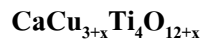


ผลของปริมาณคอปเปอร์ต่อค่าแลตทิซพารามิเตอร์และสัณฐานวิทยาของผงผลึก



ชมพูนุช พิชฌามัก*

Effect of Cu content on lattice parameter and morphology of $\text{CaCu}_{3+x}\text{Ti}_4\text{O}_{12+x}$ powders

Chompoonuch Puchmark*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิจิตร 65000

Corresponding author. E-mail: chompoonuchp@nu.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ได้เตรียมผงผลึกแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนียมออกไซด์ ($\text{CaCu}_{3+x}\text{Ti}_4\text{O}_{12+x}$: $\text{CC}(3+x)\text{TO}$) แปรปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปริมาณตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.2 ด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์ อุณหภูมิเผาแคลไซน์ระหว่าง 600 ถึง 900 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบความบริสุทธิ์ของเฟสเพอโรฟสไกต์เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 850 °C ขึ้นไป ในทุกสัดส่วนของ Cu กำหนดค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” พบว่าผงผลึกที่มีปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์เป็น 3.1 เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C มีค่าเป็น 7.391 Å ใกล้เคียงกับค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” ของฐานข้อมูลมาตรฐาน หมายเลข 75-2188 ศึกษาสัณฐานวิทยาของผงผลึกแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนียมออกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่ามีลักษณะเกาะกันเป็นก้อน ก่อนข้างกลม ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.80 ถึง 0.89 μm มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณ Cu

คำสำคัญ: $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ แลตทิซพารามิเตอร์ สัณฐานวิทยา

Abstract

In this research, calcium copper titanium oxide ($\text{CaCu}_{3+x}\text{Ti}_4\text{O}_{12+x}$: $\text{CC}(3+x)\text{TO}$) powders were prepared by mixed oxide method under various precursor CuO from 2.8 to 3.2 mole percent and calcinated from 600 to 900 °C for 8 h. Phase formation was examined by X-ray diffraction technique (XRD). All of Cu-stoichiometry in $\text{CC}(3+x)\text{TO}$ powders were found to contain pure phase perovskite above 850 °C. The calculated lattice parameter “a” with Cu = 3.1 mole percent and

calcined at 900 °C was 7.391 Å which closed to that of reported in the basis of Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS) data number 75-2188. The morphological evolution during calcinations temperature and Cu-stoichiometry were investigated using scanning electron microscopy (SEM). It was found that, the particles of calcined powders were seen as agglomeration and the morphological feature of particles approached to spherical shape. The average particle sizes tend to increase with increasing calcinations temperatures and increasing amount of Cu content.

