

## [jrk] Submission Acknowledgement Eksternal Kotak Masuk x



**Dr. Diana Vanda Wellia** <jurnal.risetkimia2@gmail.com>

Jum, 29 Jul 2022, 15.53



kepada saya ▾

Adi Subardi:

Thank you for submitting the manuscript, "Ekspansi Termal, Oxygen Content, dan Sifat Elektrokimia Oksida Perovskit Ganda Sebagai Katoda SOFC " to Jurnal Riset Kimia. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Manuscript URL: <http://jrk.fmipa.unand.ac.id/index.php/jrk/authorDashboard/submission/557>

Username: 1subardi\_1969

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

Dr. Diana Vanda Wellia

Editorial Team Jurnal Riset Kimia <http://jrk.fmipa.unand.ac.id>

## Article in Review #JurnalRisetKimia-557 Eksternal Kotak Masuk x



**Jurnal Riset KIMIA UNAND** <jurnalrisetkimia@sci.unand.ac.id>

1 Sep 2022, 11.23



kepada saya ▾

Dear **Adi Subardi**,

We have reached a decision regarding your submission to Jurnal Riset Kimia, "Ekspansi Termal, Oxygen Content, dan Sifat Elektrokimia Oksida Perovskit Ganda Sebagai Katoda SOFC" which you submitted to Jurnal Riset Kimia

Our decision is: **Revisions Required**. As shown in detail below, substantial revisions are required to improve the manuscript suitable for publication in Jurnal Riset Kimia. Please make revisions according to the comments and suggestions that given below.

=====

Editor comments:

1. Make sure to activate the Mendeley system in your word file in order to avoid inappropriate data and style. And for the style, you can download the Jurnal Riset Kimia style at <https://cs1.mendeley.com/styles/485963021/jurnal-Riset-Kimia>.
2. All figure should be presented in the proper size. Please make sure to use the same font and size

=====

Reviewer comments:

Reviewer 1

**Results and discussion :**

Tabel perlu dibuat ulang sehingga lebih mudah dipahami, misal Tabel 2, dibuat kolom misal suhu, oxygen content, kemudian dimasukkan angkanya. Gambar juga perlu dibahas Indonesiakan keterangan sumbu x dan y.

**Minor comments:**

Typo, penulisan awalan dan kata depan perlu diperhatikan.

=====

**Reviewer 2**

**Introduction:**

Tujuan penambahan SDC (30%) tidak ada dalam pendahuluan. Apa maksud penggunaan 73 dalam SBSC73 dan apa target yang diharapkan dengan penambahan SDC belum terlihat dalam pendahuluan.

**Minor comments:**

Harus diperbaiki author sebelum accepted

**Major Comments :**

Artikel ditulis dalam Bahasa Indonesia namun perlu diperbaiki dan ditulis menurut SPOK. Ada beberapa perbaikan dan klarifikasi sebelum artikel ini diterima. Author harus memperbaiki semua komen yang ditulis pada lampiran

=====

**Reviewer 2**

**Introduction:**

Tujuan penambahan SDC (30%) tidak ada dalam pendahuluan. Apa maksud penggunaan 73 dalam SBSC73 dan apa target yang diharapkan dengan penambahan SDC belum terlihat dalam pendahuluan.

**Minor comments:**

Harus diperbaiki author sebelum accepted

**Major Comments :**

Artikel ditulis dalam Bahasa Indonesia namun perlu diperbaiki dan ditulis menurut SPOK. Ada beberapa perbaikan dan klarifikasi sebelum artikel ini diterima. Author harus memperbaiki semua komen yang ditulis pada lampiran

=====

**Reviewer 3**

**Introduction:**

Tujuan penelitian mohon lebih diperjelas

**Result and discussion:**

Keterangan sumbu dll dalam gambar hrs dlm bhs indonesia

**Minor comments :**

Abstrak hrs di sempurnakan

=====

The revised manuscript has to be completed with the responses of **all the editor and reviewer comments, point by point, in table form** at the beginning of the page of the revised manuscript. It is also required to **highlight the revised parts with different color** of letters.

Please edit your submission and make the necessary changes by logging into the editorial manager at: <http://jrk.fmipa.unand.ac.id/index.php/jrk/login>

## JAWABAN

Judul: Ekspansi Termal, *Oxygen Content*, dan Sifat Elektrokimia Oksida Perovskit Ganda  
Sebagai Katoda SOFC

Artikel ditulis dalam Bahasa Indonesia namun perlu diperbaiki dan ditulis menurut SPOK. Ada beberapa perbaikan dan klarifikasi sebelum artikel ini diterima.

*Penulis: Pertama-tama, kami mengucapkan terimakasih & sangat menghargai ulasan reviewer yang bermanfaat. Artikel telah diperbaiki seperti yang disarankan, bagian perbaikan ditandahi warna hijau.*

Berikut adalah pertanyaan yang perlu dijawab dan diperbaiki oleh author.

1. Judul. Penggunaan Oksida Perovskit Ganda terlalu luas karena senyawa perovskit ganda ini sangat banyak. Sebaiknya lebih ditujukan ke senyawa (sampel) yang dibuat (diuji)

*Penulis: Telah diperbaiki sesuai yang disarankan. Judul ditulis kembali menjadi: "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*

2. Istilah SBSC73 pada abstrak (SBSC73|SDC|SBSC73 ) diberi penjelasan maksudnya apa

*Penulis: SBSC73 adalah material katoda sedangkan SBSC73|SDC|SBSC73 adalah spesimen sel simetris yang terdiri atas 3 lapisan meliputi katoda SBSC73, elektrolit SDC, dan katoda SBSC73*

3. Pada pendahuluan "Sel bahan bakar oksida padat (solid oxide fuel cells-SOFCs)". Kenapa pakai SOFCs tidak SOFC saja? Apa bedanya.

*Penulis: Terima kasih sekali koreksinya, kalimat tersebut telah disesuaikan yaitu tanpa "s".*

4. Pada pendahuluan "Namun, penurunan suhu operasional SOFC mengakibatkan penurunan aktivitas elektrokimia katoda atau (menurunkan kinerja SOFC)". Setelah atau kenapa harus pakai tanda kurung lagi?

*Penulis: kalimat dalam kurung bersifat memperjelaskan. Agar tidak menimbulkan kerancuan maka tanda kurung telah dihilangkan sehingga kalimat ditulis ulang, "Namun, penurunan suhu operasional SOFC mengakibatkan penurunan aktivitas elektrokimia katoda dan menurunkan kinerja SOFC".*

5. Bahan ini menarik perhatian luas karena kinerja konduktor ionik dan elektronik (MIEC) yang luar biasa dalam kisaran suhu menengah. Berapa kisaran suhu menengah tersebut?

*Penulis: Suhu menengah SOFC adalah 600°C-800°C. Saat ini SOFC beroperasi pada suhu tinggi yaitu 800°C-1000°C yang berakibat mahal biaya operasional.*

6. Tujuan penambahan SDC (30%) tidak ada dalam pendahuluan. Apa maksud penggunaan 73 dalam SBSC73 dan apa target yang diharapkan dengan penambahan SDC belum terlihat dalam pendahuluan.

Penulis: Terima kasih, saran yang sangat bermanfaat. Terkait hal hal tersebut telah di tambahkan pada bagian pendahuluan. Terdapat penambahan beberapa referensi.

7. Sejumlah stoikiometri serbuk  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ . Hasil sama sekali tidak ada yang menampilkan La

*Penulis: Terima kasih sekali koreksinya dan direvisi & telah ditulis ulang, "Sejumlah stoikiometri serbuk  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ..."*

8. Sejumlah stoikiometri serbuk  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ , dan  $\text{CoO}$  secara menyeluruh dicampur etanol, dan dikalsinasi di udara pada  $1100^\circ\text{C}$ . Apakah cukup dengan dicampur saja dengan etanol terus dikalsinai? Berikan prosedur yang lebih detil (apakah ada penggilingan terlebih dahulu?)

