

Ekspansi Termal, *Oxygen Content*, dan Sifat Elektrokimia Oksida $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ (70%) + SDC (30%) sebagai Katoda SOFC

Adi Subardi^{1*}, Yen-Pei Fu²

¹Prodi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY), DIY, Indonesia

²Department of Materials Science & Engineering, National Dong Hwa University, Shou-Feng, Hualien, Taiwan

Corresponding Author:
Adi Subardi
subardi@itny.ac.id

Received: July 2022
Accepted: September 2022
Published: September 2022

©Adi Subardi et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Abstract

The thermal properties of the double perovskite $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ (70%) + SDC (30%) have been investigated as potential cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cells (IT-SOFC). This study also includes the oxygen content and electrochemical performance of long-term tests carried out to evaluate the electrochemical stability. Cathode powder is fabricated by a simple and relatively inexpensive solid-state reaction. Oxygen content decreased gradually from room temperature to 800°C by 18.3%. Doping 30% SDC into SBSC oxide can reduce the thermal expansion coefficients (TEC) value from $19.80 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$ to $18.17 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$ or a decrease of 8.23%. The activation energy (E_a) identified by the electrochemical impedance spectroscopy (EIS), low field (LF), and high field (HF) techniques were 125.3 kJ mol^{-1} , 60.6 kJ mol^{-1} , and 62.5 kJ mol^{-1} , respectively. The SBSC73|SDC|SBSC73 symmetric cell test for 96 hours at 600°C showed an increase in the average polarization resistance value of 0.30% h^{-1} . The cathode grains are evenly distributed with a size of 2-3 μm and tend to be porous. These results exhibit that $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ (70%) + SDC (30%) is a promising cathode material for IT-SOFCs.

Keywords: SOFC, Cathode, Oxygen content, TEC, Long-term stability

Pendahuluan

Sel bahan bakar oksida padat (*solid oxide fuel cell-SOFC*) memiliki potensi sebagai salah satu pembangkit energi paling rendah polusi dan memiliki efisiensi paling tinggi yang dapat mentransformasi langsung bahan bakar kimia menjadi listrik^[1]. Kendala utama implementasi SOFC secara massal karena perangkat ini beroperasi pada temperatur tinggi sehingga penggunaan bahan bakar menjadi mahal. Suhu operasional yang lebih rendah menyebabkan *over potential* yang tinggi pada lapisan katoda menyebabkan kinetika reduksi oksigen lambat,

menurunkan aktifitas elektrokimia katoda dan menurunkan kinerja SOFC^{[2],[3]}. Disisi lain, suhu operasi yang lebih rendah dapat mengurangi masalah dengan *sealing* dan degradasi termal, dan memungkinkan penggunaan bahan interkoneksi logam yang murah, dan menekan reaksi antara komponen sel sehingga dapat menekan biaya operasional SOFC.

Katoda menjadi faktor utama yang menentukan kinerja sel secara keseluruhan sehingga elektroda baru dengan aktivitas elektrokatalitik tinggi sangat penting untuk IT-SOFC^{[4],[5]}. Katoda kinerja tinggi berkaitan

dengan IT-SOFC terutama didasarkan pada struktur perovskit dan struktur turunannya. Kobaltit dengan sifat elektrokimia yang mengesankan telah diselidiki sebagai katoda IT-SOFC^{[6]-[8]}. Bahan ini menarik perhatian luas karena kinerja konduktor ionik dan elektronik (MIEC) yang luar biasa dalam kisaran suhu menengah 600°C–800°C. Bahan berbasis perovskit ganda terbukti menjanjikan dan sesuai sebagai katoda di IT-SOFC yang membutuhkan laju difusi oksigen yang lebih cepat serta kinetika *surface exchange* yang lebih tinggi pada kisaran suhu menengah^[9].

Perovskit yang berorde situs-A, $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$, oksigen dapat dengan mudah bermigrasi melalui bidang LnO yang diamati melalui teknik difraksi neutron dan simulasi dinamika molekul^[10]. Banyak peneliti telah menggabungkan lantanida dan logam alkali tanah yang berbeda ke dalam situs-A perovskit ganda bertujuan untuk meningkatkan mobilitas oksigen di bidang LnO . Penelitian tersebut menggunakan katoda komposit antara lain $\text{NdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ ^[11], $\text{GdBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$ ^{[12],[13]}, $\text{PrBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$ ^[14], $\text{YBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ ^[15], $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ ^{[16],[17]}. Mckinlay et al. (2007) melaporkan bahwa substitusi Sr ke dalam unsur Ba menghasilkan peningkatan konduktivitas yang signifikan pada katoda $\text{YBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$. Nilai konduktivitas katoda $\text{YBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ jauh lebih tinggi daripada $\text{YBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$, diduga karena volume kisi yang lebih kecil pada spesimen tersubstitusi Sr^[18]. Kim et al. (2008) mengungkapkan bahwa substitusi Sr ke dalam unsur Ba pada katoda $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ dapat meningkatkan stabilitas kimia antara katoda dan elektrolit, dan mempercepat transportasi oksigen^[19]. Degradasi SOFC yang diakibatkan perbedaan nilai TEC antar komponen anoda, elektrolit, dan katoda. Metode efektif untuk menurunkan nilai TEC katoda melalui metode doping SDC ke dalam komponen katoda seperti yang telah dilaporkan sebelumnya^{[20],[21]}.