Key words: CaCu₃Ti₄O₁₂, lattice parameter, morphology

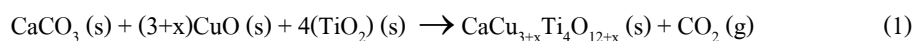
บทนำ

วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงมีความสำคัญในการนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเก็บประจุ หน่วยความจำแบบสแตติกและแบบไดนามิก เป็นต้น ซึ่งเมื่อก่อนนี้วัสดุที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงได้แก่พวกเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีเล็กเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก เช่น แบเรียมไททานเนต (BaTiO₃) เลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) และเลดแมกนีเซียมไนโอเบต (Pb(Mg_{1/3}Nb_{1/3})O₃) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนี้แปรผันกับอุณหภูมิ ซึ่งการที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกขึ้นกับอุณหภูมินี้ไม่เป็นที่พึงปรารถนาในการนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอย่างมาก (Ni *et al.*, 2006) เมื่อเร็วๆ นี้มีการค้นพบวัสดุที่มีโครงสร้างเพอโรพสไกต์ใหม่ ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงมาก ใช้งานในช่วงอุณหภูมิกว้าง และหนึ่งในจำนวนนั้นก็คือแคลเซียมคอปเปอร์ไททานเนียมออกไซด์ (Calcium copper titanium oxide: CaCu₃Ti₄O₁₂) หรือเรียกย่อๆ ว่า CCTO มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก มีแลตทิซพารามิเตอร์ $a = b = c = 7.391(1)$ Å (Powder Diffraction File, 2000) ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) แทบจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยมีค่าประมาณ 10,000 ในช่วงของอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 600 K ทั้งในรูปแบบของเซรามิกและผลึกเชิงเดี่ยว (Subramanian *et al.*, 2000; Ramirez *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2002; Cohen *et al.*, 2003) จากการศึกษาของ Bender และ Pan (2005) พบว่าเซรามิก CCTO มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงมากถึง 11,700 ณ อุณหภูมิห้อง ได้มีการศึกษาถึงผลของการเพิ่มปริมาณ CuO เพื่อทำให้เกิดการแน่นตัวขึ้นของวัสดุไดอิเล็กทริกในระหว่างกระบวนการซินเตอร์ (Kim *et al.*, 1999; Huang *et al.*, 2001) ผลการศึกษาของ Fang และคณะ (2006) พบว่าเซรามิก CCTO ที่มีปริมาณสัดส่วนของ Cu = 3.1 มีความหนาแน่นมาก มีความต้านทานไฟฟ้าน้อย ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นและมีรูพรุนน้อยลง มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงเมื่อเทียบกับเซรามิก CCTO ที่มีปริมาณสัดส่วนของ Cu = 2.9 และ 3.0 และ Subramanian และคณะ (2000) ยังได้รายงานที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อสัดส่วนอัตราส่วนของ Cu/Ca ลดลงจาก 3.0 ถึง 2.85 จากรายงานที่มีมาก่อนข้างต้น พบว่าปริมาณ Cu จะมีผลต่อสมบัติของเซรามิก CCTO หลายอย่าง แต่ยังไม่มียางานถึงผลของปริมาณ Cu ต่อผลึกในระบบ CCTO ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึง

เลือกใช้การเตรียมผงผลึก $CC(3+x)TO$ โดยใช้สัดส่วนจำนวนโมลของ Cu เป็น 2.8 ถึง 3.2 (หรือ $CC(2.8)TO$ ถึง $CC(3.2)TO$) ด้วยวิธีมิชช้ออกไซด์ ศึกษาผลของปริมาณ Cu ที่มีต่อแลตทิซ พารามิเตอร์ เพื่อหาปริมาณ Cu และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาแคลไซน์ให้ได้ผงผลึกที่ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลมาตรฐานที่สุด เพื่อนำไปทำเป็นเซรามิกที่ดีต่อไป

ระเบียบวิธีการวิจัย

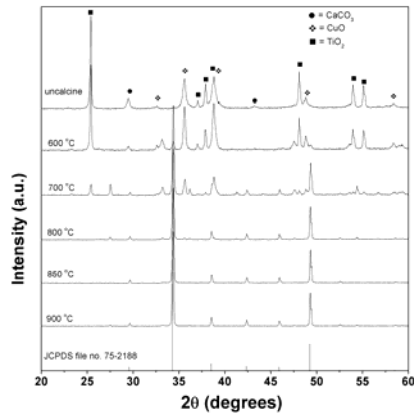
เตรียมผงผลึก $CC(3+x)TO$ ด้วยวิธีมิชช้ออกไซด์ โดยใช้สารตั้งต้นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ตามสัดส่วนจำนวนโมล $Ca:Cu:Ti$ เป็น $1:(3+x):4$ โดย $x = -0.2, -0.1, 0, 0.1$ และ 0.2 (หรือ $Cu = 2.8$ ถึง 3.2 หรือเขียนสัญลักษณ์แทนได้เป็น $CC(2.8)TO$ ถึง $CC(3.2)TO$) ดังสมการที่ (1)