*Penulis: Terima kasih sarannya & kalimat telah ditulis dengan lebih rinci sebagai berikut, "Sejumlah stoikiometri serbuk  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ , dan  $\text{CoO}$  yang seluruhnya dicampur etanol dan giling menggunakan bola alumina selama 12 jam. Setelah dikeringkan dalam tungku selanjutnya dikalsinasi di udara pada  $1100^\circ\text{C}$  selama 4 jam"*

9. Sel simetris dengan konfigurasi SBSC73|SDC|LBSC73 dibuat menggunakan teknik sablon. Pada abstrak dibuat SBSC73|SDC|SBSC73. Mana yang betul?

*Penulis: Sel simetris dengan konfigurasi SBSC73/SDC/LBSC73 yang ditulis di bagian Hasil & Diskusi dengan yang di abstrak merupakan spesimen yang sama. Spesimen sel simetris yang terdiri atas 3 lapisan yaitu katoda SBSC73, elektrolit SDC dan katoda SBSC73 yang selanjutnya ditulis "SBSC73|SDC|LBSC73". Pembuatan spesimen ini dilakukan menggunakan teknik sablon. Prosesnya dapat dijelaskan sebagai berikut: serbuk SDC di press untuk menghasilkan pelet SDC berupa disk berukuran diameter 13 mm & tebal 1 mm selanjutnya disinter pada  $1500^\circ\text{C}$  selama 5 jam. Tahapan berikutnya, kedua sisi permukaan disk SDC disablon dengan pasta katoda SBSC73 sehingga terbentuk sel simetris SBSC73/SDC/LBSC73 dan disinter pada  $1000^\circ\text{C}$  selama 4 jam.*

10. Kurva ekspansi termal massal untuk SDC, NiO-SDC, SBSC73 dan SBSC. Untuk apa menampilkan NiO-SDC? Dalam pembahasan tidak ada sama sekali menyinggung NiO-SDC begitu juga dalam prosedur.

*Penulis: Terimakasih sekali koreksinya, gambar & kalimat terkait telah direvisi.*

11. Pada suhu yang lebih tinggi, bagian dari  $\text{Co}^{4+}$  yang lebih kecil direduksi menjadi  $\text{Co}^{3+}$  yang lebih besar. Apa maksud Co lebih kecil dan lebih besar apanya? apakah ukuran jaringannya? Lebih diperjelas lagi.

*Penulis: Hal ini terkait ukuran jaringannya dan kalimat tersebut telah ditulis ulang sebagai berikut, "Pada suhu yang lebih tinggi, ion  $\text{Co}^{4+}$  berjari-jari lebih kecil direduksi menjadi ion  $\text{Co}^{3+}$  berjari-jari lebih besar atau  $\text{Co}^{2+}$  dengan vakansi oksigen, ion  $\text{Co}^{3+}$  mudah berpindah dari low-spin ke high-spin.*

12. Secara keseluruhan doping 30 % SDC ke dalam oksida SBSC dapat menurunkan nilai TEC. Maksud dari secara keseluruhan apa? Sampelnya hanya satu SBSC73. Atau ada beberapa kali pengukuran dengan sampel yang sama atau dibuat beberapa SBSC73?

Penulis: Maksud dari keseluruhan disini adalah terkait nilai TEC dalam rentang suhu 100 °C-800 °C yaitu nilai TEC rata-rata spesimen SBSC yang didoping dengan 30 % SDC (SBSC73). Bila diamati secara seksama, grafik TEC SBSC73 bukan merupakan garis linier sehingga laju TEC setiap range suhu tertentu [100 °C-300 °C; 300 °C-600 °C, 600 °C-800°C) berbeda. Agar tidak multitafsir maka pada bagian ini kalimatnya susun kembali, “Nilai TEC rata-rata oksida SBSC yang didoping 30% SDC sebesar  $18,17 \times 10^{-6} (K^{-1})$  lebih rendah dibanding dengan oksida SBSC tanpa doping yaitu  $19,80 \times 10^{-6} (K^{-1})$  atau mengalami penurunan 8,23%

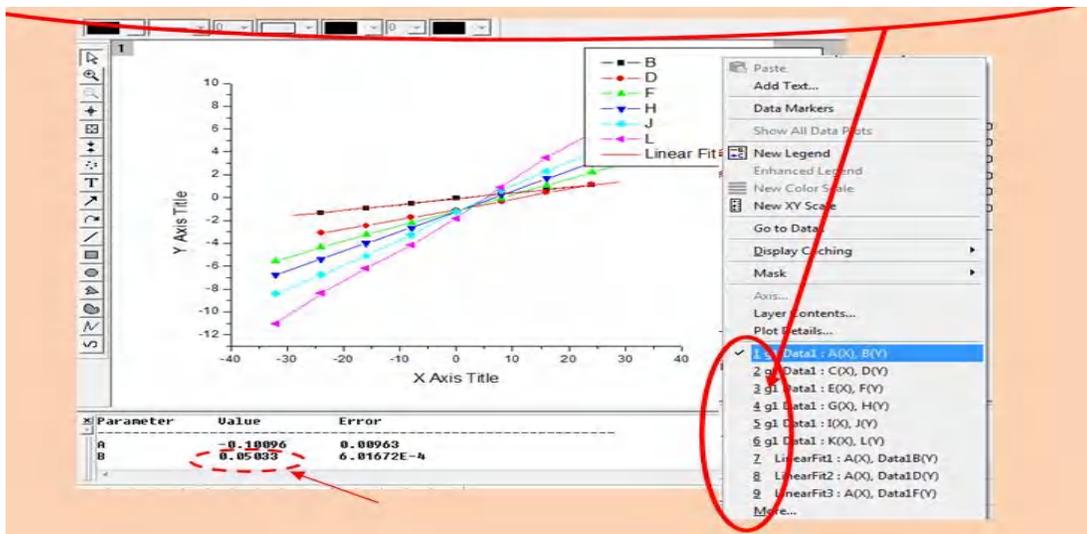
13. di mana K adalah konstanta pra-eksponensial, yang dapat dihitung dari perpotongan y, dan Ea adalah energi aktivasi reaksi. Kalimat ini dibuat dua kali. Sebelum dan sesudah gambar 3.

Penulis: Terima kasih sekali koreksinya dan naskah telah direvisi

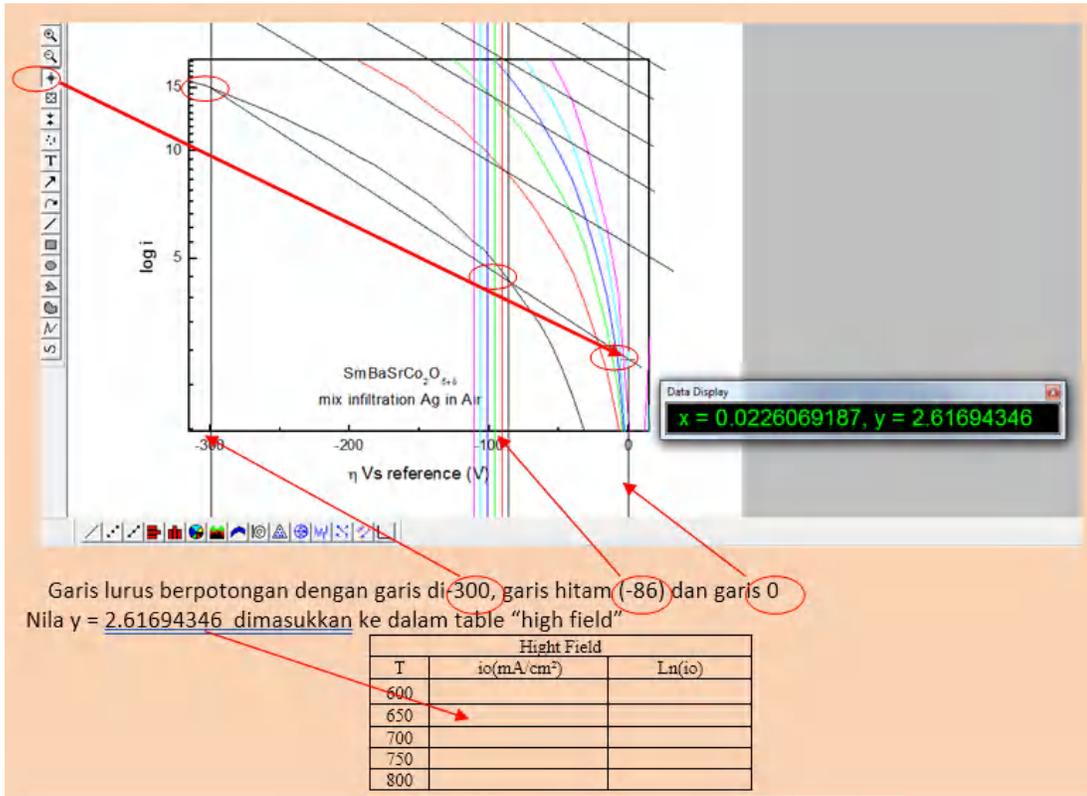
14. Gambar 4 ada dua yaitu 4a dan 4b. Tetaapi tidak ada penjelesan (diskusi) dari masing- masing gambar tersebut.