Berdasarkan berbagai sumber di atas, substitusi Sr^{2+} ke dalam unsur Ba^{2+} menghasilkan konduktivitas listrik yang lebih tinggi dan kinerja elektrokimia yang lebih baik dari oksida perovskit ganda. Oksida perovskit ganda

SBSC73 dipilih sebagai bahan katoda SOFC pada penelitian ini. Katoda SBSC73 dikarakterisasi pada berbagai aspek yang meliputi koefisien ekspansi termal, *oxygen content*, sifat elektrokimia, dan struktur mikro.

Metodologi Penelitian

Bahan Kimia

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu serbuk oksida logam meliputi 4 jenis dengan tingkat kemurnian antara 98%-99.9% diperoleh dari berbagai produsen luar negeri yang digunakan untuk pembuatan katoda. Serbuk Sm_2O_3 (99%, Wako Pure Chemical Industries, Ltd.), SrCO_3 (98%, Shimakyu chemical Co., Ltd), BaCO_3 (98.8%, Showa Chemical Industries, Ltd.) dan CoO (99.9%, Choneye Pure Chemical Co., Ltd.) digunakan sebagai *raw material*. *Cerium nitrate* (Uranus Chemicals Co, Ltd) digunakan untuk pembuatan elektrolit. *Ammonia water* (NH_4OH , Choneye Pure Chemicals) sebagai larutan pada pembuatan serbuk elektrolit.

Peralatan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini diantaranya gelas, timbangan digital, bola penggiling alumina, mortar batu akik, *magnetic stirrer*, timbangan digital, tungku, sablon, dan tabung vakum. Instrumen yang digunakan adalah mesin pres, XRD; Rigaku D/MAX-2500V, *digital source meter* (Keithley 2420), potensiostat VoltaLab PGZ30, dan software Z-view.

Prosedur penelitian

Fabrikasi Spesimen

Serbuk katoda $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ (70%) + SDC (30%) yang disingkat SBSC73 dibuat secara konvensional menggunakan metode *solid-state reaction*. Sejumlah stoikiometri serbuk Sm_2O_3 , BaCO_3 , SrCO_3 , dan CoO yang seluruhnya dicampur etanol dan digiling menggunakan bola alumina selama 12 jam. Setelah dikeringkan dalam tungku selanjutnya dikalsinasi di udara pada 1100°C selama 4 jam. Serbuk $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{1.9}$ (SDC) disintesis dengan metode kopresipitasi menggunakan

$Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ dan $Sm(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ sebagai prekursor. Prekursor ini dilarutkan dalam air suling dan nilai pH pada kisaran 9.5-10 dengan menambahkan larutan amonia. Endapan yang dihasilkan dicuci kemudian dikeringkan dan dikalsinasi pada $600^\circ C$ selama 2 jam di udara. Serbuk SDC dipress untuk menghasilkan pelet SDC berupa *disk* berukuran diameter 13 mm & tebal 1 mm selanjutnya disinter pada $1500^\circ C$ selama 5 jam.

Sel simetris dengan 3 lapisan terdiri atas SBSC73|SDC|LBSC73 dibuat menggunakan teknik sablon. Pasta katoda SBSC73 dioleskan pada kedua sisi cakram elektrolit SDC. Pada satu sisi cakram, pasta katoda disablon (dioleskan) sebagai elektroda kerja (EK) dengan luas permukaan 0.385 cm^2 . Elektroda referensi (ER) ditempatkan dengan jarak dari EK sekitar 0.3-0.4 cm. *Ag counter electrode (CE)* ditempatkan di sisi lain dari disk SDC. Setelah pasta katoda SBSC disablon pada elektrolit, tahap berikutnya disinter pada $1000^\circ C$ selama 4 jam.

