

**SYNTHESIS AND PROPERTY STUDY OF Ni-BASED CATHODE FOR  
IT-SOFCs**

Thitirat Inprasit

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy  
The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University  
in Academic Partnership with  
The University of Michigan, The University of Oklahoma,  
and Case Western Reserve University

2014

I28369336

**Thesis Title:** Synthesis and Property Study of Ni-Based Cathode for  
IT-SOFCs  
**By:** Thitirat Inprasit  
**Program:** Polymer Science  
**Thesis Advisors:** Assoc. Prof. Sujitra Wongkasemjit  
Dr. Pimpa Limthongkul

---

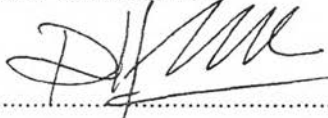
Accepted by The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.



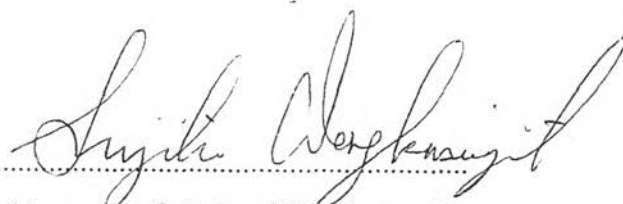
..... College Dean

(Asst. Prof. Pomthong Malakul)

**Thesis Committee:**



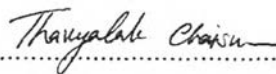
.....  
(Asst. Prof. Pomthong Malakul)



.....  
(Assoc. Prof. Sujitra Wongkasemjit)



.....  
(Dr. Pimpa Limthongkul)



.....  
(Asst. Prof. Thanyalak Chaisuwan)



.....  
(Asst. Prof. Bussarin Ksapabutr)

**ABSTRACT**

5092003063: Polymer Science Program  
Thitirat Inprasit: Synthesis and Property Study of Ni-Based Cathode  
for IT-SOFCs  
Thesis Advisor: Assoc. Prof. Sujitra Wongkasemjit, and Dr. Pimpa  
Limthongkul 109 pp.  
Keywords: Ruddlesden-Popper/ Double perovskite/ Sol-Gel process/ SOFCs/  
Cathode

This thesis focuses on improvements of cathode materials for IT-SOFCs through an investigation of new synthesis route and new materials with A and B site substitution on Ni-based perovskite structure. The work was divided into three parts. The first part focuses on an investigation of a new synthesis route to obtain IT-SOFCs cathode  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$  with improved properties. In this work,  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$  ( $x \leq 0.8$ ) were, for the first time, successfully synthesized via a simple room-temperature sol-gel process using a water-based solvent. The  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$  compounds were found to be more stable than the non-substituted  $\text{La}_2\text{NiO}_4$  with more superior properties in term of thermal expansion coefficient matching to that of electrolyte and in term of electrical conductivity. The second part involved a more in depth investigation on the effect of Sr substitution on oxygen content and structure in relation to transport properties of the materials synthesized in the first part. Oxygen tracer diffusivity was found to follow an increasing trend with increasing oxygen content. Consequently, the highest diffusion coefficient was found for the minimum amount of Sr substitution and continuously decreasing with  $x$  until  $x = 0.6$ . An unusual increase in  $D^*$  was observed when the Sr content increased up to  $x = 0.8$ . The last part of the thesis focuses on the development of two new cathodes.  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{NbO}_9$  and  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{TaO}_9$  double perovskite materials were successfully synthesized in this work. However, low conductivities of the two new compositions were found and thus, further improvements are needed.