Penulis: Gambar 4a dan 4b digunakan untuk menghitung Nilai io berdasarkan teknik perhitungan High Field [HF] sehingga pada artikel tidak diberikan penjelasannya.

Gambar 4a digunakan untuk menghitung nilai io menggunakan teknik Low Field (LF). Proses perhitungan seperti di bawah ini.



Gambar 4b digunakan untuk menghitung nilai  $i_0$  menggunakan teknik High Field (HF). Proses perhitungan seperti di bawah ini.



15.  $R_p$  meningkat secara bertahap seiring waktu, yang nilainya meningkat dari  $1,98 \Omega.s$  untuk 2 jam awal hingga  $2,20 \Omega.cm^2$  selama 96 jam pengujian jangka panjang pada  $600^\circ C$ . Apa maksud dari jangka panjang dalam kalimat ini.

*Penulis: Pengujian jangka panjang yang dimaksudkan disini adalah pengujian yang dilakukan dalam waktu lama yaitu 96 jam bertujuan untuk mengetahui stabilitas kinerja spesimen sel simetris. Pada bagian ini telah ditulis kembali dengan struktur kalimat yang baku dan tidak menimbulkan multi tafsir. "Nilai resistansi polarisasi ( $R_p$ ) meningkat secara bertahap seiring perubahan waktu yaitu dari  $1,98 \Omega.cm^2$  pada 2 jam pertama menjadi  $2,20 \Omega.cm^2$  setelah 96 jam beroperasi pada  $600^\circ C$ . Nilai resistansi polarisasi katoda SBSC73 mengalami sedikit peningkatan sebesar  $0,0023 \Omega.cm^2$  per jam".*

16. Sedikit peningkatan resistensi polarisasi katodik diamati dengan peningkatan sekitar  $0,0023 \Omega.cm^2$  per jam. Buatlah kalimat Bahasa Indonesia yang benar SPOK sehingga mudah dipahami.

*Penulis: Telah diperbaiki seperti yang disarankan sehingga kalimatnya "Nilai resistensi polarisasi katoda SBSC73 mengalami sedikit peningkatan sebesar  $0,0023 \Omega.cm^2$  per jam".*

17. Pada kesimpulan ditulis karakteristik struktural tetapi dalam pembahasan hasil tidak ada menyinggung masalah struktur.

*Penulis: Terima kasih sekali sarannya. Struktural yang dimaksudkan adalah struktur mikro dan kalimat tersebut telah ditulis ulang, “Studi ini terutama menyelidiki katoda SBSC73 berkaitan dengan karakteristik ekspansi termal, oxygen content, sifat elektrokimia dan struktur mikro”.*

Sekali lagi atas saran dan arahannya yang sangat bermanfaat & berharga diucapkan terima kasih, bila masih ada yang akan dikonfirmasi, kami dengan senang hati akan menindaklanjutinya.

Adi Subardi

Prodi Teknik Mesin  
Institut Teknologi Nasional Yogyakarta  
E-mail: [subardi@itny.ac.id](mailto:subardi@itny.ac.id)

## Acceptance of your manuscript #JurnalRisetKimia-557

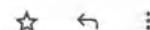
Eksternal

Kotak Masuk ×



**Jurnal Riset KIMIA UNAND** <jurnalrisetkimia@sci.unand.ac.id>  
kepada saya ▾

Sel, 20 Sep 2022, 14.13



Dear **Adi Subardi**,

Thank you for your submission of "Ekspansi Termal, Oxygen Content, dan Sifat Elektrokimia Oksida Perovskit Ganda Sebagai Katoda SOFC" and the subsequent revision. We are pleased to inform you that the above-mentioned manuscript has been **accepted for publication in Jurnal Riset Kimia** without the need for further peer review.

In accordance with the Journal policy, you are required to immediately pay the publication fee of Rp 1,000,000 by transfer to the following bank account,

Name of the account: **SURYATI**

Account No: **7152024775**

Name of the Bank and address: **PT. BANK SYARIAH INDONESIA (BSI), EX. BSM, KK PADANG UNIVERSITAS ANDALAS**

Please pay invoice within 5 days and make sure that the Beneficiary Name must be same with the above bank account data (if bank transfer). Then please send **the proof of remittance and the signed plagiarism declaration form (attached)** by email to the editorial office of Jurnal Riset Kimia (email: [jurnalrisetkimia@sci.unand.ac.id](mailto:jurnalrisetkimia@sci.unand.ac.id))

After payment, in a few days, you will receive an email for the further process, i.e. copy-editing, lay-outing, and proofreading.

Thank you for your valuable contribution to the journal.

Best regards,

---

Dr. Diana Vanda Wellia  
Editor in Chief  
Jurnal Riset Kimia  
<https://irk.fnipa.unand.ac.id>

## Ekspansi Termal, *Oxygen Content*, dan Sifat Elektrokimia Oksida Perovskit Ganda Sebagai Katoda SOFC

### 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

**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  $125.3 \text{ kJ mol}^{-1}$ ,  $60.6 \text{ kJ mol}^{-1}$ , and  $62.5 \text{ kJ mol}^{-1}$ , respectively. Long term testing of cathodic polarization resistance for symmetric cells SBSC73|SDC|SBSC73 at 600 °C for 96 h was carried out with an increase in the rate of  $0.30\% \text{ h}^{-1}$ . The SBSC73|SDC|SBSC73 symmetric cell test for 96 hours at 600 °C showed an increase in the average polarization resistance value of  $0.30\% \text{ h}^{-1}$ . The cathode grains are evenly distributed with a size of 2-3  $\mu\text{m}$  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<sup>[1]</sup>. Kendala utama implementasi SOFC secara massal karena perangkat ini beroperasi pada temperatur tinggi sehingga penggunaan bahan bakar menjadi mahal, sementara suhu operasi yang lebih rendah menyebabkan *over potential* yang tinggi di lapisan katoda menyebabkan kinetika reduksi oksigen lamban<sup>[2][3]</sup>. 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 lamban, menurunkan aktifitas elektrokimia katoda dan menurunkan kinerja SOFC<sup>[2][3]</sup>. 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. Namun, penurunan suhu operasional SOFC

mengakibatkan penurunan aktivitas elektrokimia katoda atau (menurunkan kinerja SOFC). Telah digabung dgn kalimat di atas

Katoda menjadi faktor utama dalam yang menentukan kinerja sel secara keseluruhan sehingga elektroda baru dengan aktivitas elektrokatalitik tinggi sangat penting untuk IT-SOFC<sup>[4][5]</sup>. 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<sup>[6][7][8]</sup>. Bahan ini menarik perhatian luas karena kinerja konduktor ionik dan elektronik (MIEC) yang luar biasa dalam kisaran suhu menengah 500 °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<sup>[9]</sup>.