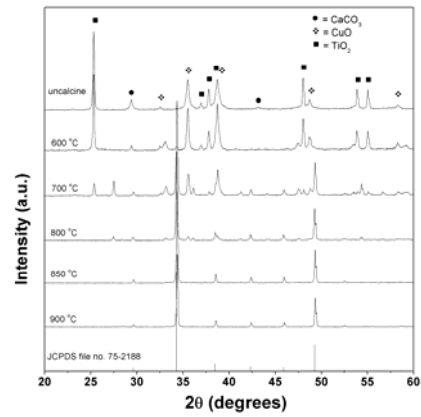
ทำการบดผสมเปียกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ลูกบดอิตเทียมเซอร์โคเนียเป็นตัวบด และใช้เอทิลแอลกอฮอล์ความบริสุทธิ์ 99.8 % เป็นตัวช่วยกระจายอนุภาค ทำการอบให้แห้งและคัดขนาดของผงผสมที่ได้โดยผ่านตะแกรงร่อน แล้วเผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 900 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที ตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเฟสของผงผลึกที่ได้โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) คำนวณหาแลตทิซพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ผลึก (Calligaris and Geremia) ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของผงผลึกที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หาขนาดของอนุภาคเฉลี่ยจากภาพถ่าย SEM

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

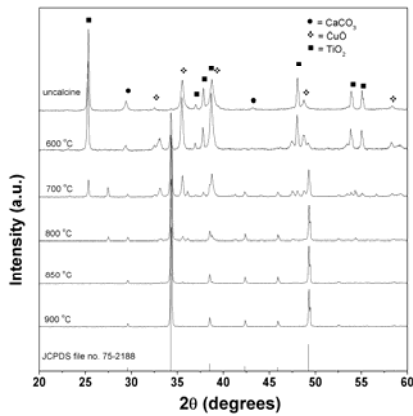
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงผลึก $CaCu_{3+x}Ti_4O_{12+x}$ เมื่อแปรค่าร้อยละโดยโมลของปริมาณคอปเปอร์เป็น 2.8, 2.9, 3.0, 3.1 และ 3.2 ($x = -0.2, -0.1, 0, 0.1$ และ 0.2) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 900 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 °C/นาที แสดงดังรูป 1



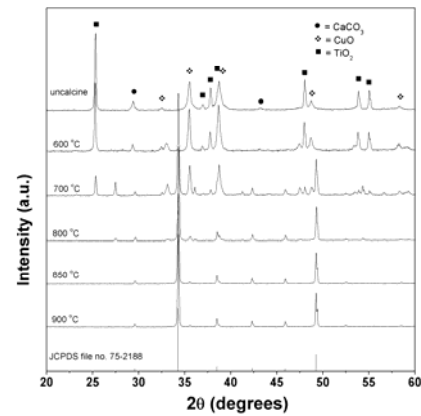
(ก)



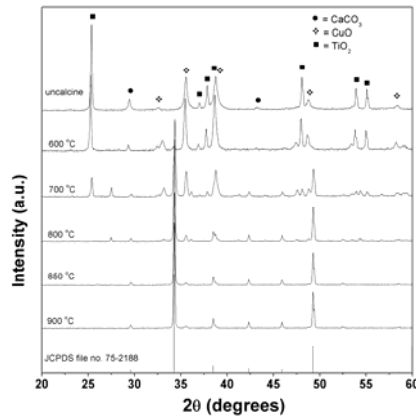
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูป 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงผลึก $\text{CaCu}_{3+x}\text{Ti}_4\text{O}_{12+x}$ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดย (●) CaCO_3 , (⊕) CuO และ (■) TiO_2 เมื่อแปรค่าปริมาณร้อยละโดยโมลของ Cu: (ก) CC(2.8)TO, (ข) CC(2.9)TO, (ค) CC(3.0)TO, (ง) CC(3.1)TO และ (จ) CC(3.2)TO