## บทคัดย่อ

จูติรัตน์ อินทร์ประสิทธิ์: การสังเคราะห์ และศึกษาสมบัติของสารประกอบ Perovskites ที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบ เพื่อใช้เป็นคาโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของของแข็งที่ใช้ในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Synthesis and Property Study of Ni-Based Cathode for IT-SOFCs) อ. ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์ และดร. พิมพ์ ล้อมทองกุล 109 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุเพื่อใช้เป็นคาโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของของแข็งที่ใช้ในช่วงอุณหภูมิปานกลาง โดยเน้นการศึกษาวิธีการสังเคราะห์และวัสดุชนิดใหม่ของสารประกอบ Perovskite ที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบ โดยการเติมธาตุที่เหมาะสมลงในโครงสร้าง งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกของงานวิจัยเป็นการศึกษาสังเคราะห์สารประกอบที่มีการเติมสตรอนเทียม (Sr) ลงในสารประกอบแลนทานัมนิกเกิลออกไซด์ประเภท Ruddlesden-Popper ( $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_{4+\delta}$ ,  $x \leq 0.8$ ) เพื่อพัฒนาสมบัติสำหรับใช้เป็นคาโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของของแข็งที่ใช้ในช่วงอุณหภูมิปานกลาง การศึกษาในส่วนนี้พบว่าสามารถสังเคราะห์โดยวิธี โซล-เจล (Sol-gel process) ที่อุณหภูมิห้องโดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย และพบว่า การเติมสตรอนเทียมส่งผลให้สารประกอบที่มีเฟสซึ่งความเสถียรมากกว่าสารประกอบที่ไม่มีการเติมสตรอนเทียม ( $\text{La}_2\text{NiO}_4$ ) ซึ่งการเติมสตรอนเทียมยังสามารถลดค่าและแก้ปัญหาค่าอัตราการขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient) ให้มีค่าใกล้เคียงกับส่วนประกอบอื่นๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเฉพาะอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้ยังให้ค่าการนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) สูงอีกด้วย ในส่วนที่สองของงานวิจัยเป็นการศึกษาผลของปริมาณของสตรอนเทียมต่อปริมาณออกซิเจนและโครงสร้างในเชิงความสัมพันธ์ด้านคุณสมบัติการนำของไอออนของสารประกอบนี้ พบว่าสภาพการแพร่ผ่านของออกซิเจนไอออนมีแนวโน้มขึ้นกับปริมาณของออกซิเจนที่มีในโครงสร้างของสารประกอบ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (diffusion coefficient) พบว่ามีค่าสูงสุดเมื่อมีการเติมสตรอนเทียมในปริมาณที่น้อย และจะมีค่าลดลงจนกระทั่งปริมาณของสตรอนเทียมในอัตราส่วน 0.6 โดยโมล อย่างไรก็ตามยังพบว่าโดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านจะเพิ่มขึ้นอย่างมากอีกครั้งเมื่อสตรอนเทียมถูกเติมในอัตราส่วนมากถึง 0.8 โดยโมล ในส่วนสุดท้ายของงานวิจัยเป็นการศึกษาและสังเคราะห์สารประกอบกลุ่มใหม่ที่มีการจัดเรียงโครงสร้างเป็นชั้น ที่เรียกว่า Double perovskite มีการแทนที่นิกเกิลด้วยไนโอเบียมหรือแทนทาลัม ( $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{MO}_{10}$ , M = Nb หรือ Ta) แต่อย่างไรก็ตามในการทดสอบค่าการนำไฟฟ้าเบื้องต้นพบว่าให้ค่าการนำไฟฟ้าน้อยมาก ดังนั้นสารประกอบในกลุ่ม Double perovskite ดังนั้นยังคงต้องมีการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติมต่อไป

## ACKNOWLEDGEMENTS

Firstly, I would like to express my deep sense of thankfulness to my research advisor, Assoc. Prof. Sujitra Wongkasemjit who gave intensive suggestions, useful guidance, laboratory skills, constant encouragement, and vital helps throughout this research work. I also would like to give a great appreciation to my co-advisor, Dr. Pimpa Limthongkul, for providing useful suggestions and recommendations including problems solving which made this thesis succeed.

A deep gratitude is expressed to Dr. Stephen Skinner for being a very nice overseas guidance during my internship at Faculty of Engineering, Department of Materials, Imperial College. (South Kensington Campus, London). He gave me not only the opportunities to experience doing a research in his group, but also the creative guidance. I had great experience and good memories during my stay in London. UK.

I would like to sincerely thank one of my research committees, Asst. Prof. Thanyalak Chaisuwan who guided and supported me throughout studying Ph.D. program. I wish special thanks to Dr. Sumittra Charojrochkul from MTEC and Dr. Mónica Burriel from Imperial College for the helpful discussion they gave me.

Special thanks go to all the SW's group members, PPC, MTEC and Imperial College friends for their kindness, helpfulness and encouragement. I also extend my appreciation to all PPC and MTEC staffs for their helpfulness and great contributions throughout my study.

This thesis work is funded by the Petroleum and Petrochemical College; and the National Center of Excellence for Petroleum, Petrochemical, and Advanced Materials, Thailand, the Petroleum and Petrochemical Technology (PPT Consortium), Rachadapisake Sompote fund, Chulalongkorn University, the National Metal and Materials Technology Center (MTEC) and the Development and Promotion of Science and Technology, Thailand Project (DPST).