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<sup>[10]</sup>. Untuk meningkatkan mobilitas oksigen di bidang LnO, banyak peneliti mencoba untuk menggabungkan lantanida dan logam alkali tanah yang berbeda ke dalam situs A dari perovskit ganda yang kekurangan oksigen (*oxygen deficient*) seperti  $\text{NdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[11]</sup>,  $\text{GdBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[12][13]</sup>,  $\text{PrBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[14]</sup>,  $\text{YBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[15]</sup>,  $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[16][17]</sup>. 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  $\text{NdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[11]</sup>,  $\text{GdBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[12][13]</sup>,  $\text{PrBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[14]</sup>,  $\text{YBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[15]</sup>,  $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[16][17]</sup>. 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<sup>[18]</sup>. Kim et al. (2008) mengusulkan bahwa substitusi Sr untuk Ba di  $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$  meningkatkan stabilitas kimia antara katoda dan elektrolit, dan mempercepat transportasi oksigen<sup>[19]</sup>. 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<sup>[19]</sup>. 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 laporkan sebelumnya<sup>[20][21]</sup>. Berdasarkan laporan yang disebutkan di atas, disimpulkan bahwa substitusi  $\text{Sr}^{2+}$  untuk situs  $\text{Ba}^{2+}$  menghasilkan konduktivitas listrik yang lebih tinggi dan kinerja elektrokimia yang lebih baik dari oksida perovskit ganda. Dalam penelitian ini, oksida perovskit ganda SBSC73 dipilih sebagai bahan katoda. Koefisien ekspansi termal, *oxygen content*, dan sifat elektrokimia dengan pengujian jangka panjang telah dievaluasi. Berdasarkan berbagai sumber di atas, substitusi  $\text{Sr}^{2+}$  ke dalam unsur  $\text{Ba}^{2+}$  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.

## Metode Penelitian

### Bahan Kimia

Empat jenis serbuk oksida logam dengan tingkat kemurnian antara 98%–99,9% diperoleh dari berbagai produsen luar negeri digunakan untuk pembuatan katoda. Serbuk oksida logam meliputi 4 jenis dengan tingkat kemurnian antara 98%–99,9% diperoleh dari berbagai produsen luar negeri digunakan untuk pembuatan katoda. Serbuk  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (99%, Wako Pure Chemical Industries, Ltd.),  $\text{SrCO}_3$  (98%, Shimakyu chemical Co., Ltd),  $\text{BaCO}_3$  (98.8%, Showa Chemical Industries, Ltd.) dan  $\text{CoO}$  (99,9%, Choneye Pure Chemical Co., Ltd.) digunakan sebagai raw material. Cerium nitrate (Uranus Chemicals Co, Ltd) digunakan untuk pembuatan elektrolit. Amonia water ( $\text{NH}_4\text{OH}$ , Choneye Pure Chemicals) sebagai larutan pada pembuatan serbuk elektrolit.

### Peralatan

Peralatan yang digunakan antara lain 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.

### Fabrikasi Spesimen

Bubuk 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  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ , dan  $\text{CoO}$  secara menyeluruh dicampur etanol, dan dikalsinasi di udara pada  $1100^\circ\text{C}$  selama 4 jam.~~ Sejumlah stoikiometri serbuk  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ , dan  $\text{CoO}$  yang seluruhnya dicampur etanol dan giling menggunakan bola alumina selama 12 jam. Setelah dikeringkan dalam tungku selanjutnya dikalsinasi di udara pada  $1100^\circ\text{C}$  selama 4 jam. Serbuk  $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{1.9}$  (SDC) disintesis dengan metode kopresipitasi menggunakan  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  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  $600^\circ\text{C}$  selama 2 jam di udara. ~~Pelet serbuk SDC berukuran diameter 13 mm dan tebal 1 mm. Cakram SDC sel simetris tersebut disinter pada  $1500^\circ\text{C}$  selama 5 jam.~~ Serbuk SDC di press untuk menghasilkan pelet SDC berupa disk berukuran diameter 13 mm & tebal 1 mm selanjutnya disinter pada  $1500^\circ\text{C}$  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  $0,385\text{ cm}^2$ .

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 °C selama 4 jam.

## Pengukuran

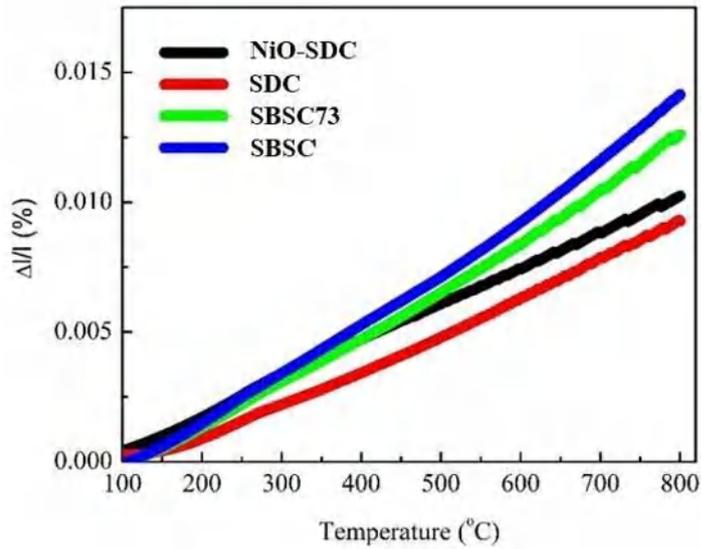
Pengujian ~~spesimen~~ serbuk katoda SBSC73 terkalsinasi dilakukan dengan menggunakan penganalisis termogravimetri (TGA; SII TG/DTA 6300) di udara statis dari suhu kamar hingga 800 °C menggunakan **dengan** laju pemanasan konstan 10 °C/menit. Data pengujian TGA digunakan untuk menentukan nilai *oxygen content*. Pengujian sel simetris dilakukan di bawah tekanan atmosfer  $p(\text{O}_2) = 0,21$  atm dalam rentang suhu ~~mulai dari~~ 600 °C hingga 800 °C ~~pada~~ **dengan** interval 50 °C **dilakukan** dalam tungku. Pengukuran impedansi AC sel simetris dilakukan dengan menggunakan potensiostat VoltaLab PGZ301 dengan frekuensi ~~yang diterapkan~~ dalam rentang 100 kHz hingga 0,1 Hz dengan amplitudo sinyal AC 10 mV.

*Linear sweep voltammetry* diukur antara -0.4 and 0.1 V dengan *sweep rate* 0.5 mV s<sup>-1</sup> versus ER. Pengujian **ekspansi termal** ~~thermal expansion coefficient (TEC)~~ menggunakan *thermomechanical analyzer* (TMA; Hitachi TMA7300) dengan laju pemanasan konstan 10 °C/menit dalam ~~kisaran~~ **rentang** suhu 25 °C -800 °C. Pengujian *long-term* dilakukan selama 96 jam tanpa henti pada suhu 600 °C di dalam tungku untuk mengukur ketahanan kinerja sel simetris.

## Hasil Dan Diskusi

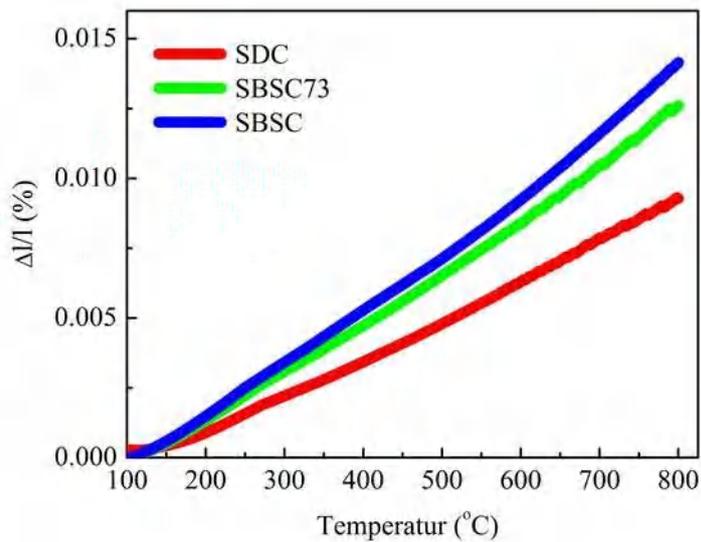
~~Koefisien ekspansi termal (TEC) adalah properti penting untuk bahan katoda, karena mengatur kinerja sel tunggal. Kurva ekspansi termal massal untuk SDC, NiO SDC, SBSC73 dan SBSC dilakukan dari suhu kamar hingga 800 °C menggunakan penganalisis termomekanis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.~~

**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 °C menggunakan penganalisis termomekanis.** Spesimen SBSC73 dan SBSC menunjukkan ekspansi linier di zona suhu rendah (100 °C -275 °C) dan mengalami sedikit peningkatan kemiringan pada wilayah suhu yang lebih tinggi (275 °C -800 °C). ~~Pada suhu yang lebih tinggi, bagian dari Co<sup>4+</sup> yang lebih kecil direduksi menjadi Co<sup>3+</sup> yang lebih besar atau Co<sup>2+</sup> dengan kehilangan oksigen, ion Co<sup>3+</sup> mudah berpindah dari keadaan spin rendah ke spin tinggi<sup>[20]</sup>.~~ **Pada suhu yang lebih tinggi, ion Co<sup>4+</sup> berjari-jari lebih kecil direduksi menjadi ion Co<sup>3+</sup> berjari-jari lebih besar atau Co<sup>2+</sup> dengan vakansi oksigen, ion Co<sup>3+</sup> mudah berpindah dari low- spin ke high-spin<sup>[22]</sup>.**



Gambar 1. Koefisien ekspansi termal anoda NiO-SDC, elektrolit SDC, katoda SBSC73 & SBSC.

