

การสังเคราะห์เพื่อเพิ่มพาวเวอร์แฟคเตอร์วัสดุสตรอนเทียมไททานเตเจอร์ร่วม
แลนทานัมและซิลเวอร์

Synthesis and Enhanced Power Factor of La and Ag Co-doped SrTiO₃ Bulk Material

อัครเดช คำศรี¹ คัชรินทร์ เวชชากุล¹ กิตติชัย โสพันนา¹ เสริฐ เขียนนอก¹ รณฤทธิ์ นาโควงศ์¹
และภควัฒน์ วงศ์วรรณวัฒนา^{1*}

Akkharadet Khumsri¹ Khatcharin Wetchakun¹ Kittichai Sopunna¹

Sert Kiennork¹ Ronariddh Nakhong¹ and Pakawat Wongwanwattana^{1*}

Received: July 26, 2021; Revised: October 14, 2021; Accepted: October 14, 2021

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การสังเคราะห์และเพิ่มพาวเวอร์แฟคเตอร์ของวัสดุสตรอนเทียมไทแทนต์ โดยการเจือร่วมด้วยแลนทานัมและซิลเวอร์ (Sr_{1-x}La_{x/2}Ag_{x/2}TiO₃, x = 0, 0.01, และ 0.1) โดยใช้วิธีพอลิเมอร์เชิงซ้อนแล้วขึ้นรูปด้วยวิธีอัดร้อน โดยศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบคถูกตรวจสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 385 – 775 เคลวิน ผลการศึกษาพบว่า Sr_{0.99}La_{0.005}Ag_{0.005}TiO₃ มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ 12.54 โอห์มเมตร และค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่า -0.021 โวลต์ต่อเคลวิน โดยที่อุณหภูมิ 775 เคลวิน ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์สูงสุดที่ 8.02×10^{-7} วัตต์เมตร⁻¹ เคลวิน⁻² เมื่อเจือร่วมแลนทานัมและซิลเวอร์ ตำแหน่ง x = 0.01 การเจือร่วมแลนทานัมและซิลเวอร์ในสตรอนเทียมไทแทนต์ช่วยลดค่าความต้านทานไฟฟ้าและเพิ่มค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : สตรอนเทียมไทแทนต์; วิธีพอลิเมอร์เชิงซ้อน; การเจือร่วม; การอัดร้อน; พาวเวอร์แฟคเตอร์

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี อุบลราชธานี

¹ Faculty of Science, Ubon Rachathani Rajabhat University, Ubon Rachathani

* Corresponding Author E - mail Address: pakawat.w@ubru.ac.th

Abstract

The purposes of this research were synthesis and enhanced power factor of Sr and Ag co-doped strontium titanate ($\text{Sr}_{1-x}\text{La}_{x/2}\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$, $x = 0, 0.01$, and 0.10) synthesized by polymerized complex method following hot pressing. Temperature dependence of the electrical resistivity and the Seebeck coefficient was investigated in the temperature range from 385 - 775 K. The $\text{Sr}_{0.99}\text{La}_{0.005}\text{Ag}_{0.005}\text{TiO}_3$ exhibited lowest electrical resistivity and the Seebeck coefficient were $12.54 \Omega\text{m}$ and -0.021 VK^{-1} at 775 K, respectively. Maximum power factor of $8.02 \times 10^{-7} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ was achieved for La and Ag-doped SrTiO_3 at $x = 0.01$. Results exhibited that La and Ag co-doped SrTiO_3 effectively reduced electrical resistivity and the enhanced power factor of the thermoelectric materials.

Keywords: Strontium Titanate; Polymerized Complex Method; Co-Doping; Hot Pressing; Power Factor

บทนำ

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Materials) เป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างปลายทั้งสองข้าง และในปัจจุบันวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถผันพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย ทำให้วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถนำไปใช้ในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากที่พลังงานที่เหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ [1] วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถนำไปใช้สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Thermoelectric Generator) และเครื่องทำความเย็น (Thermoelectric Cooler) โดยผ่านปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) และปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ตามลำดับ [2] ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับ Dimensionless Figure of Merit (ZT) ของแต่ละวัสดุ ซึ่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีควรมีค่า $ZT \geq 1$ ถ้านิยามของ ZT จะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการให้ค่า ZT มีค่าสูงนั้นต้องทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck Coefficient) S ของวัสดุมีค่าสูงและทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) ρ และสภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) κ มีค่าต่ำซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก เนื่องจากสภาพต้านทานไฟฟ้า หรือสภาพนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) σ ของวัสดุมีความสอดคล้องกับ κ วัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงก็จะมีสภาพนำความร้อนที่สูงด้วย เช่น กลุ่มโลหะ [1] อีกทั้งวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์ซีเบคที่สูง แต่ก็จะทำให้สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุมีค่าต่ำอีกด้วย ซึ่งทำให้ทุกพารามิเตอร์มีความเกี่ยวพันกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้การพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกยังมีข้อจำกัดในตัวเองต่าง ๆ จึงทำให้มีความสัมพันธ์กันเหล่านี้ ทำให้การพัฒนาการเพิ่มค่า ZT เป็นได้อย่างช้า หรือแม้แต่การเพิ่มค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) ซึ่งเป็นการบ่งบอกสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุในแต่ละชนิดที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ($S = -\Delta V / \Delta T$) ก็ยังต้องมีการพัฒนาให้สมบัติที่ดีขึ้น ปัจจุบันวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำและออกไซด์ได้รับความสนใจมากขึ้น