Lastly, I wish to convey my deepest gratitude to my parents for their understanding, endless and unequivocal support through my life, and dedicate this dissertation to them.

## TABLE OF CONTENTS

	<b>PAGE</b>
Title Page	i
Abstract (in English)	iii
Abstract (in Thai)	iv
Acknowledgements	v
Table of Contents	vi
List of Tables	ix
List of Figures	x
Abbreviations	xiv
List of Symbols	xv
 <b>CHAPTER</b>	
<b>I INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
 <b>II THEORITICAL BACKGROUND AND LITERATURE SURVEYS</b>	 <b>4</b>
 <b>III PROPERTY STUDY OF <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4</math> (<math>x \leq 0.8</math>) FOR IT-SOFCs CATHODE</b>	 <b>23</b>
3.1 Abstract	23
3.2 Introduction	24
3.3 Experimental	25
3.4 Results and Discussion	26
3.5 Conclusions	29
3.6 Acknowledgements	30
3.7 References	30

<b>CHAPTER</b>		<b>PAGE</b>
<b>IV</b>	<b>SOL-GEL AND SOLID STATE SYNTHESIS AND PROPERTY STUDY OF <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4</math> (<math>x \leq 0.8</math>)</b>	<b>37</b>
	4.1 Abstract	37
	4.2 Introduction	38
	4.3 Experimental	39
	4.4 Results and Discussion	40
	4.5 Conclusions	46
	4.6 Acknowledgements	46
	4.7 References	47
<b>V</b>	<b>EFFECT OF Sr SUBSTITUTED <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_{4+\delta}</math> (<math>x = 0, 0.2,</math> <b>0.4, 0.6, AND 0.8) ON OXYGEN STOICHIOMETRY AND OXYGEN TRANSPORT PROPERTIES</b></b>	<b>59</b>
	5.1 Abstract	59
	5.2 Introduction	60
	5.3 Experimental	61
	5.4 Results and Discussion	65
	5.5 Conclusions	70
	5.6 Acknowledgements	70
	5.7 References	71
<b>VI</b>	<b>SYNTHESIS AND ELECTRICAL PROPERTY STUDY OF <math>\text{La}_3\text{Ni}_2\text{MO}_9</math> (M = Nb AND Ta)</b>	<b>81</b>
	6.1 Abstract	81
	6.2 Introduction	82
	6.3 Experimental	84

<b>CHAPTER</b>	<b>PAGE</b>
6.4 Results and Discussion	86
6.5 Conclusions	90
6.6 Acknowledgements	90
6.7 References	91
<b>VII CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS</b>	<b>99</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>101</b>
<b>CURRICULUM VITAE</b>	<b>108</b>



## LIST OF TABLES

<b>TABLE</b>		<b>PAGE</b>
<b>CHAPTER III</b>		
3.1	Summary of water amount used for samples with different compositions	32
<b>CHAPTER IV</b>		
4.1	Unit cell dimensions and unit cell volumes of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ synthesized via sol-gel and solid-state methods	50
4.2	Electrical conductivities and TEC of samples produced via the different synthesis routes	51
4.3	Activation energy with respective temperature ranges for the electrical conductivity for the different materials	52
<b>CHAPTER V</b>		
5.1	Hyperstoichiometric oxygen content ( $\delta$ ) and the corresponding valence of Ni of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_{4+\delta}$ samples	74
5.2	Tracer diffusion ( $D^*$ ) and surface exchange coefficients ( $k^*$ ) for $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_{4+\delta}$	75
5.3	Activation energy of the diffusion ( $D^*$ ) and surface exchange coefficients ( $k^*$ ) for $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_{4+\delta}$	76

## LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
<b>CHAPTER II</b>	
2.1	Schematic diagram showing the general operating principles of a fuel cell. <span style="float: right;">6</span>
2.2	Fuel cell components. <span style="float: right;">6</span>
2.3	Summary of fuel cell types. <span style="float: right;">7</span>
2.4	Schematic drawing of a SOFC showing the roles of anode, cathode, and electrolyte in a solid oxide fuel cell. <span style="float: right;">8</span>
2.5	Active areas for oxygen reduction electrochemical reaction in a (a) pure electronic conductor and (b) mixed ionic–electronic conductor (MIEC). <span style="float: right;">11</span>
2.6	Schematic diagram of the $\text{La}_2\text{NiO}_4$ structure showing the vacancy and interstitialcy ionic transport directions and $\text{LaNiO}_3$ perovskite and $\text{LaO}$ rock–salt layers are indicated. <span style="float: right;">14</span>
<b>CHAPTER III</b>	
3.1	FTIR spectra of dried gel (La–Sr–Ni complex) from synthesis of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ prepared using ethanolamine as template, (a) $x = 0$ (b) $x = 0.4$ and (c) $x = 0.8$ and TETA as template, (d) $x = 0$ (e) $x = 0.4$ and (f) $x = 0.8$ <span style="float: right;">33</span>
3.2	XRD patterns of the calcined $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ powders prepared via the sol–gel process using ethanolamine as template when $x$ is (a) 0, (b) 0.4, and (c) 0.8. the sol–gel process using TETA as template when $x$ is (d) 0, (e) 0.4, and (f) 0.8, and $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ prepared by the solid state reaction process when $x$ is (g) 0, (h) 0.4, and (i) 0.8 ( $\circ$ $\text{La}_2\text{NiO}_4$ , $\blacksquare$ $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ , $\nabla$ $\text{LaNiO}_3$ , $\bullet$ $\text{La}_2\text{O}_3$ and $\blacktriangledown$ $\text{NiO}$ ). <span style="float: right;">34</span>

FIGURE	PAGE
3.3 Electrical conductivity versus temperature plot of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ prepared via the sol-gel process (closed symbols) when $x$ is (a) 0, (b) 0.4, and (c) 0.8; and $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ prepared by the solid state reaction (opened symbols) when $x$ is (d) 0, (e) 0.4, and (f) 0.8.	35
3.4 SEM images of sintered $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ samples prepared by the sol-gel synthesized powder (left) and the solid state synthesized powder (right).	36
<b>CHAPTER IV</b>	
4.1 FTIR spectra of the dried gels of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ prepared using ethanolamine for (a) $x = 0$ , (b) $x = 0.4$ , and (c) $x = 0.8$ .	53
4.2 XRD patterns of the calcined $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ powders prepared via the sol-gel and the solid-state reaction processes when $x$ is 1a-e and 2a-e, respectively ( $\circ$ $\text{La}_2\text{NiO}_4$ , $\blacksquare$ $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ , $\nabla$ $\text{LaNiO}_3$ , $\bullet$ $\text{La}_2\text{O}_3$ and $\blacktriangledown$ $\text{NiO}$ ).	54
4.3 SEM images of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ powder calcined at $1050^\circ\text{C}$ and the samples sintered at $1200^\circ\text{C}$ prepared by the sol-gel (left) and the solid-state (right) methods.	55
4.4 Electrical conductivity vs temperature plot of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ prepared via the sol-gel process (closed symbols) when $x$ is 0 ( $\blacksquare$ ), 0.2 ( $\bullet$ ), 0.4 ( $\blacktriangle$ ), 0.6 ( $\blacklozenge$ ), and 0.8 ( $\blackstar$ ) and $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ prepared by the solid-state reaction (opened symbols) when $x$ is 0 ( $\square$ ), 0.2 ( $\circ$ ), 0.4 ( $\triangle$ ), 0.6 ( $\lozenge$ ) and 0.8 ( $\star$ ).	56