Revisi Gambar 1



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

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

Samples	NiO-SDC	SDC	SBSC73	SBSC
(K <sup>-1</sup> )	14,08 x (10 <sup>-6</sup> )	13,53 x (10 <sup>-6</sup> )	18,17 x (10 <sup>-6</sup> )	19,80 x (10 <sup>-6</sup> )

Revisi Tabel 1

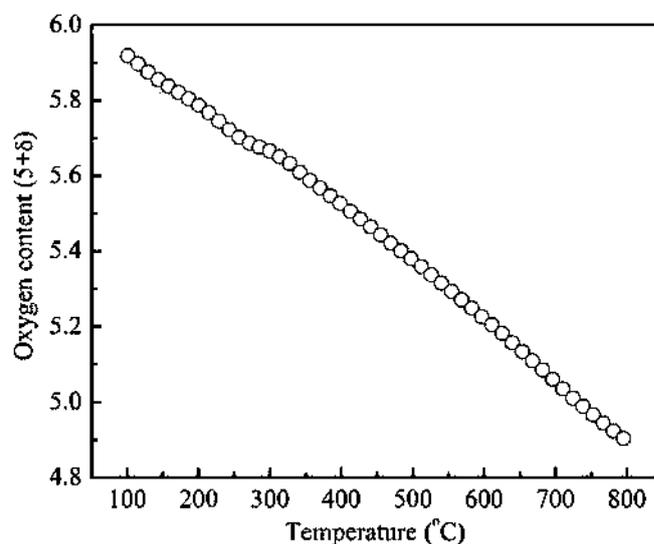
Tabel 1. Nilai TEC anoda NiO-SDC, elektrolit SDC, Katoda SBSC73 & SBSC

Samples	SDC	SBSC73	SBSC
(K <sup>-1</sup> )	13,53 x (10 <sup>-6</sup> )	18,17 x (10 <sup>-6</sup> )	19,80 x (10 <sup>-6</sup> )

Secara keseluruhan doping 30 % SDC ke dalam oksida SBSC dapat menurunkan nilai TEC dari  $19,80 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$  menjadi  $18,17 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$  sesuai dengan tujuan penelitian. 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<sup>[23]</sup>. Hasil serupa telah dilaporkan sebelumnya untuk katoda perovskit berlapis ganda. Misalnya, TEC dalam kisaran suhu  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ – $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  di udara untuk  $\text{PrBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ ,  $\text{NdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$  dan  $\text{SmBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$  adalah  $21,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $21,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  dan  $19,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , masing-masing<sup>[22]</sup>, nilai TEC katoda  $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$  antara  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  dan  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  adalah  $20,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ <sup>[23]</sup>. 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  $19,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ <sup>[24]</sup>. Sedangkan nilai TEC katoda  $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$  sebesar  $20,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  pada rentang suhu  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ – $900 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[25]</sup>.

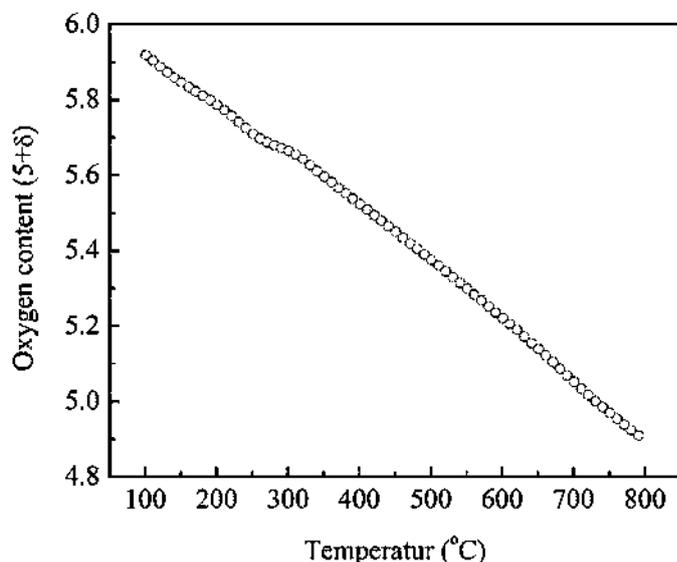
### Oxygen Content

Untuk membuktikan *oxygen content* ( $5+\delta$ ) untuk SBSC73, analisis termogravimetri dilakukan pada  $p(\text{O}_2) = 0,21 \text{ atm}$  sebagai fungsi suhu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Analisis termogravimetri dilakukan untuk membuktikan *oxygen content* ( $5+\delta$ ) 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  $\text{Co}^{4+}$  menjadi  $\text{Co}^{3+}$  atau  $\text{Co}^{3+}$  menjadi  $\text{Co}^{2+}$  dengan meningkatnya suhu, sehingga *oxygen content* ( $5+\delta$ ) menurun terhadap pengurangan suhu<sup>[26]</sup>. 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  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  menjadi 4,90 pada temperatur  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tabel 2 memuat data *oxygen content* ( $5+\delta$ ) secara terperinci sebagai fungsi suhu.



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

Revisi Gambar 2



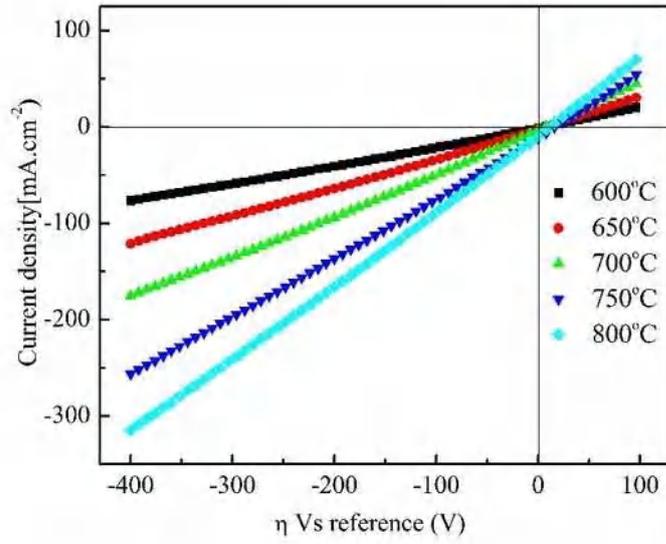
Tabel 2. *Oxygen content (5+δ)* katoda sebagai fungsi suhu pada OPP = 0,21 atm

<i>Oxygen content (5+δ)</i>							
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