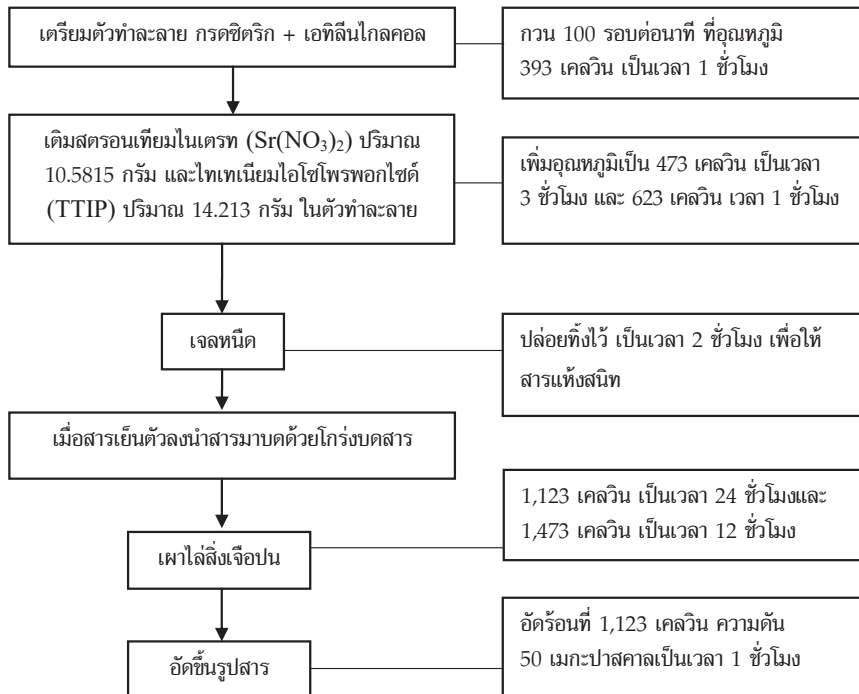
เนื่องจากมีค่า ZT ที่น่าสนใจ เช่น สภาพต้านทานไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์ซีเบค อีกทั้งวัสดุเหล่านี้ยังมีประสิทธิภาพในการผันพลังงานไฟฟ้าความร้อนได้ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สนใจวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในกลุ่มออกไซด์ คือ สตรอนเทียมไททานเนต (SrTiO_3) มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ABO_3 เป็นวัสดุในกลุ่มออกไซด์ที่ได้รับความสนใจในการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเนื่องจากมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิสูง (2,080 เคลวิน) เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความเป็นพิษต่ำ ยิ่งกว่านั้นยังสามารถปรับแต่งสมบัติทางไฟฟ้าได้ ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติทางเทอร์โม อิเล็กทริก การเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้าของ SrTiO_3 จะเป็นการศึกษาการขนส่งอิเล็กตรอนในชั้น SrTiO_3 โดยทำการแทนเฮเทอโรเวเลนซ์ (Heterovalent) ที่ตำแหน่งของ Sr จะทำให้เป็นการเพิ่มสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก อย่างไรก็ตาม วัสดุ SrTiO_3 แบบดั้งเดิมมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่สูงแต่ค่า ZT มีค่าต่ำ เนื่องจากมีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงและมีสภาพนำความร้อนสูงถึงที่ 1,000 เคลวิน อย่างไรก็ตาม SrTiO_3 ยังประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำ ($ZT < 1$) จึงทำให้มีการพัฒนา SrTiO_3 ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น โดยใช้วิธีการเจือโลหะบางชนิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ SrTiO_3 [3] ดังนั้นในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยการเจือแบบเดี่ยว (Single Doping) และเจือร่วม (Co-Doping) ที่ตำแหน่ง A และ B ในโครงสร้างของ SrTiO_3 เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์ซีเบค ลดสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพนำความร้อน ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยได้ปรับปรุงวัสดุ SrTiO_3 ให้มีสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีขึ้น เช่น Muta, H., Kurosaki, K., and Yamanaka, S. [4] ได้เจือแลนทานัม (Lanthanum, La) ใน SrTiO_3 พบว่ามีค่าที่ ZT เป็น $0.02 \text{ วัตต์เมตร}^{-1}\text{เคลวิน}^{-2}$ เนื่องจากมีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงมาก และอีกงานวิจัยหนึ่งคือ Park, D., Ju, H., and Kim, J. [5] ได้รายงานผลการเจือซิลเวอร์ (Ag) ใน SrTiO_3 ที่ปริมาณ 0.5 1 3 และ 5 % ผลวิจัยพบว่าค่าสูงสุดของพาวเวอร์แฟคเตอร์คือ $843.3 \text{ ไมโครวัตต์เมตร}^{-1}\text{เคลวิน}^{-2}$ ที่ 500 เคลวิน ซึ่งมากกว่าประมาณ 3.96 เท่าของ SrTiO_3 ที่ไม่ได้เจือซิลเวอร์ และค่า ZT สูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.09 ที่ 1 % Ag ที่ 500 เคลวิน ซึ่งมากกว่า 4.27 เท่าของ SrTiO_3 ที่ไม่ได้เจือซิลเวอร์ที่อุณหภูมิเดียวกัน เช่น Devi, N. Y., Vijayakumar, K., Rajasekaran, P., Alagar Nedunchezian, A. S., Sidharth, D., Masaru, S., Arivanandhan, M., and Jayavel, R. [3] ได้ทำการเจือร่วมแกโดลิเนียม (Gadolinium, Gd) และไนโอเบียม (Niobium, Nb) ใน SrTiO_3 ผลการวิจัยพบว่าค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $311.7 \times 10^{-6} \text{ วัตต์เมตร}^{-1}\text{เคลวิน}^{-2}$ ที่ 550 เคลวิน ได้มาจาก $\text{Sr}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Ti}_{1-y}\text{Nb}_y\text{O}_3$ และ Lin, J.-H., Chii-Shyang Hwang, C.-S., and Sie, F.-R. [2] ได้สังเคราะห์วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดยเจือร่วมนีโอไดเมียม (Neodymium, Nd) และดิสโพรเซียม (Dysprosium, Dy) เข้าไปใน SrTiO_3 ($\text{Sr}_{0.1x+0.8}\text{Dy}_{0.1x}\text{Nd}_{0.2(1-x)}\text{TiO}_3$, $x = 0, 0.3, 0.5, 0.7, 1$) ผลวิจัยพบว่าค่าสูงสุดของพาวเวอร์แฟคเตอร์คือ $1,250 \text{ ไมโครวัตต์เมตร}^{-1}\text{เคลวิน}^{-2}$ ที่ 573 เคลวิน สำหรับ $\text{Sr}_{0.83}\text{Dy}_{0.03}\text{Nd}_{0.14}\text{TiO}_3$ และค่าสูงสุดของ ZT คือ 0.19 ที่ 673 เคลวิน สำหรับ $\text{Sr}_{0.87}\text{Dy}_{0.07}\text{Nd}_{0.06}\text{TiO}_3$ ($x = 0.7$) ด้วย 7 mol% Dy และ 6 mol% Nd ส่วน Srivastava, D., Norman, C., Azough, F., Marion C. Schäfer, M. C., Guilmeau, E., and Freer, R. [6] ได้สังเคราะห์ $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.067}\text{Ti}_{0.8}\text{Nb}_{0.2}\text{O}_{3-8}$ ที่เจืออะตอมทองแดง (Copper, Cu) หรือเหล็ก (Iron, Fe) ผลวิจัยพบว่าค่า ZT มีค่าเท่ากับ 0.36 ที่ 900 เคลวิน สำหรับตัวอย่างที่เติมด้วย Cu และในขณะที่ค่า ZT มีค่าเท่ากับ 0.38 ที่ 1,000 เคลวิน สำหรับ Fe

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ คือ 1) เพื่อสังเคราะห์วัสดุสตรอนเทียมไททานเนตที่เจือร่วมด้วยแลนทานัม (La) และซิลเวอร์ (Ag) ด้วยวิธีพอลิเมอร์เชิงซ้อน (Polymerized Complex Method)

และเทคนิคการอัดร้อน (Hot Pressing Method) 2) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของวัสดุสตรอนเทียมไททานเนตที่เจอร์่วมด้วยแลนทานัมและซิลเวอร์ด้วยวิธีพอลิเมอร์เชิงซ้อนและเทคนิคการอัดร้อน และ 3) การประเมินสมบัติทางไฟฟ้าและทางเทอร์โมอิเล็กทริกวัสดุสตรอนเทียมไททานเนตที่เจอร์่วมด้วยแลนทานัมและซิลเวอร์ด้วยวิธีพอลิเมอร์เชิงซ้อนและเทคนิคการอัดร้อน