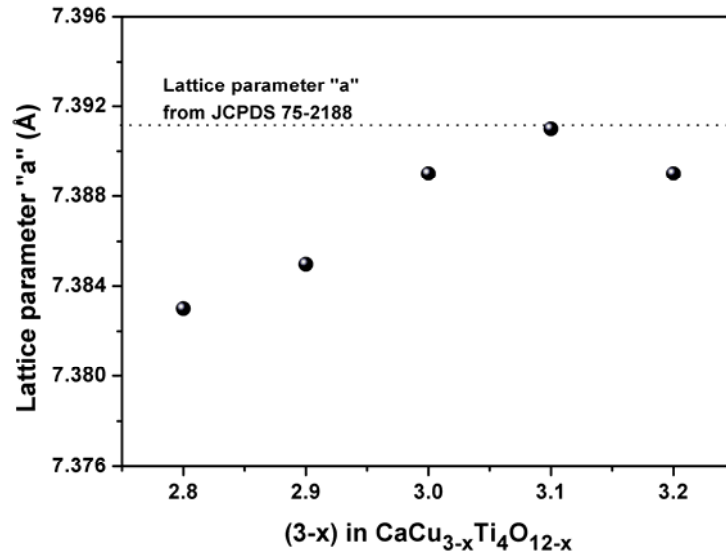
จากรูป 1 พบว่าผงผลึกของสารตัวอย่างที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 และ 700 °C ยังมีเฟสของสารตั้งต้นเหลืออยู่ และเริ่มก่อตัวเป็นผงผลึก CCTO ที่อุณหภูมิแคลไซน์ตั้งแต่ 800 °C ขึ้นไป และมีเฟสบริสุทธิ์เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C ขึ้นไป ในเกือบทุกการแปรค่าปริมาณคอปเปอร์ (ยกเว้น Cu = 2.8 และ 3.2) สามารถระบุได้ว่ามีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก สอดคล้องกับเฟสของ CCTO ในฐานข้อมูลมาตรฐานหมายเลข 75-2188 (Powder Diffraction File, 2000)

เมื่อคำนวณหาแลตทิซพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ผลึก (Calligaris and Geremia) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800, 850 และ 900 °C ของทุกการแปรค่าปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ (Cu) จะให้ค่าแสดงดังตารางที่ 1

ตาราง 1 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” ที่คำนวณได้ของผงผลึกในระบบ CCTO เมื่อแปรค่าปริมาณร้อยละโดยโมลของ Cu ตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.2 และแปรค่าอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์

อุณหภูมิการเผา แคลไซน์ (°C)	แลตทิซพารามิเตอร์ “a” (Å)				
	CC(2.8)TO	CC(2.9)TO	CC(3.0)TO	CC(3.1)TO	CC(3.2)TO
800	7.381	7.393	7.383	7.386	7.385
850	7.381	7.382	7.385	7.389	7.388
900	7.383	7.385	7.389	7.391	7.389

จากตาราง 1 พบว่า ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” ที่คำนวณได้ของผงผลึกในระบบ CCTO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์สูงขึ้น และเมื่อปริมาณจำนวนโมลของคอปเปอร์สูงขึ้นจาก ร้อยละโดยโมล 2.8 ถึง 3.1 และเมื่อปริมาณของคอปเปอร์สูงเป็นร้อยละโดยโมลเท่ากับ 3.2 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” ที่คำนวณได้เริ่มลดลง ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” ที่คำนวณได้ของผงผลึก $\text{CaCu}_{3.1}\text{Ti}_4\text{O}_{12.1}$ (CC(3.1)TO) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C มีค่าเป็น 7.391 Å ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” ในฐานข้อมูลมาตรฐานหมายเลข 75-2188 $\text{CaCu}_3\text{TiO}_4$ มากที่สุด ซึ่งค่าที่ได้นี้ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kim และคณะ (2008) ได้คำนวณไว้ กราฟแสดงค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” กับปริมาณคอปเปอร์ของผงผลึกในระบบ CCTO ที่เผาแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 900 °C เทียบกับค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” ในฐานข้อมูลมาตรฐาน แสดงดังรูป 2