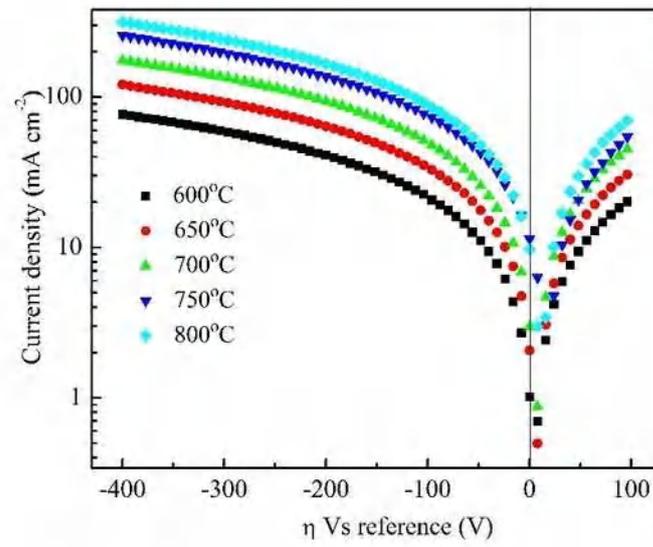
Nilai *exchange current density* ( $i_0$ ) merupakan informasi penting untuk mengevaluasi laju reduksi oksigen intrinsik dan sifat elektrokimia katoda. Nilai  $i_0$  sebanding dengan kapasitas reaksi reduksi oksigen untuk katoda. Nilai  $i_0$  dapat diperoleh melalui teknik pengujian yang berbeda. Dalam studi ini, nilai  $i_0$  diidentifikasi menggunakan teknik elektrokimia impedansi spektrometri (EIS), low-field (LF) dan high-field (HF). Untuk teknik LF, nilai  $i_0$  diidentifikasi dari kemiringan plot  $i$  vs.  $\eta$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (a). Untuk teknik HF, nilai  $i_0$  dapat diperoleh dari perpotongan  $y$  dari  $i$  vs.  $\eta$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (b). Perhitungan nilai  $i_0$  menggunakan teknik LF dengan cara mengidentifikasi dari kemiringan plot  $i$  vs.  $\eta$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (a). Perhitungan nilai  $i_0$  menggunakan teknik HF diperoleh dari perpotongan  $y$  dari plot  $i$  vs.  $\eta$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (b). Informasi rinci mengenai teknik ini dapat merujuk pada makalah yang diterbitkan kelompok kami<sup>[27]</sup>. Energi aktivasi ( $E_a$ ) untuk ORR diidentifikasi dari kemiringan plot Arrhenius, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan berikut.

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

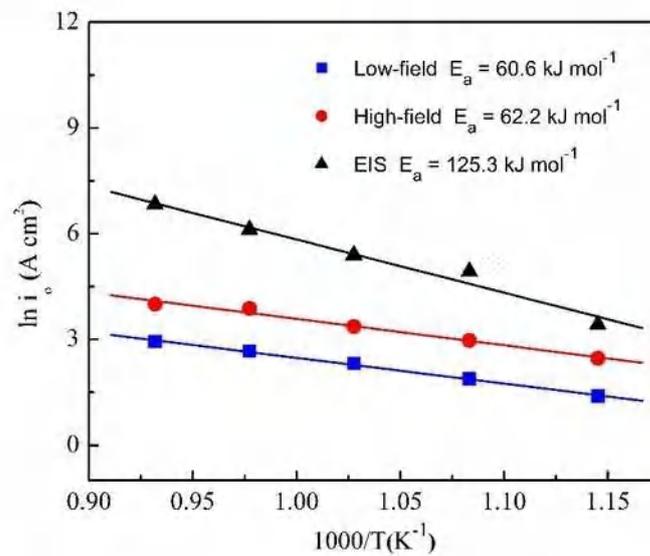
Di mana  $K$  adalah konstanta pra-eksponensial yang dapat dihitung dari perpotongan  $y$ , dan  $E_a$  adalah energi aktivasi reaksi



(a)



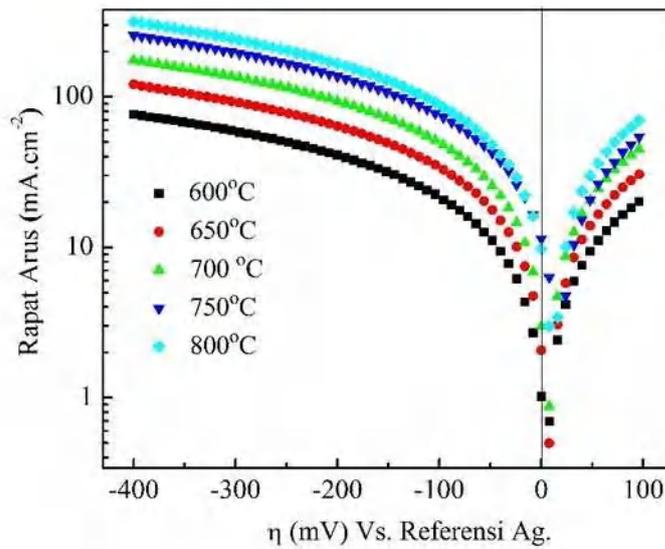
(b)



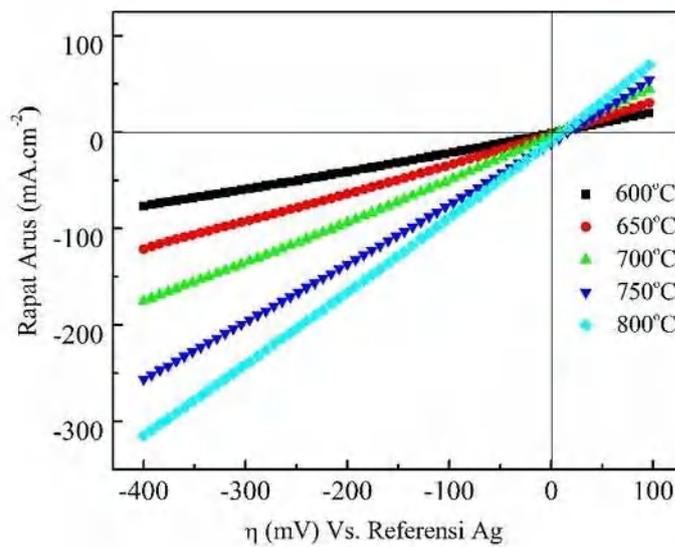
(c)

Gambar 3. (a) Cyclic voltammogram, (b) Tafel plot pada  $0,5 \text{ mVs}^{-1}$  antara 100 mV dan -400 mV katoda SBSC73 pada rentang  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ - $800 \text{ }^\circ\text{C}$  dan (c) Plot Arrhenius dari ORR katoda SBSC73 .

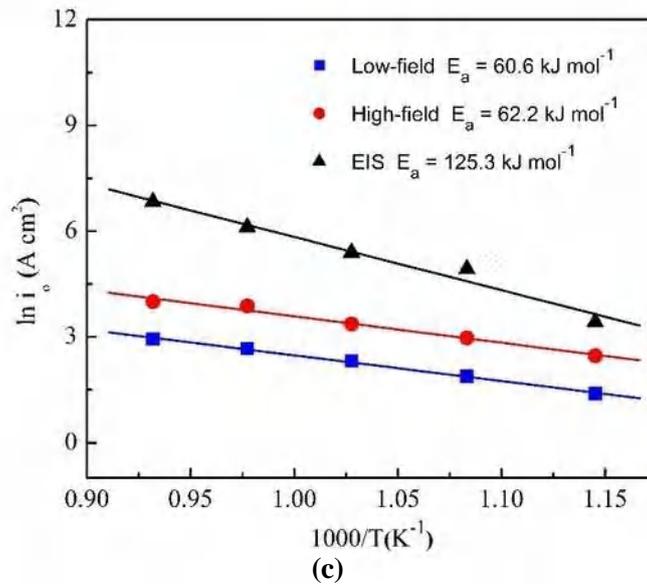
Revisi Gambar 3(a) & 3(b). Gambar 3(c) tidak ada revisi, masih sama dengan sebelumnya



(a)



(b)



Gambar 3. (a) Cyclic voltammogram, (b) Tafel plot pada 0,5 mVs<sup>-1</sup> antara 100 mV dan -400 mV katoda SBSC73 pada rentang 600 °C-800 °C dan (c) Plot Arrhenius dari ORR katoda SBSC73

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 kJ mol<sup>-1</sup>, 60,6 kJ mol<sup>-1</sup> dan 62,5 kJ mol<sup>-1</sup>. 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  $\text{SmBa}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ <sup>[28]</sup>, hasil ini menunjukkan bahwa SBSC73 adalah kandidat katoda untuk SOFC karena aktivitas elektrokatalitiknya yang tinggi.