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

การสังเคราะห์วัสดุ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_{x/2}\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01$, และ 0.10) ด้วยวิธีการพอลิเมอร์เชิงซ้อน นำเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol, QR&C) ปริมาณ 450 มิลลิลิตร และกรดซิตริก (Citric Acid Monohydrate) ปริมาณ 30 กรัม ใส่ในบีกเกอร์แล้วกวนที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 393 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสตรอนเทียมไนเตรท (Strontium Nitrate, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, Acros Organics) ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium Isopropoxide, $\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$, Acros Organics) แลนทานัมไนเตรท (Lanthanum Nitrate, $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Acros Organics) และซิลเวอร์ไนเตรท (Silver Nitrate, AgNO_3 , Acros Organics) ในอัตราส่วนตามปริมาณสารสัมพันธ์ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_{x/2}\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01$, และ 0.10) เติมนลงในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและกรดซิตริก และกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 473 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 623 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อสารละลายกลายเป็นเจลหนืดให้นำเข้าแท่งกวนออก ปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารแห้งสนิทและเกิดลูกไหมจนสารไหมมีลักษณะคล้ายโฟม เมื่อสารเย็นตัวลง นำสารมาบดด้วยโกร่งบดสาร แล้วนำไปเผาไล่สิ่งเจือปนและเปลี่ยนโครงสร้างผลึกที่ 1,123 เคลวิน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่ 1,473 เคลวิน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ผ่านการนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 1,123 เคลวิน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้ความดัน 50 เมกะปาสกาล [7] ภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน หลังจากตัวอย่างเย็นลง นำมาขัดตัวอย่างให้เรียบด้วยเครื่องขัดละเอียด แล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติทางแสง นำตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด $3 \times 3 \times 15$ มิลลิเมตร³ ด้วยเครื่องตัดความเร็วต่ำเพื่อนำไปวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิที่กำหนดไว้ด้วยเครื่อง ZEM-3 กระบวนการพอลิเมอร์เชิงซ้อนของการเตรียม SrTiO_3 ที่เจอร์่วม La และ Ag ดำเนินการดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_{x/2}\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01$, และ 0.10) โดยวิธีพอลิเมอร์เชิงซ้อนและวิธีอัดร้อน

การคำนวณค่าแถบพลังงานช่องว่าง พาวเวอร์แฟคเตอร์และ ZT

ค่าแถบพลังงานช่องว่าง (Band Energy Gap, E_g) สามารถคำนวณได้การใช้ความสัมพันธ์ของการพล็อตกราฟแบบทังก์ (Tauc Plot Method) โดยใช้สมการที่ (1)

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (1)$$

เมื่อ

- α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient) (หรือใช้แทน $F(R)$ ด้วย คือ ฟังก์ชันคูเบลคา-มังก์ (Kubelka-Munk Function) มีความสัมพันธ์กับค่าการกระสะท้อน (Reflectance) จะได้ $F(R) = 1(1-R)^2 / 2R$)
- $h\nu$ คือ พลังงานของโฟตอน (Photon Energy)
- A คือ ค่าคงตัวการหาค่าแถบพลังงานช่องว่างหาได้จากพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่าง $(F(R)h\nu)^2$ กับ $h\nu$ โดยการลากเส้นตรงตามเส้นกราฟตัดกับแกน x ที่ $(F(R)h\nu)^2 = 0$ จุดตัดที่ได้จะเป็นพลังงานโฟตอนซึ่งตรงกับแถบพลังงานช่องว่าง [8]

ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคนี้จะเกี่ยวข้องกับปริมาณของความเข้มข้นพาหะและมวลยังผล ดังสมการที่ (2)

$$S = \frac{8\pi^2 k_B^2}{3eh^2} m^* T \left(\frac{\pi}{3n} \right)^{2/3} \quad (2)$$

เมื่อ

k_B , h และ m^* คือ ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์ (Boltzmann Constant) ค่าคงตัวพลังค์ (Planck Constant) และมวลยังผล (Effective Mass) ตามลำดับ

สภาพต้านไฟฟ้าหรือสภาพนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3) - (4) การคำนวณค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ ซึ่งนิยามไว้เป็น

$$PF = \frac{S^2}{\rho} \quad (3)$$

และค่า ZT นิยามว่า

$$ZT = \frac{S^2 T}{\rho \kappa} \quad (4)$$

โดย

S คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck Coefficient)
 ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity)
 κ คือ สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity)
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature) [3]

ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ได้มาจากการนำค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้มาจากเครื่องวัดสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก (ZEM-3) แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้วัดสภาพนำความร้อนจึงไม่สามารถคำนวณค่า ZT ได้ และขนาดผลึกของแลนทานัมและซิลเวอร์เจือ SrTiO_3 ถูกคำนวณด้วยสมการเชอร์เรอร์ (Scherrer Equation) ดังนี้ $D = 0.9\lambda / \beta \cos \theta$ เมื่อ D λ β และ θ คือ ขนาดผลึก (Crystallite Size) ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (X-ray Wavelength) ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีค (Full Width at Half Maximum (FWHM)) และมุมแบร็กก (Bragg Angle) ตามลำดับ [9]

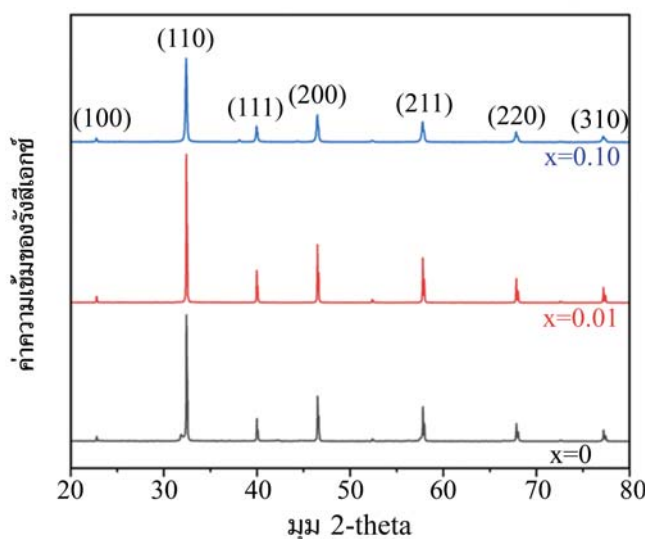
คุณลักษณะบ่งชี้ (Characterization)

ความเป็นผลึกและขนาดของผลึกของตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) บริษัท Bruker รุ่น D8 Advance สแกนในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 10 - 80 องศา สมบัติทางแสงและแถบช่องว่างพลังงานของตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-vis Spectroscopy) บริษัท PG Instrument รุ่น T90+ ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอีมิสชัน (Field Emission Scanning Electron