Pengukuran

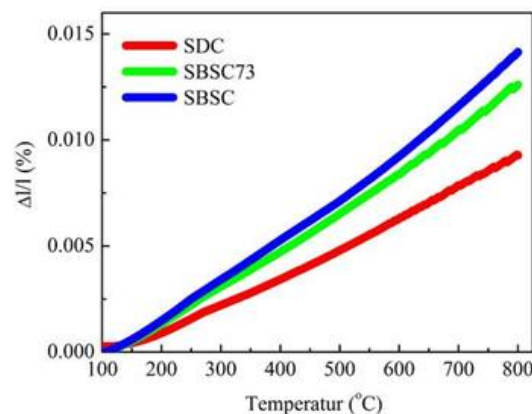
Pengujian serbuk katoda SBSC73 terkalsinasi dilakukan dengan menggunakan penganalisis termogravimetri (TGA; SII TG/DTA 6300) di udara statis dari suhu kamar hingga $800^\circ C$ dengan laju pemanasan konstan $10^\circ C/\text{menit}$. Data pengujian TGA digunakan untuk menentukan nilai *oxygen content*. Pengujian sel simetris dilakukan di bawah tekanan atmosfer $p(O_2) = 0.21 \text{ atm}$ dalam rentang suhu $600^\circ C$

hingga $800^\circ C$ dengan interval $50^\circ C$ dilakukan di dalam tungku. Pengukuran impedansi AC sel simetris dilakukan dengan menggunakan potensiostat VoltaLab PGZ301 dengan dalam rentang 100 kHz hingga 0.1 Hz dengan amplitudo sinyal AC 10 mV.

Linear sweep voltammetry diukur antara -0.4 dan 0.1 V dengan *sweep rate* 0.5 mV s^{-1} versus ER. Pengujian ekspansi termal menggunakan *thermomechanical analyzer (TMA; Hitachi TMA7300)* dengan laju pemanasan konstan $10^\circ C/\text{menit}$ dalam rentang suhu $25^\circ C - 800^\circ C$. Pengujian *long-term* dilakukan selama 96 jam tanpa henti pada suhu $600^\circ C$ di dalam tungku untuk mengukur ketahanan kinerja sel simetris.

Hasil dan Diskusi

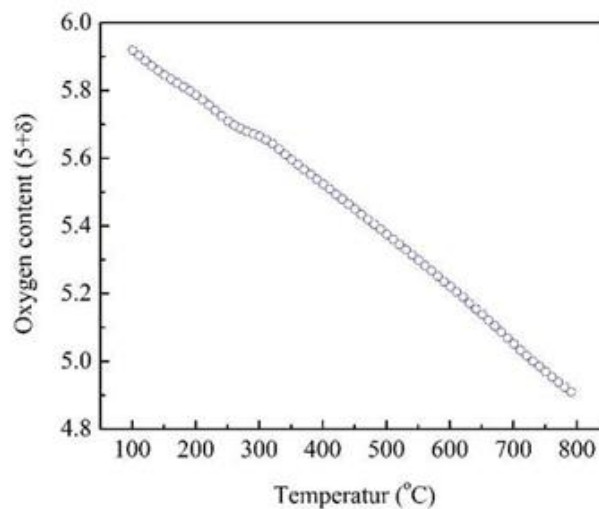
Koefisien ekspansi termal merupakan sifat penting bahan katoda yang akan menentukan kinerja sel tunggal SOFC. Gambar 1 menunjukkan kurva ekspansi termal yang meliputi elektrolit SDC, katoda SBSC73 dan SBSC dilakukan pada suhu kamar hingga $800^\circ C$ menggunakan penganalisis termomekanis. Spesimen SBSC73 dan SBSC menunjukkan ekspansi linier di zona suhu rendah ($100^\circ C - 275^\circ C$) dan mengalami sedikit peningkatan kemiringan pada wilayah suhu yang lebih tinggi ($275^\circ C - 800^\circ C$). Pada suhu yang lebih tinggi, ion Co^{4+} berjari-jari lebih kecil direduksi menjadi ion Co^{3+} berjari-jari lebih besar atau Co^{2+} dengan vakansi oksigen, ion Co^{3+} mudah berpindah dari low-spin ke high-spin^[22].