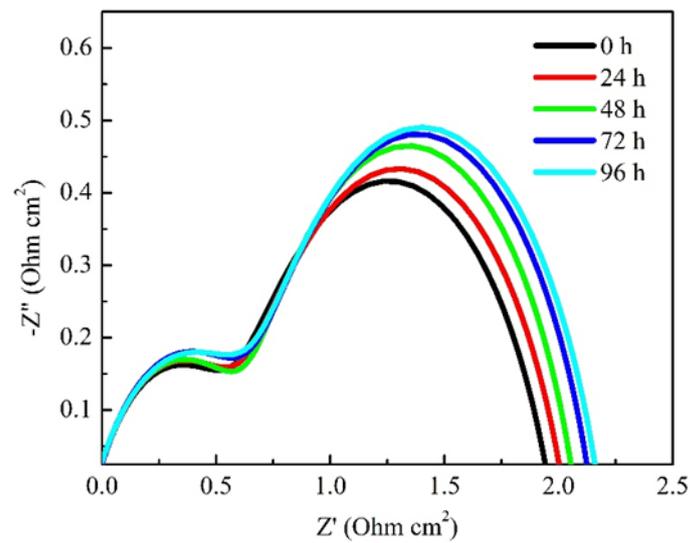
### Long-term testing

Untuk mengevaluasi stabilitas sel simetris SBSC73|SDC|SBSC73 untuk waktu yang lama, kinerja SBSC73|SDC|SBSC73 sel simetris diuji, dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS) dan *polarization resistance* ( $R_p$ ) dicatat sebagai fungsi waktu di bawah udara stasioner sebagai oksidan pada 600 °C sebagai ditunjukkan pada Gambar 4. 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.

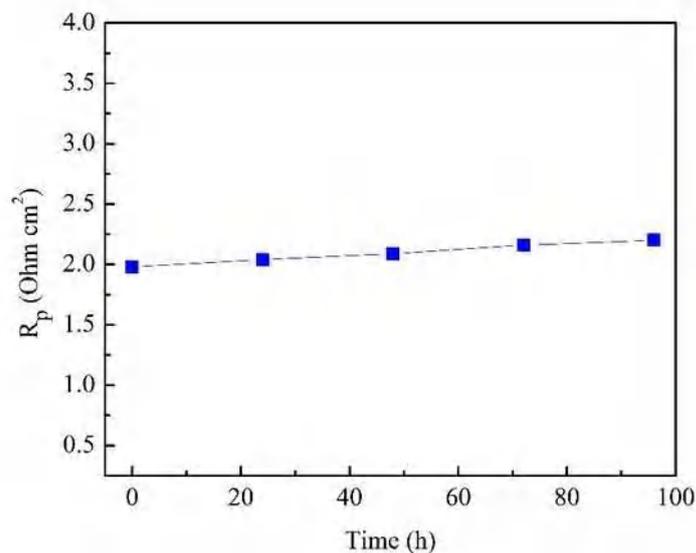
Nilai  $R_p$  meningkat secara bertahap seiring waktu yaitu dari 1,98  $\Omega \cdot \text{s}$  untuk 2 jam awal hingga 2,20  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  selama 96 jam pada 600 °C. Sedikit peningkatan nilai resistensi polarisasi katodik sebesar 0,0023  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  per jam. Nilai resistansi 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  $2\text{--}3 \mu\text{m}$  dan cenderung porous.



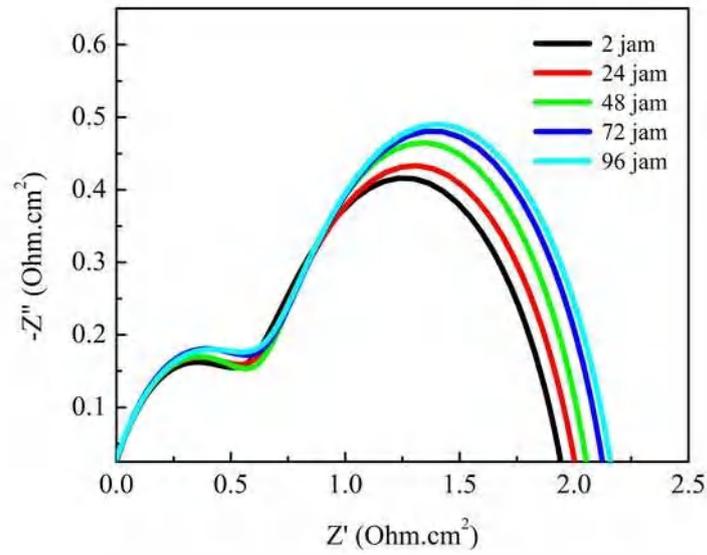
(a)



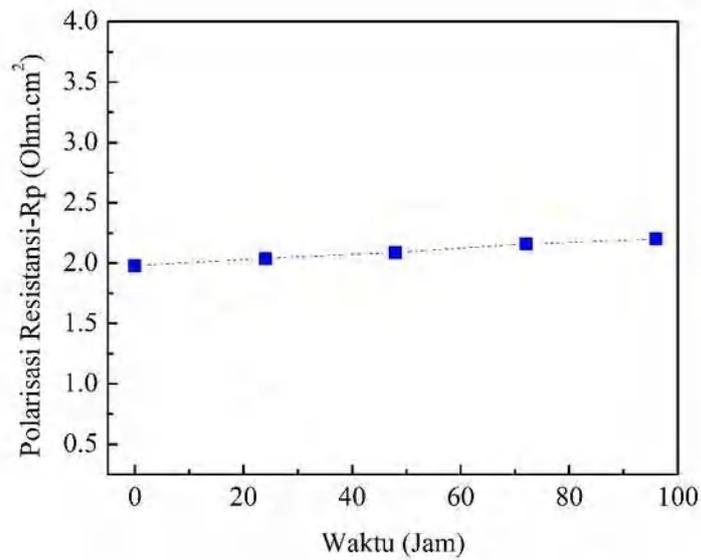
(b)

Gambar 4. Pengujian *Long-term* sel simetris SBSC73|SDC|SBSC73 pada 600 °C: (a) Diagram Nyquist impedansi spektroskopi dan (b) resistansi polarisasi ( $R_p$ ).

Revisi Gambar 4(a) & 4(b)

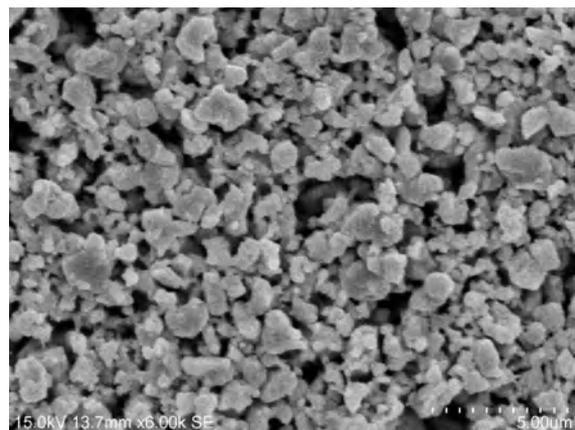


(a)



(b)

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



(a)

(b)

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  $18,17 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$  pada suhu antara  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . *Oxygen content* berkurang cukup signifikan selama pemanasan yaitu 5,90 pada suhu  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  menjadi 4,90 pada suhu  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Energi aktivasi diidentifikasi menggunakan teknik EIS, LF dan HF masing-masing adalah  $125,3 \text{ kJ mol}^{-1}$ ,  $60,6 \text{ kJ mol}^{-1}$  dan  $62,5 \text{ kJ mol}^{-1}$ . 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  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ – $800^\circ\text{C}$ .

## 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

Revisi DAFTAR PUSTAKA berdasarkan *style* melalui link berikut:

<http://cs1.mendeley.com/styles/485963021/Jurnal-Riset-Kimia>

1. Ding, D., Lai, S. Y., Gerdes, K. & Liu, M., Enhancing SOFC Cathode Performance by Surface Energy & Environmental Science modification through infiltration. *Energy Environ. Sci.*, **7**: 552–575 (2014).
2. Mushtaq, N., Lu, Y., Xia, C., Dong, W., Wang, B., Wang, X., Shah, M. A. K. Y., *et al.*, Design principle and assessing the correlations in Sb-doped catalytic performance. *J. Catal.*, **395**: 168–177 (2021).
3. Yoo, Y.-S., Namgung, Y., Bhardwaj, A. & Song, S.-J., A Facile Combustion Synthesis Route for Performance Enhancement of  $\text{LaSr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF6428) as a Robust Cathode Material for IT-SOFC. *J. Korean Ceram. Soc.*, **56(5)**: 497–505 (2019).