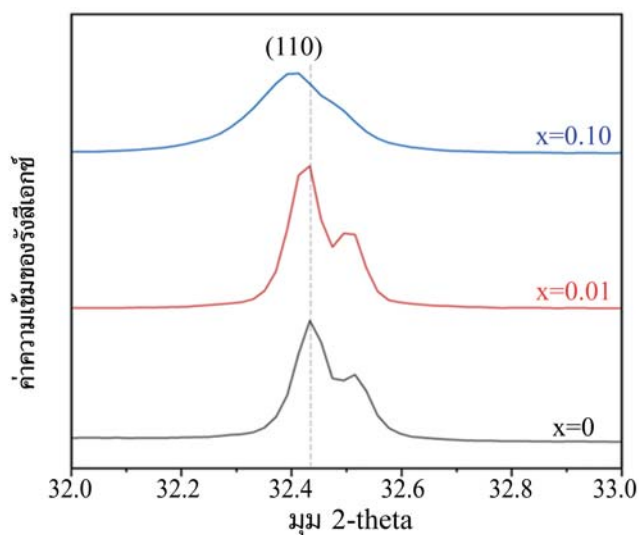
Microscopy, FESEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM- 7610Fplus และสภาพต้านทานไฟฟ้า สัมประสิทธิ์ซีเบค วิเคราะห์โดยวิธีวัดสี่ขั้ว (Four-Probe Method) โดยใช้เครื่อง ZEM-3 Apparatus บริษัท ULVACRIKO

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)



(ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_{x/2}\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01$ และ 0.10)



(ข) การขยายระนาบ (110)

รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

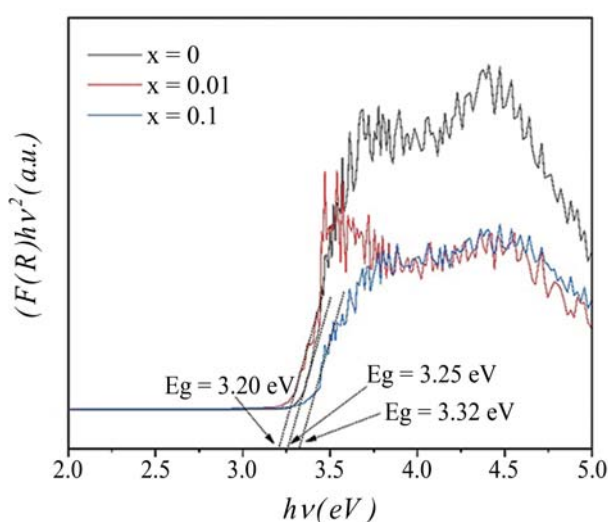
โครงสร้างผลึกของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2(ก) ผลการวิเคราะห์พบว่าพีคที่ปรากฏขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 22.79° 32.43° 39.99° 46.50° 57.81° 67.84° และ 77.21° สอดคล้องกับระนาบ (100) (110) (111) (200) (211) (220) และ (310) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของผลึกของ SrTiO_3 ตรงกันกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 73-0661 [6] แต่ไม่ปรากฏเฟสของ La และ Ag สำหรับสาร $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ($x = 0.01$ และ $x = 0.10$) ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเจือในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของสตรอนเทียมไททานเตเจอร์ร่วมด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ พบว่าความเข้มของพีคสูงเทียบกับ SrTiO_3 แสดงให้เห็นความเป็นผลึกมีค่าสูงขึ้นเมื่อเจือร่วม La และ Ag ใน SrTiO_3 ซึ่งให้เห็นว่าการเจือในปริมาณที่น้อย อาจจะทำให้อนุภาคที่เข้าไปเจือเกิดการจัดเรียงของผลึกใหม่ และขนาดของอนุภาคใหม่ จึงทำให้ความเป็นผลึกสูงขึ้น แต่เมื่อเจือที่ปริมาณ $x = 0.10$ ความสูงของพีคลดลง แสดงให้เห็นว่าการเจือในปริมาณที่มากขึ้น อาจส่งผลต่อความเป็นผลึกของสารซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากอนุภาคที่เดิมเข้าไปเข้าไปขัดขวางการเติบโตของผลึกจึงทำให้มีขนาดเล็กลง จากรูปที่ 2(ข) พบว่าระนาบ (110) เลื่อนไปยังมุมแบร์ริก (Bragg Angle) ที่ต่ำลงซึ่งยืนยันขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้นตามสมการเชอร์เรอร์ แต่อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณ $x = 0.10$ ความสูงของพีคลดลงอาจจะเป็นเนื่องจากขนาดของอนุภาคที่เจืออาจจะเข้าไปขัดขวางการเติบโตของผลึกจึงทำให้ผลึกมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ความสูงของพีคลดลงได้อีกด้วย

จากตารางที่ 1 พบว่าเมื่อเติมปริมาณแลนทานัมและซิลเวอร์ที่ $x = 0.01$ ระยะห่างระหว่างระนาบไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากอาจจะยังมีปริมาณที่น้อยเกินไปจึงไม่ผลต่อระยะห่างระหว่างระนาบ แต่เมื่อเติมที่ปริมาณ $x = 0.10$ พบว่าระยะห่างระหว่างระนาบเพิ่มขึ้นจาก 2.7585 อังสตรอม เป็น 2.7602 อังสตรอม แสดงให้เห็นว่าปริมาณ La และ Ag ที่เติมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างระนาบ ส่งผลทำให้ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a มีค่าลดลงและทำให้ปริมาตรของผลึกลดลงด้วย จากรูปที่ 2(ข) และตารางที่ 1 พบว่าแลตทิซพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กับการเลื่อนของระนาบ (110) สาเหตุของการเลื่อนของระนาบ (100) ไปยังมุมแบร์ริก (2θ) ที่ต่ำลง เนื่องมาจากรัศมีไอออนของแลนทานัม (La^{3+}) และซิลเวอร์ (Ag^+) มีค่าเท่ากับ 1.15 อังสตรอม [10] - [11] มีค่าน้อยกว่ารัศมีไอออนของสตรอนเทียม (Sr^{2+}) มีค่าเท่ากับ 1.13 อังสตรอม [11] ซึ่งการเจือด้วยอะตอมที่มีรัศมีไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าจะทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการบิดเบือน (Distortion) ทำให้มีผลต่อระยะห่างระหว่างระนาบ (d-Spacing) และแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice Parameter) ของผลึกได้ [12] จากผลการคำนวณขนาดผลึกพบว่าผลึกมีขนาด 118 123 และ 45 นาโนเมตร พบว่าการเจือ La และ Ag ที่ $x = 0.01$ ทำใหขนาดของผลึกมีขนาดใหญ่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ขนาดผลึกมีขนาดเล็กลงที่ $x = 0.10$ ซึ่งตรงกันข้ามกับการเลื่อนระนาบ (110) ไปยังมุมที่ต่ำกว่าเนื่องจากขนาดของอนุภาคที่มีขนาดที่แตกต่างกัน อีกทั้ง La และ Ag ที่เจือใน SrTiO_3 ยังทำให้เกิดการขัดขวางการเติบโตของผลึกลงทำให้ขนาดอนุภาคและขนาดผลึกมีค่าลดลง