FIGURE	PAGE
<p>4.5 Log <math>\sigma T</math> versus <math>1000/T</math> in air of <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4</math> prepared via (a) the sol-gel process (closed symbols) when <math>x</math> is 0 (<math>\cdots\blacksquare\cdots</math>), 0.2 (<math>\cdots\bullet\cdots</math>), 0.4 (<math>\text{---}\blacktriangle\text{---}</math>), 0.6 (<math>\text{---}\blacklozenge\text{---}</math>), and 0.8 (<math>\text{---}\blackstar\text{---}</math>) and <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4</math> prepared by (b) the solid-state reaction (opened symbols) when <math>x</math> is 0 (<math>\cdots\square\cdots</math>), 0.2 (<math>\cdots\circ\cdots</math>), 0.4 (<math>\cdots\triangle\cdots</math>), 0.6 (<math>\text{---}\diamond\text{---}</math>) and 0.8 (<math>\text{---}\star\text{---}</math>).</p>	57
<p>4.6 Expansion rates of <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4</math> prepared via the sol-gel process when <math>x</math> is 0 (<math>\text{---}</math>), 0.4 (<math>\text{---}\cdots\text{---}</math>), and 0.8 (<math>\text{---}\cdot\text{---}</math>) and <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4</math> prepared by the solid-state reaction when <math>x</math> is 0 (<math>\text{---}</math>), 0.4 (<math>\text{---}\cdot\text{---}</math>), and 0.8 (<math>\text{---}\cdot\cdot\cdot\text{---}</math>).</p>	58
<b>CHAPTER V</b>	
<p>5.1 XRD pattern of <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_{4+\delta}</math> sintered pellets before <math>^{18}\text{O}</math> exchange, (a) <math>x = 0.2</math>, (b) <math>x = 0.4</math>, (c) <math>x = 0.6</math> and (d) <math>x = 0.8</math> (<math>\circ</math> Tetragonal (I4/mmm), <math>\bullet</math> orthorhombic (Fmmm) and <math>\blacktriangledown</math> NiO).</p>	77
<p>5.2 Unit cell parameters of <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_{4+\delta}</math>: (<math>\circ</math>) <math>a</math> parameter, (<math>\Delta</math>) <math>c</math> parameter and (<math>\blacksquare</math>) cell volume.</p>	78
<p>5.3 The (a) normalised <math>^{18}\text{O}</math> SIMS image and (b) <math>^{18}\text{O}</math> concentration of <math>\text{La}_{1.8}\text{Sr}_{0.2}\text{NiO}_{4+\delta}</math> after <math>^{18}\text{O}_2</math> exchange at <math>800^\circ\text{C}</math> for 2 h.</p>	79
<p>5.4 Arrhenius plot of (a) tracer diffusion coefficients (<math>D^*</math>) and (b) surface exchange coefficient (<math>k^*</math>) for <math>\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_{4+\delta}</math>.</p>	80

FIGURE	PAGE
<b>CHAPTER VI</b>	
6.1 XRD patterns of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{NbO}_9$ samples prepared by (a) the solid state reaction and (b) the sol-gel process. ( $\bullet$ = $\text{La}_2\text{Mg}_{1.33}\text{Nb}_{0.67}\text{O}_6$ and $\nabla$ $\text{La}_2\text{O}_3$ ).	94
6.2 XRD patterns of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{TaO}_9$ samples prepared by (a) the solid state reaction and (b) the sol-gel process ( $\circ$ = $\text{La}_2\text{Mg}_{1.33}\text{Ta}_{0.67}\text{O}_6$ , $\blacktriangledown$ $\text{La}_3\text{TaO}_7$ , $\square$ $\text{La}_2\text{O}_3$ and $\star$ $\text{NiO}$ ).	95
6.3 SEM images at different magnifications of the samples prepared by the solid state reaction after calcination at $1400^\circ\text{C}$ for 24 h when $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{NbO}_9$ is (a) and (c) and $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{TaO}_9$ is (b) and (d).	96
6.4 SEM images at different magnifications of the samples prepared by the solid state reaction after sintered at $1500^\circ\text{C}$ for 24 h when $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{NbO}_9$ is (a) and (c) and $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{TaO}_9$ is (b) and (d).	97
6.5 Electrical conductivity vs temperature plot of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{NbO}_9$ and $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{TaO}_9$ samples prepared by the solid-state reaction measured in the temperature range ( $25^\circ\text{C}$ – $850^\circ\text{C}$ ) ( $\bullet$ = $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{NbO}_9$ and $\blacktriangle$ = $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{TaO}_9$ (closed symbols are values when heating up) and $\circ$ = $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{NbO}_9$ and $\Delta$ = $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{TaO}_9$ (opened symbols when cooling down)).	98

## ABBREVIATIONS

CGO	Cerium Gadolinium Oxide
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GDC	Gadolinium Doped Cerium Oxide
IT-SOFCs	Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
LGSCF	$\text{La}_{0.6-x}\text{Gd}_x\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$
LSC	$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3-\delta}$
LSCF	$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$
LSM	$\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{MnO}_3$
LSNO	$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$
MIECs	Mixed Ionic and Electronic Conductors
NO <sub>x</sub>	Oxides of Nitrogen
PEMs	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells
RP	Ruddlesden-Popper
SEM	Scanning Electron Microscope
SIMS	Secondary Ion Mass Spectrometry
SO <sub>x</sub>	Oxides of Sulfur
TEA	Triethanolamine
TEC	Thermal Expansion Coefficient
TETA	Triethylenetetramine
TGA	Thermogravimetric Analysis
TPB	Triple-Phase Boundary
XRD	X-ray Diffraction
YSZ	Ytria-Stabilized Zirconia

**LIST OF SYMBOLS**

$D^*$	Tracer Diffusion Coefficients
$k^*$	Surface Exchange Coefficient
$\sigma$	Electrical Conductivity
$\delta$	Hyperstoichiometric Oxygen Content