4. Bedon, A., Rieu, M., Viricelle, J. & Glisenti, A., Rational Development of IT-SOFC Electrodes Based on the Nanofunctionalization of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_3$  with Oxides. PART 1: Cathodes by Means of Iron Oxide. *ACS Appl. Energy Mater.*, **1(12)**: 6840–6850 (2018).
5. 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).
6. Meng Li, K. C., Hua, B., Luo, J., Rickard, W. D. A., Jian Li, J. T. S. I. & Jiang, and S. P., 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).
7. V. A., Chen, K., Li, N., Ai, N., Li, M., Cheng, Y., Rickard, W. D. A., *et al.*, Direct application of cobaltite-based perovskite cathodes on the yttria-stabilized zirconia oxide fuel cells. *J. Mater. Chem. A*, **4(45)**: 17678–17685 (2016).
8. Can Sındırac, S. A., Formation of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  cathode materials from precursor salts by heating in contact with CGO electrolyte. *Int. J. Hydrogen Energy*, **41(40)**: 18157–18165 (2016).
9. Liu, Y., Bi, J., Chi, B., Pu, J. & Jian, L., Effects of impregnating palladium on catalytic performance of LSCF-GDC composite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, **41(15)**: 6486–6492 (2016).
10. Pang, S., Wang, W., Chen, T., Wang, Y., Xu, K., Shen, X., Xi, X., *et al.*, The effect of potassium on the properties of  $\text{PrBa}_{1-x}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$  ( $x = 0.00-0.10$ ) cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, **41(31)**: 13705–13714 (2016).
11. Hyun, J. & Irvine, J. T. S., Characterization of layered perovskite oxides  $\text{NdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$  ( $x = 0$  and  $0.5$ ) as cathode materials for IT-SOFC. *Int. J. Hydrogen Energy*, **37(7)**: 5920–5929 (2012).
12. Kuroda, C., Zheng, K. & Swierczek, 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 (2012).
13. Junyoung Kim, Areum Jun, Jeeyoung Shin, and G. K., 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).
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. & 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)**: 1489–1495 (2016).
  16. 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).
  17. 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).
  18. Mckinlay, A., Connor, P., Irvine, J. T. S. & Zhou, W., Structural Chemistry and Conductivity of a Solid Solution of  $\text{YBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ . *J. Phys. Chem. C*, **111(51)**: 19120–19125 (2007).
  19. Kim, J., 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–B1028 (2008).
  20. 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).
  21. Tsvetkova, N. S., Zuev, A. Y. & Tsvetkov, D. S., Investigation of  $\text{GdBaCo}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{6-\delta}$  ( $x = 0, 0.2$ ) -  $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_2$  composite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *J. Power Sources*, **243**: 403–408 (2013).
  22. Huang, K., Lee, H. Y. & Goodenough, J. B., Sr and Ni Doped  $\text{LaCoO}_3$  and  $\text{LaFeO}_3$  Perovskites: New Cathode Materials for Solid - Oxide Fuel Cells. *J. Electrochem. Soc.*, **145(9)**: 33220–33227 (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., Lu, 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  $\text{LaBaCoO}$ . *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).

#### Daftar Pustaka

1. Ding, D., Li, X., Lai, S. Y., Gerdes, K. & Liu, M., Enhancing SOFC performance by surface modification through infiltration. *Energy Environ Sci.*, **7(2)**: 552–575 (2014).
1. Mushtaq, N., Lu, Y., Xia, C., Dong, W., Wang, B., Wang, X., Yousaf Shah, M. A. K., Rauf, S., Jingjing, N., Hu, E., Xiao, H., Raza, R., Kim, J. S. & B. Zhu, B., Design principle and assessing the correlations in Sb-doped  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\delta}$  perovskite oxide for enhanced oxygen reduction catalytic performance. *Journal of Catalysis*, **395**: 168–177 (2021).
2. Yoo, Y. S., Namgung, Y., Bhardwaj, A. & Son, S. J., A Facile Combustion Synthesis Route for Performance Enhancement of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$  (LSCF6428) as a Robust Cathode Material for IT-SOFC. *J. Korean Ceram. Soc.*, **56(6)**: 497–505 (2019).
3. Bedon, A., Rieu, M., Viricelle, J. P. & Glisenti, A., Rational Development of IT-SOFC Electrodes Based on the Nanofunctionalization of  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Ga}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_{3-\delta}$  with Oxides. PART 1: Cathodes by Means of Iron Oxide. *Appl. Energy Mater.*, **1(12)**: 6840–6850 (2018).
4. 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*, **15(141)**: 1–31 (2022).
5. Li, M., Chen, K., Hua, B., Luo, J. L., Rickard, W. D. A., Li, J., Irvine, J. T. S. & Jia, S. P., 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)

6. Chen, K., Li, N., Ai, N., Li, M., Cheng, Y., Rickard, W. D. A., Li, J. & Jiang, S. P., 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**: 17678–17685 (2016).
7. Sindirac, C. & Akkurt, S., Formation of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$  cathode materials from precursor salts by heating in contact with CGO electrolyte. *Int J Hydrogen Energy*, **41(40)**: 18157–18165 (2016).
8. Liu, Y., Bi, J., Chi, B., Pu, J. & Jian, L., Effects of impregnating palladium on catalytic performance of LSCF-GDC composite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Int J Hydrogen Energy*, **41(15)**: 6484–6492 (2016).
9. Pang, S., Wang, W., Chen, T., Wang, Y., Xu, K. & Shen, X., The effect of potassium on the properties of  $\text{PrBa}_{1-x}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$  ( $x=0.00-0.10$ ) cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Int J Hydrogen Energy*, **41(31)**: 13705–13714 (2016).
10. Kim, J. H. & Irvine, J. T. S., Characterization of layered perovskite oxides  $\text{NdBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$  ( $x=0$  and  $0.5$ ) as cathode materials for IT-SOFC. *Int J Hydrogen Energy*, **37(7)**: 5920–5929 (2012).
11. Kuroda, C., Zheng, K. & Swierczek, 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).
12. Kim, J., Jun, A., Shin, J. & Kim, G., Effect of Fe-doping on layered  $\text{GdBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$  perovskite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *J Am Ceram Soc.*, **97(2)**: 651–656 (2014).
13. 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).
14. Joo, S., Kim, J., Shin, J. & Kim, G., Investigation of a Layered Perovskite for IT-SOFC Cathodes: B-Site Fe-Doped  $\text{YBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\delta}$ . *Journal of The Electrochemical Society*, **163(14)**: F1489–F1495 (2016).
15. 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 Eng.*, **37(23)**: 18381–18388 (2012).
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. McKinlay, A., Connor, P., Irvine, J. T. S. & Zhou, W. Z., Structural chemistry and conductivity of solid solution  $\text{YBa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ . *J Phys Chem C*, **111(51)**: 19120–19125 (2007).
18. 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)**: B1023–1028 (2008).
19. Huang, H., Lee, H. Y. & Goodenough, J. B., Sr and Ni Doped  $\text{LaCoO}_3$  and  $\text{LaFeO}_{3-\delta}$  perovskites: new cathode materials for solid oxide fuel Cells. *J. Electrochem. Soc.*, **145(9)**: 3220–3227 (1998).
20. 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).
21. Che, X., Shen, Y., Li, H. & He, T., Assessment of  $\text{LnBaCo}_{1.6}\text{Ni}_{0.4}\text{O}_{5+\delta}$  (Ln = Pr, Nd, and Sm) double perovskites as cathodes for intermediate-temperature solid-oxide fuel cells. *J. Power Sources*, **222**: 288–293 (2013).
22. 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).
23. Shengli, P., Jiang, X. N., Li, X. N., Wang, Q. & Zhang, Q. Y., Structural stability and high-temperature electrical properties of cation ordered/disordered perovskite  $\text{LaBaCoO}_{3-\delta}$ . *Materials Chemistry and Physics*, **131(3)**: 642–646 (2012).
24. 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).
25. Subardi, A., Chen, C. C. & Fu, Y. P., Oxygen transportation, electrical conductivity and electrochemical properties of layered perovskite  $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$ . *International Journal of Hydrogen Energy*, **42(8)**: 5284–5294 (2017).