ตารางที่ 1 ระยะห่างระหว่างระนาบ แลตทิซพารามิเตอร์ (a) ปริมาตรเซลล์ (Cell Volume) และขนาดผลึก (D) ของ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01$ และ 0.10)

$\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$	ระยะห่างระหว่างระนาบ (อังสตรอม)	แลตทิซพารามิเตอร์ (อังสตรอม)	ปริมาตรผลึก (อังสตรอม ³)	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)
$x = 0$	2.7585	5.1266	134.73	118
$x = 0.01$	2.7585	5.1266	134.73	123
$x = 0.10$	2.7602	5.1236	134.50	45

2. การศึกษาช่องว่างพลังงาน (Band Gap Energy) ด้วยเทคนิค Diffused Reflectance UV-Vis Spectroscopy (UV/DRS)

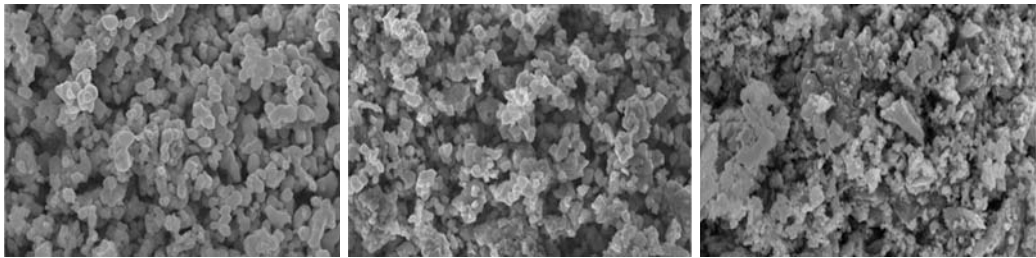


รูปที่ 3 สเปกตรัม UV-Vis Diffuse Reflectance (DRS) ของ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01, 0.10$)

จากการวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานของ SrTiO_3 ($x = 0$) มีค่าเท่ากับ 3.25 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 3 ซึ่งหลังจากเติม La และ Ag ที่ปริมาณ $x = 0.01$ พบว่าแถบช่องว่างพลังงานลดลงเป็น 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงให้เห็นว่าการเติม La และ Ag ช่วยลดแถบช่องว่างพลังงานของ SrTiO_3 ซึ่งหมายความว่าค่าการนำไฟฟ้าของ SrTiO_3 จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณที่ $x = 0.10$ พบว่าแถบช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 3.32 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีผลต่อการนำไฟฟ้าและการดูดกลืนของแสงของตัวอย่าง ผลสรุปนี้อาจจะทำให้ทราบว่าการเจือปริมาณ La และ Ag ที่ปริมาณน้อยอาจจะส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของตัวอย่างมากกว่าเดิมที่ปริมาณมากซึ่งส่งผลให้ช่องว่างพลังงานกว้างมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nunocha, P., Kaewpanha, M., Bongkarn, T., Phuruangrat, A., and Suriwong, T. [11] พบว่าเมื่อเพิ่มการเจือในปริมาณของ La ที่ $x = 0.1$ ในตำแหน่งของ Sr พบว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานมีค่าเท่ากับ 4.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่า SrTiO_3 ($x = 0$) ที่ค่าแถบพลังงาน

ช่องว่างเท่ากับ 4.10 อิเล็กตรอนโวลต์ อย่างไรก็ตาม ในรายงานวิจัยของ Abdi, M., Mahdikhah, V., and Sheibani, S. [13] พบว่าการเจือร่วม La และ Fe ใน SrTiO_3 ทำให้ค่าแถบพลังงานช่องว่างลดลงจาก 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์สำหรับ SrTiO_3 เป็น 2.61 อิเล็กตรอนโวลต์สำหรับการเจือร่วม La-Fe ที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt)

3. ลักษณะพื้นฐานวิทยาเชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



(ก) $x = 0$

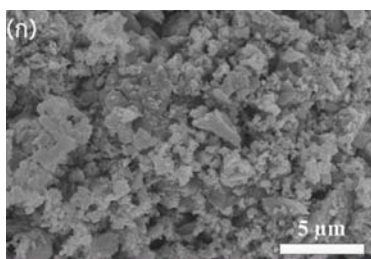
(ข) $x = 0.01$

(ค) $x = 0.10$

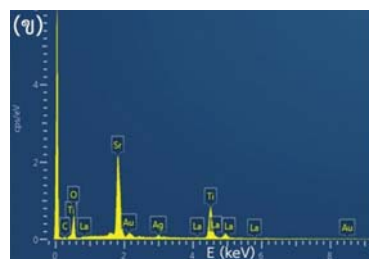
รูปที่ 4 ภาพถ่าย FESEM ลักษณะพื้นผิวของ SrTiO_3 ที่เจือด้วย La และ Ag

ลักษณะพื้นฐานวิทยาของของ SrTiO_3 ที่เจือด้วย La และ Ag ที่ $x = 0$ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะของเกรนและอนุภาคที่เป็นเม็ดหยาบ และพบรูพรุนกระจายอยู่ตามพื้นผิว มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.64 ± 0.15 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4(ก) หลังจากเจือด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะละเอียดมากขึ้นและยังพบรูพรุนที่กระจายอยู่ตามพื้นผิวมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.53 ± 0.12 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4(ข) เมื่อเจือ La และ Ag ที่ $x = 0.10$ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเกรนที่ใหญ่และเล็กกระจายทั่วพื้นผิวของตัวอย่างและยังพบรูพรุนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 ± 0.06 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4(ค) ทำให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคที่อยู่บนพื้นผิวจะมีขนาดที่เล็กเมื่อเจือ La และ Ag ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าการเจืออนุภาคเข้าไปยัง SrTiO_3 ส่งผลต่อขนาดของเกรนมีขนาดที่เล็กลงอาจจะเนื่องมาจากการขัดขวางการเติบโตของผลึกระหว่างการเตรียมสารในกระบวนการพอลิเมอร์เชิงซ้อน การลดลงของเกรนเนื่องมาจากอนุภาคที่เจือทั้งเจือ La และ Ag ใน SrTiO_3 จะเกิดการตกตะกอน (Precipitation) ระหว่างเกรนของ SrTiO_3 ทำให้ระหว่างการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1,123 เคลวิน อนุภาคที่ตกตะกอนจะขัดขวางการเติบโตของผลึกทำให้เกิดการเติบโตของผลึกที่ช้าส่งผลให้ผลึกมีขนาดเกรนที่เล็กลง ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yasukawa, M., Ueda, K., Fujitsu, S., and Hosono, H. [14] ซึ่งรายงานว่า การเจือ La ใน SrSnO_3 ($\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{SnO}_3$) พบว่าปริมาณการเจือ La ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดลงของขนาดเกรน อีกทั้งการขึ้นรูปเป็นเม็ดแข็งยังคงพบรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของเม็ดสารอีกด้วย

