal ini dikarenakan pada komposisi tersebut diperoleh struktur yang stabil daripada struktur yang dibentuk komposisi lain. Sebaliknya pada LSCF 7391 diperoleh nilai konduktivitas lebih rendah

dari sebelumnya. Hal ini dikarenakan komposisi Co lebih dominan daripada Fe. Akibatnya Fe yang sedikit mengikat ion  $\text{O}^{2-}$  diselubungi Co. Akibatnya daya hantar ion oksigennya lebih rendah daripada komposisi lainnya.

### 3.2 Analisis SEM

Untuk pengujian SEM, sampel yang dipergunakan adalah LSCF 7355, LSCF 7364, LSCF 7373, LSCF 7382, dan LSCF 7391 dengan suhu sintering 1100 °C. Permukaan semua sampel tidak jauh mengungkapkan perubahan mikrostruktur. Gambar menampilkan permukaan mikrostruktur kristal yang rapat walaupun masih terlihat rongga-rongga (poros) di permukaan. Permukaan yang terlihat rongga sangat jelas dilihat pada gambar 4a. Ini dikarenakan Fe lebih mudah berikatan dengan Co akibatnya semakin banyak ion oksigennya maka semakin banyak rongga (poros) yang dihasilkan dalam

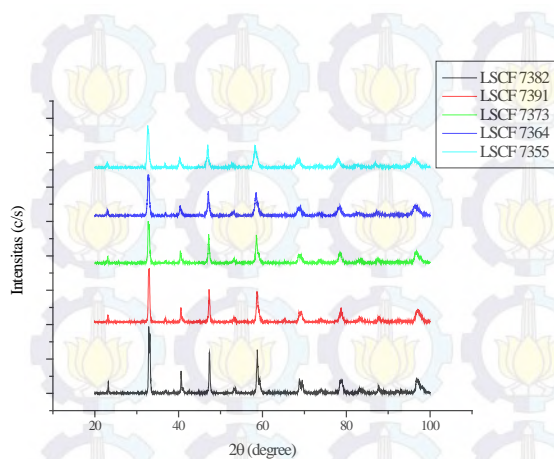
oksida tersebut. Sedangkan permukaan tampak rapat dapat di lihat pada gambar 4e. Hal ini menunjukkan komposisi Fe yang sedikit mengakibatkan Co menyelubungi komposisi Fe yang mengikat ion oksigen dalam oksida tersebut. Akibatnya aliran ion oksigen terhalangi oleh Co.



Gambar 4. SEM dengan komposisi (a) LSCF 7355, (b) LSCF 7364, (c) LSCF 7373, (d) LSCF 7382, (e) LSCF 7391

### 3.3 Analisis XRD

Pola difraksi sinar-X dari sampel LSCF dengan variasi komposisi  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF) dengan  $y = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4;$  dan  $0,5$  dapat dilihat pada gambar 5. Pola difraktogram dari kelima variasi tersebut menunjukkan adanya fasa kristal perovskit disetiap variasi komposisi. Puncak dari fasa kristal perovskit muncul pada sudut  $2\theta$  antara  $20$  sampai dengan  $100^\circ$ .



Gambar 5. Pola difraksi sinar-X

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan tentang pengaruh komposisi Fe terhadap konduktivitas ion oksigen pada oksida perovskit  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  ( $0.1 \leq y \leq 0.5$ ), dapat disimpulkan bahwa konduktivitas ion oksigen pada oksida perovskit LSCF dipengaruhi oleh komposisi Fe. Semakin banyak jumlah Fe yang ditambahkan maka konduktivitas ion oksigen semakin rendah. Sebaliknya konduktivitas ion oksigen pada oksida perovskit akan meningkat jika dilakukan penurunan komposisi Fe. Konduktivitas ion oksigen tertinggi ditunjukkan pada komposisi  $y = 0.3$  yaitu  $\sigma = 6.70814 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$  dan penurunan konduktivitas ionik terjadi pada komposisi  $y=0.5$  yaitu  $\sigma = 4.63604 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ .

#### DAFTAR PUSTAKA

- Anthony Petric, Peng Huang, and Frank Tietz. 2000. *Evaluation Of La-Sr-Co-Fe-O perovskite for solid oxide fuel cell and gas separation membranes*. 719-725. Canada.
- Atanu Dutta, Jayanta Mukhopadhyay, and Basu, R.N. 2009. *Combustion synthesis and characterization of LSCF-based materials as cathode of intermediate temperature solid oxide fuel cells*. 3003-2011. India.
- Beson, S.J., Waller, D., and Kliner, J.A. 1999.  *$\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  in Carbon*

- dioxide and water atmospheres*. J. Electrochem. Soc. 1305-1309.
- Caludia Torres-Garibay, Desiderio Kovar, and Arumugam Manthiram. 2009.  *$\text{Ln}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  ( $\text{Ln} = \text{La}$  and  $\text{Nd}$ ;  $y = 0$  and  $0.5$ ) cathodes with thin yttria-stabilized zirconia electrolytes for intermediate temperature solid oxide fuel cell*. 480-486. The University of Texas at Austin. United States.
- Chen, C.C., Nasrallah, M.M., Anderson, H.U. . 1995. *Impedance response of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$  based electrochemical cells*, J. Electrochem. Soc. 142 (2) 491-496.
- Hong Lv, Yu-ji Wu, Bo Huang, Bin-yuan Zhao, and Ke-ao Hu. 2006. *Structure and Electrochemical properties of  $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$  cathode for solid oxide fuel cells*. 901-906. P.R China.
- Jae-Il Jung, Scott T. Misture, and Doreen D. Edwards. 2010. *Oxygen stoichiometry, electrical conductivity, and thermopower measurements of BSCF ( $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_{3-\delta}$ ,  $0 \leq x \leq 0.8$ ) in air*. 480-486. The University of Texas at Austin. United States.
- Matsumoto, Y., Yamada, S. Nishida, T., and Sato, E., Electrochem, J., Soc. 127 (1980) 2360.
- Prihandoko B., Triwibowo, J. 2007. *Pengaruh  $\text{LiClO}_4$  pada konduktivitas Katoda Komposit Keramik  $\text{Li}_{1.37}\text{Mn}_2\text{O}_4$* . LIPI.
- Qing Xua, Duan-ping Huang, Wen Chena, Joong-hee Leeb, Bok-hee Kimb, Hao Wang, Run-zhang Yuana. 2003. *Influence of sintering temperature on microstructure and mixed electronic-ionic conduction properties of perovskite-type  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_3$  ceramic*. South Korea
- Sakid, S., Tachibana, H., Yamura, Y., and Kambara, T. 1990. *Solid State Ionics*. 37. 253.
- Steele, B.C.H., and Joong-Myeon Bae. 1998. *Properties of La Sr Co Fe O (LSCF) double layer 0.6 0.4 0.2 0.8 32x cathodes on gadolinium-doped cerium oxide (CGO) electrolytes II. Role of oxygen exchange and diffusion*. 255-261. London.
- Stevenson, J.W., Armstrong, T.R., Carneim, R.D., Pederson, L.P., Weber, W.J. 1996.

- Electrochemical properties of mixed conducting perovskites  $La_{1-x}M_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-d}$  ( $M=Sr, Ba, Ca$ ), J. Electrochem. Soc. 143 (9) 2722–2729.*
- Tai, L-W., Nasrallah, M.M., Anderson, H.U., Sparlin, D.M., Sehlin, S.R. 1994. *Structure and electrical properties of  $La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_3$ . Part I. The System  $La_{0.8}Sr_{0.2}Co_{1-y}Fe_yO_3$ .* USA.
- Teraoka, S. Furukawa, H.M. Zhang and N. Yamazoe, J. Chem. Soc. Japan 7 (1988) 1084.
- Teraoka, Y., Zhang, H-M., and Yamazoe, N., Chem. Lett.(1985) 1367.
- Teraoka, Y., Zhang, H-M., Furukawa, S., and Yamazoe, N., Chem. Lett. (1991) 1743.
- Tsai, C.Y., Dixon, A.G., Ma, Y.H., Moser, W.R., and Pascucci, M. R. 1998. *Dense Perovskite  $La_{1-x}A_xFe_{1-y}Co_yO_{3-\delta}$  ( $A= Ba, Sr, Ca$ ) Membrane synthesis, application, and Characterization.*1437-1444
- W. Weston, W., Metcalf, I.S. 1998.  *$La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_3$  as an anode for direct methane activation in SOFCs, Solid State Ionics* 247–251.
- Zhihao Chen, Ran Ran, Wei Zhou, Zongping Shao, and Shaomin Liu. 2007. *Assessment of  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{1-y}Fe_yO_{3-\delta}$  ( $y = 0.0–1.0$ ) for prospective application as cathode for IT-SOFCs or oxygen permeating membrane.* 7342-7351. P. R. China.