รูป 2 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ "a" ของผงผลึก CCTO ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C เมื่อแปรค่าปริมาณร้อยละโดยโมลของ Cu ตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.2

จากรูป 2 จะเห็นว่าปริมาณของคอปเปอร์มีผลต่อค่าแลตทิซพารามิเตอร์ "a" ของผงผลึกในระบบ CCTO โดยปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ที่ 3.1 เป็นปริมาณที่ทำให้ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ "a" ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลมาตรฐานมากที่สุด

ในตาราง 2 แสดงร้อยละความบริสุทธิ์ของโครงสร้างแบบคิวบิกเพอโรฟสไกด์ของผงผลึก CCTO ที่แปรค่าร้อยละโดยโมลของปริมาณคอปเปอร์ตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.1 และแปรค่าอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ตั้งแต่ 600 ถึง 900 °C การหาค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของโครงสร้างแบบคิวบิกเพอโรฟสไกด์นี้ ได้จากการนำข้อมูลที่ได้จาก XRD มาคำนวณหาตามสมการ (2) (Swart and Shrouf, 1982)

$$\% \text{perovskite phase} = \left(\frac{I_{\text{perov}}}{I_{\text{perov}} + I_{\text{CaCO}_3} + I_{\text{CuO}} + I_{\text{TiO}_2}} \right) \times 100 \quad (2)$$

ซึ่งสมการ (2) นี้ นิยมนำมาใช้หาค่าความบริสุทธิ์ของสารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกด์เชิงซ้อน โดย I_{perov} , I_{CaCO_3} , I_{CuO} และ I_{TiO_2} เป็นความเข้มของพีค (220), CaCO_3 , CuO และ TiO_2 ตามลำดับ

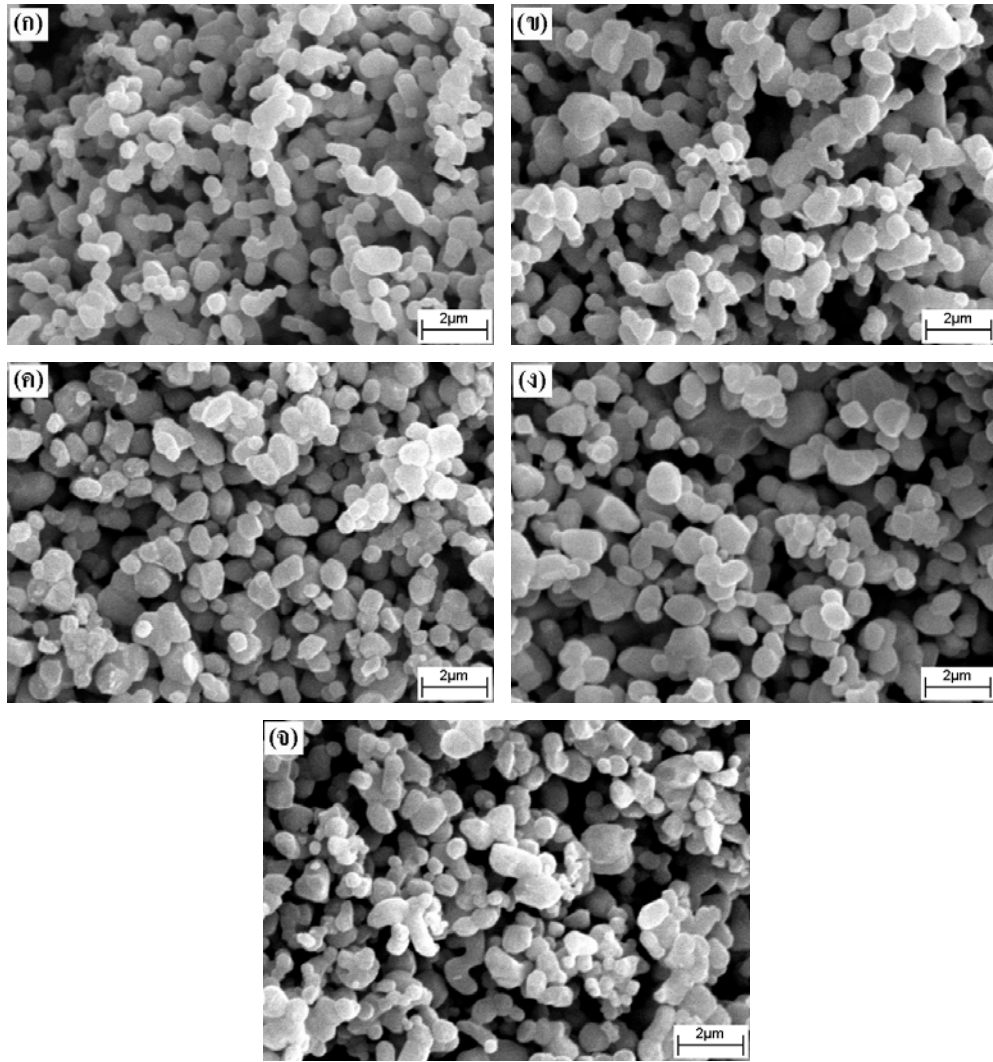
ตาราง 2 ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเฟสเพอโรพสไกต์ของผงผลึกในระบบ CCTO เมื่อแปรค่าปริมาณ ร้อยละ โดยโมลของ Cu ตั้งแต่ 2.8-3.2 และแปรค่าอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์