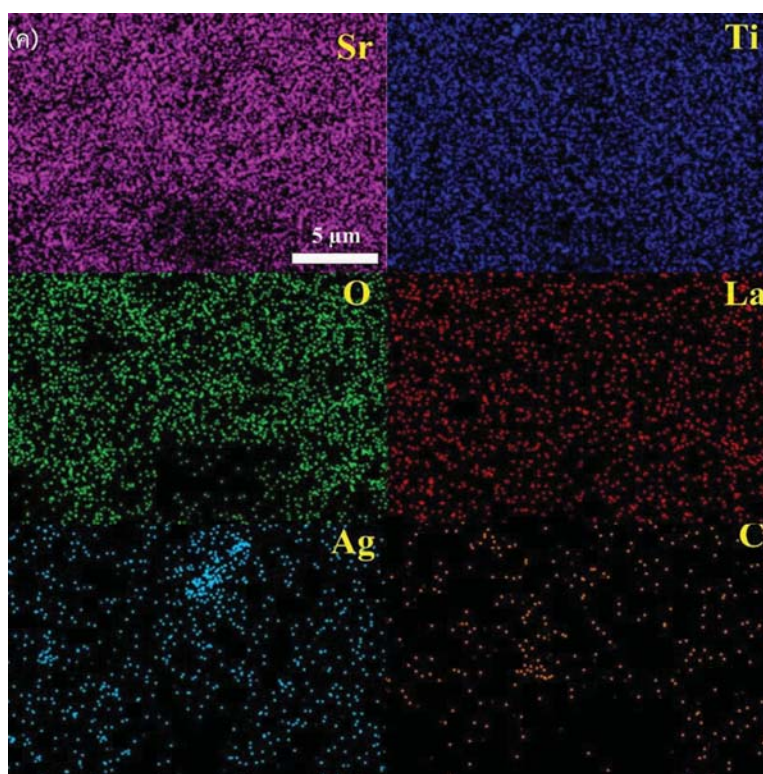
4. ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์



(ก) ภาพ FESEM $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_{x/2}\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$
ที่ $x = 0.10$



(ข) สเปกตรัม EDS ของ Sr Ti O
La และ Ag



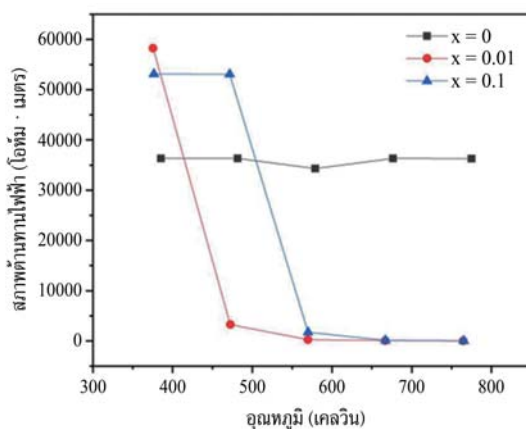
(ค) EDS Mapping ของ Sr Ti O La และ Ag

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

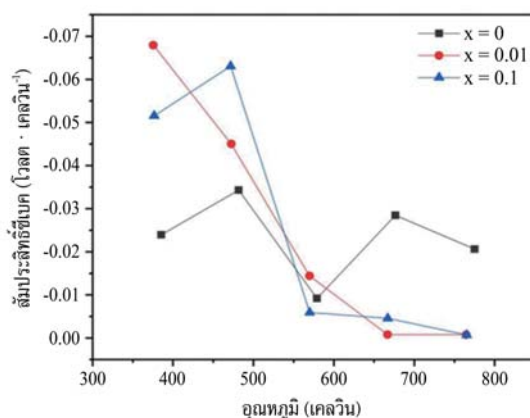
รูปที่ 5(ก) เป็นภาพ FESEM และรูปที่ 5(ข) แสดงสเปกตรัม EDS ของ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_{x/2}\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ที่ $x = 0.10$ พบว่าพื้นผิวมีอนุภาคขนาดต่าง ๆ และรูพรุนกระจายทั่วบริเวณพื้นผิว และองค์ประกอบธาตุในตัวอย่างประกอบไปด้วยธาตุ Sr Ti O La Ag และ C ส่วน Au เป็นสารที่ใช้ในการเคลือบตัวอย่างเพื่อให้ นำไฟฟ้า รูปที่ 5(ค) แสดงภาพ EDS Mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในเนื้อสาร พบว่า Sr Ti และ O มีการกระจายตัวของปริมาณธาตุที่ค่อนข้างหนาแน่นตามเนื้อสาร ส่วน La และ Ag กระจายตัว สม่่าเสมอตามปริมาณที่น้อยลง ซึ่งยืนยันการเจือร่วม La และ Ag เข้าไปยัง SrTiO_3 ประสบความสำเร็จ

5. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก (ZEM-3)

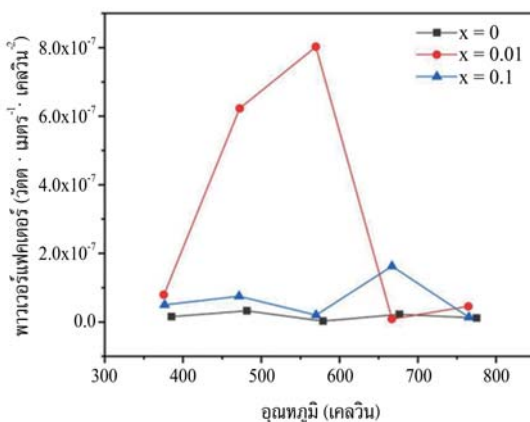
5.1 สภาพต้านทานไฟฟ้า สัมประสิทธิ์ซีเบคและพาวเวอร์แฟกเตอร์



(ก) สภาพต้านทานไฟฟ้า



(ข) สัมประสิทธิ์ซีเบค



(ค) พาวเวอร์แฟกเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_{x/2}\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01$ และ 0.10)

รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก

รูปที่ 6(ก) แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของ SrTiO_3 ที่เจือด้วย La และ Ag พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของ SrTiO_3 ที่ $x = 0$ นั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ามีความไม่แตกต่างกันมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ 36314 - 36298 โอห์มเมตร ที่อุณหภูมิ 385 - 775 เคลวิน ซึ่งมีสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในพิสัยของฉนวน หลังจากเจือด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ และ 0.10 พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิประมาณ 400 - 600 เคลวิน หลังจากนั้นจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าคงที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สภาพต้านทานที่ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากการเจือด้วย Ag ซึ่งเป็นธาตุที่มีความเข้มข้นสูง อีกทั้งการเจืออะตอมในตำแหน่งของ Sr ทำให้เกิดจุดพร่อง (Defect) เช่นทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจน และ Sr ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นให้กับ SrTiO_3 แต่อย่างไรก็ตามการเกิดรูพรุน (Porosity) ใน SrTiO_3 ยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุมีค่าที่สุดซึ่งทำให้การสังเคราะห์ SrTiO_3 ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเผาผนึก (Sintering) และใช้เวลาเผาผนึกที่ค่อนข้างนานเพื่อลดรูพรุนให้มันน้อยลงและเป็นการเพิ่มขนาดเกรนที่ใหญ่เพื่อลดสภาพต้านทานไฟฟ้า [15] โดยสภาพต้านทานไฟฟ้าของ SrTiO_3 ที่ $x = 0.01$ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำกว่า $x = 0.10$ ที่ช่วงอุณหภูมิ 400 - 600 เคลวิน และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด คือ 12.54 โอห์มเมตร ที่ 775 เคลวิน ต่ำกว่า SrTiO_3 ที่ $x = 0.1$ ($\rho = 37.56$ โอห์มเมตร) สภาพต้านทานไฟฟ้าของ SrTiO_3 ที่เจือด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ มีค่าต่ำเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นพาหะ (Carrier Concentration) หรือสภาพคล่องตัว (Carrier Mobility) ซึ่งตรงกับรายงานของ Wu, C., Li, J., Fan, Y., Xing, J., Gu, H., Zhou, Z., Lu, X., Zhang, Q., Wang, L., and Jiang, W. [16] ได้รายงานการเจือในโอเบียม (Niobium, Nb) และเคมีรีดิวซ์แกรฟีน (Reduced Graphene Oxide) ใน SrTiO_3 เมื่อปริมาณของ Nb และเคมีรีดิวซ์แกรฟีนเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นพาหะและสภาพคล่องตัวมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุเพิ่มมากขึ้น ค่าคิดลบของสัมประสิทธิ์ซีเบคของทุกตัวอย่างแสดงให้เห็นว่า $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type Semiconductor) ดังรูปที่ 6(ข) โดยมีอิเล็กทรอนิกส์เป็นพาหะส่วนมากในวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ SrTiO_3 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกหลังจากนั้นมีแนวโน้มลดลงและมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเท่ากับ -0.021 โวลต์ต่อเคลวิน ที่อุณหภูมิ 775 เคลวิน จากกราฟสัมประสิทธิ์ซีเบคของ SrTiO_3 มีค่าอยู่ในช่วง -0.01 - 0.04 โวลต์ต่อเคลวิน หลังจากเจือ La และ Ag ที่ $x = 0.01$ และ 0.10 ผลปรากฏว่าในช่วงอุณหภูมิ 400 - 500 เคลวิน ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของ La และ Ag ที่เจือ SrTiO_3 มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่า SrTiO_3 แต่หลังจากอุณหภูมิ 500 เคลวิน ค่าสัมประสิทธิ์ของทั้ง SrTiO_3 ที่เจือ La และ Ag ที่ $x = 0.01$ และ 0.10 กลับลดลงต่ำกว่า SrTiO_3 ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการเกิดการกระเจิงของพาหะ (Carrier Scattering) มีค่าลดลงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคลดลงไปด้วยอีกทั้งรูพรุนที่เกิดขึ้นยังส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค หลังเจือด้วย La และ Ag ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคลดลงเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคแปรผันกับความเข้มข้นพาหะและมวลยังผลดังสมการที่ 2

สำหรับค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Ag}_{x/2}\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01$ และ 0.1) ดังรูปที่ 6(ค) แสดงให้เห็นว่าค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ของ SrTiO_3 ($x = 0$) มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเนื่องมาจากการคำนวณพาวเวอร์แฟคเตอร์ขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้าของ SrTiO_3 มีค่าไม่แตกต่างกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

จึงทำให้ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 1.17×10^{-8} วัตต์เมตร⁻¹เคลวิน⁻² ที่อุณหภูมิ 775 เคลวิน และมีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์สูงสุดเท่ากับ 3.24×10^{-8} วัตต์เมตร⁻¹เคลวิน⁻² ที่อุณหภูมิ 481 เคลวิน หลังจากเติม SrTiO₃ ถูกเจือด้วย La และ Ag ที่ปริมาณ $x = 0.01$ และ 0.10 ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์มีค่าสูงกว่า SrTiO₃ ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ของสาร SrTiO₃ ที่เจือด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเท่ากับ 8.02×10^{-7} วัตต์เมตร⁻¹เคลวิน⁻² ที่อุณหภูมิ 569 เคลวิน จากนั้นลดลง ซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับ SrTiO₃ ที่เจือด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดทำให้ผลการคำนวณค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์มีค่าสูงสุด Ito, M. and Matsuda, T. ได้รายงานการเจือ SrTiO₃ ด้วยอิตเทรียม (Yttrium, Y) ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1040×10^{-6} วัตต์เมตร⁻¹เคลวิน⁻² ที่อุณหภูมิ 630 เคลวิน สำหรับ Sr_{0.9}Y_{0.1}TiO₃ ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 1673 เคลวิน และมีค่า ZT สูงสุดเท่ากับ 0.146 ที่อุณหภูมิ 870 เคลวิน [17] และ Lin, J- H., Chii-Shyang Hwang, C- S., and Sie, F-R. ได้สังเคราะห์ SrTiO₃ ที่เจือร่วมด้วย Nd และดิสโพรเซียม (Dysprosium, Dy) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State Reaction) ผลวิจัยพบว่า Sr_{0.83}Dy_{0.03}Nd_{0.14}TiO₃ มีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1250×10^{-6} วัตต์เมตร⁻¹เคลวิน⁻² ที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน และมีค่า ZT สูงสุดเท่ากับ 0.19 ที่อุณหภูมิ 673 เคลวินสำหรับ Sr_{0.87}Dy_{0.07}Nd_{0.06}TiO₃ [2] จากผลการวิจัยนี้พบว่าค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ขึ้นกับปัจจัยของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อเติม La และ Ag ส่งผลให้ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ของสาร SrTiO₃ ที่เจือด้วย La และ Ag มีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งผลดีในการพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถพัฒนาสมบัติด้านไฟฟ้าของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในอนาคตได้

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เราประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ SrTiO₃ ที่เจือร่วมด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ และ 0.10 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีพอลิเมอร์เชิงซ้อน และเทคนิคการอัดร้อน ผลการวิจัยพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตรงกับ SrTiO₃ และไม่พบเฟสแปลกปลอม การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่าบริเวณพื้นผิวของ SrTiO₃ ที่เจือด้วย La และ Ag ประกอบด้วยพื้นผิวที่มีลักษณะของเกรนค่อนข้างละเอียด จับกันเป็นกลุ่มก้อน มีการจัดเรียงตัวกันของอนุภาคอย่างสุ่มและอีกทั้งยังพบรูพรุนที่กระจายอยู่ตามพื้นผิว อันเนื่องมาจากกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้อุณหภูมิและความดันที่น้อยเกินไป สภาพต้านทานไฟฟ้าของ SrTiO₃ ที่เจือด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ มีค่าต่ำสุด คือ 12.54 โอห์มเมตร ที่ 775 เคลวิน ซึ่งต่ำกว่า SrTiO₃ ที่ $x = 0.10$ ($\rho = 37.56$ โอห์มเมตร) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่ขึ้นกับอุณหภูมิของ Sr_{1-x}La_{x/2}Ag_{x/2}TiO₃ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และมีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดคือ -0.021 โวลต์ต่อเคลวิน ที่อุณหภูมิ 775 เคลวิน ที่ $x = 0$ ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ของสาร SrTiO₃ ที่เจือด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.02×10^{-7} วัตต์เมตร⁻¹เคลวิน⁻² ที่อุณหภูมิ 569 เคลวิน ซึ่งสอดคล้องกับ SrTiO₃ ที่เจือด้วย La และ Ag ที่ $x = 0.01$ ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์มีค่าสูงสุดที่ได้ที่ $x = 0.01$ เนื่องจากเมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเป็นผลการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของพาหะเป็นผลทำให้ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเจือร่วม La และ Ag ใน SrTiO₃ สามารถลดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้และปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ของ SrTiO₃ ได้