Gambar 1. Koefisien ekspansi termal elektrolit SDC, katoda SBSC73, dan SBSC

Tabel 1. Nilai TEC anoda NiO-SDC, elektrolit SDC, Katoda SBSC73, dan SBSC

Samples	SDC	SBSC73	SBSC
(K ⁻¹)	13.53 x (10 ⁻⁶)	18.17 x (10 ⁻⁶)	19.80 x (10 ⁻⁶)

**Gambar 2.** *Oxygen content* (5+δ) katoda berbasis SBSC73 sebagai fungsi suhu

Nilai TEC rata-rata oksida SBSC yang didoping 30% SDC sebesar $18.17 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$ lebih rendah dibanding dengan oksida SBSC tanpa doping yaitu $19.80 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$ atau mengalami penurunan 8.23%. Dengan kata lain, dengan doping SDC tersebut, perovskit ganda SBSC73 memiliki kompatibilitas lebih baik terhadap elektrolit SDC dibandingkan katoda SBSC tanpa doping. Nilai rata-rata TEC dari spesimen tercantum pada Tabel 1. Umumnya, perovskit berbasis kobalt memiliki nilai TEC yang lebih besar yang dapat disebabkan oleh peningkatan jari-jari ionik Co selama pengukuran ekspansi termal^[23]. Hasil yang serupa telah dilaporkan sebelumnya, bahwa katoda perovskite berlapis ganda misalnya $\text{PrBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$, $\text{NdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ dan $\text{SmBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ memiliki nilai TEC masing-masing sebesar $21.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $21.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ dan $19.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ^[24]. Sedangkan nilai TEC katoda $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ sebesar $20.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pada rentang suhu 30°C-900°C^[25].

Oxygen Content

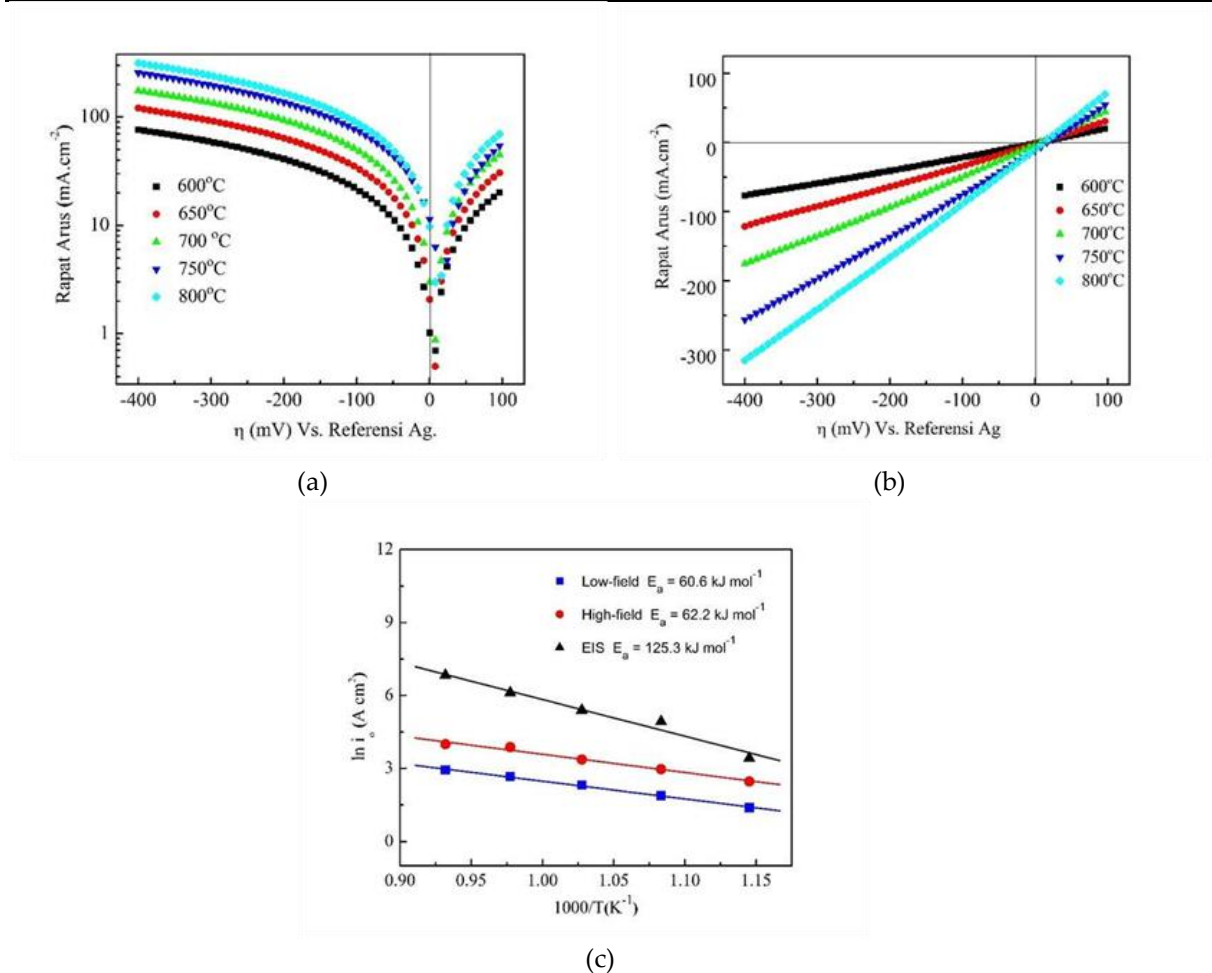
Analisis termogravimetri dilakukan untuk membuktikan *oxygen content* (5+δ) katoda SBSC73 pada tekanan atmosfer $p(\text{O}_2) = 0.21 \text{ atm}$ sebagai fungsi suhu seperti yang ditunjukkan

pada Gambar 2. Kehilangan berat pada proses pemanasan disebabkan oleh hilangnya sebagian oksigen kisi dan seiring dengan reduksi Co^{4+} menjadi Co^{3+} atau Co^{3+} menjadi Co^{2+} dengan meningkatnya suhu, sehingga *oxygen content* (5+δ) menurun terhadap pengurangan suhu^[26]. Grafik pada Gambar 2 menunjukkan kecenderungan kandungan oksigen sama dengan penurunan berat sebagai fungsi suhu. Pada $p(\text{O}_2) = 0.21 \text{ atm}$, kandungan oksigen SBSC73 menurun secara bertahap dari 5.90 pada temperatur 100°C menjadi 4.90 pada temperatur 800°C. Tabel 2 memuat data *oxygen content* (5+δ) secara terperinci sebagai fungsi suhu.

Nilai *exchange current density* (i_0) merupakan informasi penting untuk mengevaluasi laju reduksi oksigen intrinsik dan sifat elektrokimia katoda. Nilai i_0 sebanding dengan kapasitas reaksi reduksi oksigen untuk katoda. Nilai i_0 dapat diperoleh melalui teknik pengujian yang berbeda. Dalam studi ini, nilai i_0 diidentifikasi menggunakan teknik elektrokimia impedansi spektrometri (EIS), *low-field* (LF) dan *high-field* (HF).

Tabel 2. Oxygen content ($5+\delta$) katoda sebagai fungsi suhu pada OPP = 0.21 atm

Oxygen content ($5+\delta$)							
100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
5.90	5.75	5.65	5.50	5.36	5.20	5.03	4.90



Gambar 3. (a) Cyclic voltammogram, (b) Tafel plot pada 0.5 mVs^{-1} antara 100 mV dan -400 mV katoda SBSC73 pada rentang 600°C - 800°C dan (c) Plot Arrhenius dari ORR katoda SBSC73

Perhitungan nilai i_0 menggunakan teknik LF dengan cara mengidentifikasi dari kemiringan plot i vs. η seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(a). Perhitungan nilai i_0 menggunakan teknik HF diperoleh dari perpotongan y dari plot i vs. η seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(b). Informasi rinci mengenai teknik ini dapat merujuk pada makalah yang diterbitkan kelompok kami^[27]. Energi aktivasi (E_a) untuk ORR diidentifikasi dari kemiringan plot Arrhenius, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan berikut.

$$\ln i_0 = \ln K - \frac{E_a}{RT}$$

Di mana K adalah konstanta pra-eksponensial yang dapat dihitung dari perpotongan y , dan E_a adalah energi aktivasi reaksi.

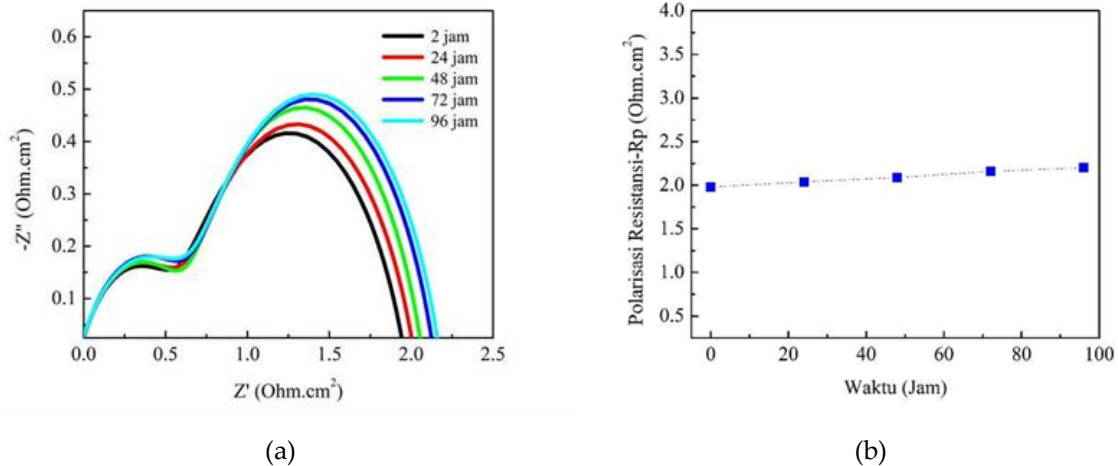
Gambar 3(c) menunjukkan plot Arrhenius untuk nilai i_0 katoda SBSC73 dalam rentang suhu antara 600°C - 800°C . Nilai E_a yang diidentifikasi melalui teknik EIS, LF, dan HF masing-masing sebesar $125.3 \text{ kJ mol}^{-1}$, 60.6 kJ mol^{-1} , dan 62.5 kJ mol^{-1} . Linearitas plot Arrhenius mengilustrasikan bahwa katoda SBSC73 relatif stabil terhadap suhu. Nilai aktivasi tersebut lebih rendah dibanding dengan penelitian sebelumnya yang