ข้อเสนอแนะ

ในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปสารด้วยกระบวนการอัดร้อน ควรใช้ความดันที่สูงขึ้นมากกว่า 80 เมกะปาสคาล และการเผาผนึกควรใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 1,123 เคลวิน เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและความแข็งแรงของเม็ดสารไม่ให้เปราะและเกิดการแตกหักอีกทั้งมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณะอาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ ที่อำนวยความสะดวกทางด้านอุปกรณ์และสถานที่ ตลอดจนคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ที่ได้ให้ประสบการณ์และความรู้ และสุดท้ายผู้วิจัยขอขอบพระคุณมาลัยกรอ้อมครัว ที่คอยให้ความอบอุ่นและให้กำลังใจผู้วิจัยเป็นอย่างดี

References

- [1] Okhay, O., Zlotnik, S., Xie, W., Orlinski, K., Gallo, M. J. H., Otero-Iruruta, G., Fernandes, A. J. S., Pawlak, D. A., Weidenkaff, A., and Tkach, A. (2019). Thermoelectric Performance of Nb-doped SrTiO₃ Enhanced by Reduced Graphene Oxide and Sr Deficiency Cooperation. **Carbon**. Vol. 143, Issue 46, pp. 215-222
- [2] Lin, J- H., Chii-Shyang Hwang, C- S., and Sie, F-R. (2020). Preparation and Thermoelectric Properties of Nd and Dy co-doped SrTiO₃ Bulk Materials. **Materials Research Bulletin**. Vol. 122, p. 110650. DOI: 10.1016/j.materresbull.2019.110650
- [3] Devi, N. Y., Vijayakumar, K., Rajasekaran, P., Alagar Nedunchezian, A. S., Sidharth, D., Masaru, S., Arivanandhan, M., and Jayavel, R. (2021). Effect of Gd and Nb Co-Substitution on Enhancing the Thermoelectric Power Factor of Nanostructured SrTiO₃. **Ceramics International**. Vol. 47, pp. 3201-3208. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.158
- [4] Muta, H., Kurosaki, K., and Yamanaka, S. (2005). Thermoelectric Properties of Reduced and La-doped Single-Crystalline SrTiO₃. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 392, Issue 1-2, pp. 306-309. DOI: 10.1016/j.jallcom.2004.09.005
- [5] Park, D., Ju, H., and Kim, J. (2019). One-Pot Fabrication of Ag-SrTiO₃ Nanocomposite and Its Enhanced Thermoelectric Properties. **Ceramics International**. Vol. 45, Number 14, pp. 16969-16975. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.05.245
- [6] Srivastava, D., Norman, C., Azough, F., Marion C. Schäfer, M. C., Guilmeau, E., and Freer, R. (2018). Improving the Thermoelectric Properties of SrTiO₃-Based Ceramics with Metallic Inclusions. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 731, pp. 723-730. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.10.033

- [7] Ito, M. and Ohira, N. (2016). Effect of TiB_2 Addition on Spark Plasma Sintering and Thermoelectric Performance of Y-doped SrTiO_3 Synthesized by Polymerized Complex Process. **Composites Part B: Engineering**. Vol. 88, pp. 108-113. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.10.031
- [8] Lakhonchai, A., Chingsungnoen, A., and Poolcharuansin, P. (2019). Aluminum-Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by Reactive dc Magnetron Sputtering with Metal, Transition, and Oxide Modes. **KKU Science Journal**. Vol. 47, Issue 2, pp. 327-338
- [9] Thomas, R., Rao, A., Bhardwaj, R., Wang, L. Y., and Kuo, W. K. (2019). Reduction in Thermal Conductivity and Electrical Resistivity in $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3/\text{Cu}_2\text{Se}$ Composite Thermoelectric System. **Materials Research Bulletin**. Vol. 120, p. 110607. DOI: 10.1016/j.materresbull.2019.110607
- [10] Zhao, L., Yang, J., Zou, Y., Hu, J., Liu, G., Shao, H., Zhang, X., Shi, Z., Hussain, S., and Qiao, G. (2021). Tuning Ag Content to Achieve High Thermoelectric Properties of Bi-doped p-type Cu_3SbSe_4 -Based Materials. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 872, p. 159659. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.159659
- [11] Nunocha, P., Kaewpanha, M., Bongkarn, T., Phuruangrat, A., and Suriwong, T. (2021). A New Route to Synthesizing La-doped SrTiO_3 Nanoparticles Using the Sol-Gel Auto Combustion Method and Their Characterization and Photocatalytic Application. **Materials Science in Semiconductor Processing**. Vol. 134, p. 106001. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.106001
- [12] Jiang, C., Fan, X., Feng, B., Hu, J., Xiang, Q., Li, G., Li, Y., and He, Z. (2017). Thermal Stability of p-type Polycrystalline Bi_2Te_3 -Based Bulks for the Application on Thermoelectric Power Generation. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 692, pp. 885-891. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.09.143
- [13] Abdi, M., Mahdikhah, V., and Sheibani, S. (2020). Visible Light Photocatalytic Performance of La-Fe co-doped SrTiO_3 Perovskite Powder. **Optical Materials**. Vol. 102, p. 109803. DOI: 10.1016/j.optmat.2020.109803
- [14] Yasukawa, M., Ueda, K., Fujitsu, S., and Hosono, H. (2017). Thermoelectric Properties and Figure of Merit of Perovskite-Type $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{SnO}_3$ Ceramics. **Ceramic International**. Vol. 43, Issue 13, pp. 9653-9657. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.04.136
- [15] Singh, S. P., Kanas, N., Desissa, T. D., Johnsson, M., Einarsrud, M- A., Norby, T., and Wiik, K. (2020). Thermoelectric Properties of A-site Deficient La-doped SrTiO_3 at 100-900 °C Under Reducing Conditions. **Journal of the European Ceramic Society**. Vol. 40, Issue 2, pp. 401-407
- [16] Wu, C., Li, J., Fan, Y., Xing, J., Gu, H., Zhou, Z., Lu, X., Zhang, Q., Wang, L., and Jiang, W. (2019). The Effect of Reduced Graphene Oxide on Microstructure and Thermoelectric Properties of Nb-doped A-Site-Deficient SrTiO_3 Ceramics. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 786, pp. 884-893. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.376
- [17] Ito, M. and Matsuda, T. (2009). Thermoelectric Properties of Non-doped and Y-doped SrTiO_3 Polycrystals Synthesized by Polymerized Complex Process and Hot Pressing. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 477, Issue 1-2, pp. 473-477. DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.10.031