menggunakan katoda perovskit ganda $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ ^[28], hasil ini menunjukkan bahwa SBSC73 adalah kandidat katoda untuk SOFC karena aktivitas elektrokatalitiknya yang tinggi.

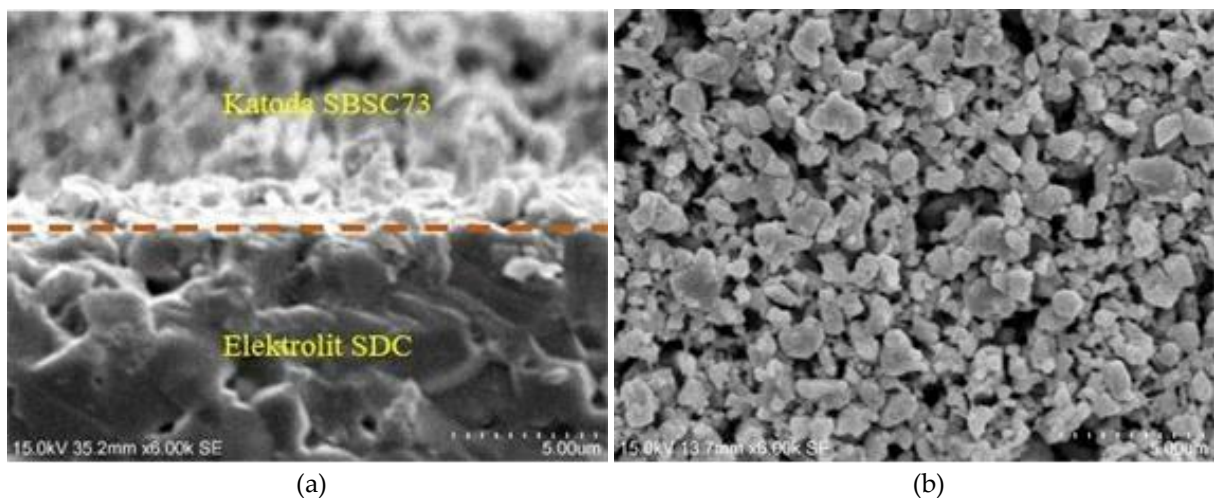
Long-term testing

Pengujian sel simetris SBSC73|SDC|SBSC73 selama 96 jam bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas spesimen. Selama pengujian, *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) dan *polarization resistance* (R_p) dicatat sebagai fungsi waktu di bawah udara stasioner sebagai oksidan pada 600°C seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

Nilai *resistensi polarisasi* (R_p) meningkat secara bertahap seiring perubahan waktu yaitu dari 1.98 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ pada 2 jam pertama menjadi 2.20 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ setelah 96 jam beroperasi pada 600°C. Nilai resistensi polarisasi katoda SBSC73 mengalami sedikit peningkatan sebesar 0.0023 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ per jam. Penampang melintang dan permukaan katoda spesimen sel simetris (*half cell*) yang diamati menggunakan SEM ditunjukkan pada Gambar 5. Kontak erat antara katoda dan elektrolit berperan terhadap kinerja SOFC. Morfologi katoda menentukan kecepatan difusi oksigen, resistensi polarisasi, dan arus listrik yang dihasilkan. Butiran katoda SBSC73 terdistribusi merata dengan ukuran 2–3 μm dan cenderung berpori.



Gambar 4. Pengujian kinerja jangka panjang sel simetris SBSC73|SDC|SBSC73 pada 600°C: (a) Diagram Nyquist impedansi spektroskopi dan (b) resistensi polarisasi (R_p)



Gambar 5. Morfologi SEM katoda SBSC73 dalam sel simetris: (a) tampilan penampang dan (b) tampilan permukaan

Kesimpulan

Studi ini terutama menyelidiki katoda SBSC73 berkaitan dengan karakteristik ekspansi termal, *oxygen content*, sifat elektrokimia, dan struktur mikro. Katoda SBSC73 menunjukkan nilai TEC sebesar 18.17×10^{-6} (K^{-1}) pada suhu antara $100^{\circ}C$ – $800^{\circ}C$. *Oxygen content* berkurang cukup signifikan selama pemanasan yaitu 5.90 pada suhu $100^{\circ}C$ menjadi 4.90 pada suhu $800^{\circ}C$. Energi aktivasi diidentifikasi menggunakan teknik EIS, LF, dan HF masing-masing adalah $125.3 \text{ kJ mol}^{-1}$, 60.6 kJ mol^{-1} , dan 62.5 kJ mol^{-1} . Ketahanan kerja katoda SBSC73 relatif stabil dalam operasional selama 96 jam tanpa henti. Keseluruhan data pengujian menunjukkan bahwa oksida perovskit ganda SBSC73 potensial sebagai bahan katoda untuk aplikasi SOFC yang beroperasi pada suhu menengah $600^{\circ}C$ – $800^{\circ}C$.

Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada Dr. Ir. Ircham Rektor Institut teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY) atas dukungannya yang sangat berharga selama penelitian. Pernyataan terimakasih secara khusus kepada Prof Yen-Pei Fu yang telah memberikan kesempatan penelitian di Lab A113, Department *Materials Science and Engineering (MSE)*, National Dong Hwa University Taiwan, dan diskusi yang berharga.

Daftar Pustaka

- Ding, D., Li, X., Lai, S. Y., Gerdes, K. & Liu, M., Enhancing SOFC cathode performance by surface modification through infiltration. *Energy Environ. Sci.*, **7(2)**: 552–575 (2014).
- Yoo, Y., Namgung, Y., Bhardwaj, A., Song, S. & Group, E. S., (LSCF6428) as a Robust Cathode Material for IT-SOFC. **56(5)**: 497–505 (2019).
- Mushtaq, N., Lu, Y., Xia, C., Dong, W., Wang, B., Wang, X., Yousaf Shah, M. A. K., *et al.*, Design principle and assessing the correlations in Sb-doped $Ba_{0.5}Sr_{0.5}FeO_{3-\delta}$ perovskite oxide for enhanced oxygen reduction catalytic performance. *J. Catal.*, **395**: 168–177 (2021).
- Klyndyuk, A. I., Chizhova, E. A., Kharytonau, D. S. & Medvedev, D. A., Layered oxygen-deficient double perovskites as promising cathode materials for solid oxide fuel cells. *Materials (Basel)*, **15(1)**: 1–31 (2022).
- Bedon, A., Rieu, M., Viricelle, J. P. & Glisenti, A., Rational Development of IT-SOFC Electrodes Based on the Nanofunctionalization of $La_{0.6}Sr_{0.4}Ga_{0.3}Fe_{0.7}O_3$ with Oxides. Part 1: Cathodes by Means of Iron Oxide. *ACS Appl. Energy Mater.*, **1(12)**: 6840–6850 (2018).
- Sindıraç, C. & Akkurt, S., Formation of $La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-\delta}$ cathode materials from precursor salts by heating in contact with CGO electrolyte. *Int. J. Hydrogen Energy*, **41(40)**: 18157–18165 (2016).
- Chen, K., Li, N., Ai, N., Li, M., Cheng, Y., Rickard, W. D. A., Li, J., *et al.*, Direct application of cobaltite-based perovskite cathodes on the yttria-stabilized zirconia electrolyte for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *J. Mater. Chem. A*, **4(45)**: 17678–17685 (2016).
- Li, M., Chen, K., Hua, B., Luo, J. li., Rickard, W. D. A., Li, J., Irvine, J. T. S., *et al.*, Smart utilization of cobaltite-based double perovskite cathodes on barrier-layer-free zirconia electrolyte of solid oxide fuel cells. *J. Mater. Chem. A*, **4(48)**: 19019–19025 (2016).
- Liu, Y., Bi, J., Chi, B., Pu, J. & Jian, L., Effects of impregnating palladium on the catalytic performance of LSCF-GDC composite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, **41(15)**: 6486–6492 (2016).
- Pang, S., Wang, W., Chen, T., Wang, Y., Xu, K., Shen, X., Xi, X., *et al.*, The effect of potassium on the properties of $PrBa_{1-x}Co_2O_{5+\delta}$ ($x = 0.00$ – 0.10) cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, **41(31)**: 13705–13714 (2016).
- Kim, J. H. & Irvine, J. T. S., Characterization of layered perovskite oxides $NdBa_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-\delta}$ cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, **41(15)**: 6486–6492 (2016).

- $x\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ ($x=0$ and 0.5) as cathode materials for IT-SOFC. *Int. J. Hydrogen Energy*, **37(7)**: 5920–5929 (2012).
12. Kim, J., Jun, A., Shin, J. & Kim, G., Effect of Fe doping on layered $\text{GdBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ perovskite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *J. Am. Ceram. Soc.*, **97(2)**: 651–656 (2014).
 13. Kuroda, C., Zheng, K. & Świerczek, K., Characterization of novel $\text{GdBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$ perovskites for application in IT-SOFC cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, **38(2)**: 1027–1038 (2013).
 14. Jiang, L., Wei, T., Zeng, R., Zhang, W. X. & Huang, Y. H., Thermal and electrochemical properties of $\text{PrBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$ ($x = 0.5, 1.0, 1.5$) cathode materials for solid-oxide fuel cells. *J. Power Sources*, **232**: 279–285 (2013).
 15. Joo, S., Kim, J., Shin, J., Lim, T.-H. & Kim, G., Investigation of a Layered Perovskite for IT-SOFC Cathodes: B-Site Fe-Doped $\text{YBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$. *J. Electrochem. Soc.*, **163(14)**: F1489–F1495 (2016).
 16. Wang, B., Long, G., Li, Y. & Ji, Y., Characterization of $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoCuO}_{5+\delta}$ cathode based on GDC and LSGM electrolyte for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, **41(31)**: 13603–13610 (2016).
 17. Jun, A., Kim, J., Shin, J. & Kim, G., Optimization of Sr content in layered $\text{SmBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ perovskite cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, **37(23)**: 18381–18388 (2012).
 18. Mckinlay, A., Connor, P., Irvine, J. T. S. & Zhou, W., structural chemistry and conductivity of a solid solution of YBaSrCO .pdf. 19120–19125 (2011).
 19. Kim, J.-H., Prado, F. & Manthiram, A., Characterization of $\text{GdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ ($0 \leq x \leq 1.0$) Double Perovskites as Cathodes for Solid Oxide Fuel Cells. *J. Electrochem. Soc.*, **155(10)**: B1023 (2008).
 20. Ahn, M., Lee, J. & Lee, W., Nanofiber-based composite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *J. Power Sources*, **353**: 176–182 (2017).
 21. Chen, D., Ran, R. & Shao, Z., Assessment of $\text{PrBaCo}_2\text{O}_{5+\delta} + \text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}$ composites prepared by physical mixing as electrodes of solid oxide fuel cells. *J. Power Sources*, **195(21)**: 7187–7195 (2010).
 22. Huang, K., Lee, H. Y. & Goodenough, J. B., Sr and Ni-Doped LaCoO_3 and LaFeO_3 Perovskites: New Cathode Materials for Solid-Oxide Fuel Cells. *J. Electrochem. Soc.*, **145(9)**: 3220–3227 (1998).
 23. Mori, M. & Sammes, N. M., Sintering and thermal expansion characterization of Al-doped and Co-doped lanthanum strontium chromites synthesized by the Pechini method. *Solid State Ionics*, **146(3–4)**: 301–312 (2002).
 24. Che, X., Shen, Y., Li, H. & He, T., Assessment of $\text{LnBaCo}_{1.6}\text{Ni}_{0.4}\text{O}_{5+\delta}$ ($\text{Ln} = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{and Sm}$) double-perovskites as cathodes for intermediate-temperature solid-oxide fuel cells. *J. Power Sources*, **222**: 288–293 (2013).
 25. Wei, B., Lü, Z., Jia, D., Huang, X., Zhang, Y. & Su, W., Thermal expansion and electrochemical properties of Ni-doped $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ double-perovskite type oxides. *Int. J. Hydrogen Energy*, **35(8)**: 3775–3782 (2010).
 26. Pang, S. L., Jiang, X. N., Li, X. N., Wang, Q. & Zhang, Q. Y., Structural stability and high-temperature electrical properties of cation-ordered/disordered perovskite LaBaCoO . *Mater. Chem. Phys.*, **131(3)**: 642–646 (2012).
 27. Subardi, A., Cheng, M. H. & Fu, Y. P., Chemical bulk diffusion and electrochemical properties of $\text{SmBa}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ cathode for intermediate solid oxide fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, **39(35)**: 20783–20790 (2014).
 28. Subardi, A., Chen, C. C. & Fu, Y. P., Oxygen transportation, electrical conductivity and electrochemical properties of layered perovskite $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\Delta}$. *Int. J. Hydrogen Energy*, **42(8)**: 5284–5294 (2017).