อุณหภูมิการเผา แคลไซน์ (°C)	ร้อยละความบริสุทธิ์ของเฟสเพอโรพสไกต์ (%)				
	CC(2.8)TO	CC(2.9)TO	CC(3.0)TO	CC(3.1)TO	CC(3.2)TO
600	18.93	18.06	21.78	18.63	18.21
700	41.24	41.31	50.84	51.11	43.30
800	85.55	79.06	85.59	84.65	80.50
850	100	100	100	100	97.24
900	95.09	100	100	100	97.73

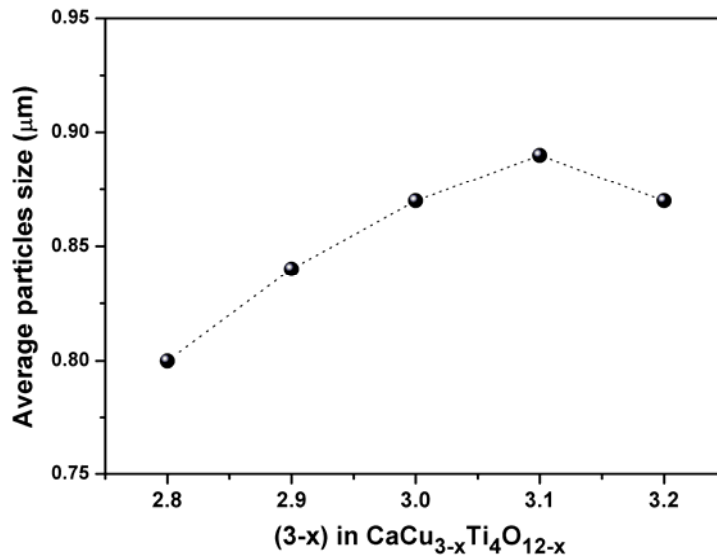
จากตาราง 2 แสดงค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเฟสเพอโรพสไกต์ของผงผลึก CCTO ที่เผา แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ และที่ร้อยละโดยโมลของปริมาณคอปเปอร์ต่างๆ กัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิการ เผาแคลไซน์สูงขึ้นค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเฟสเพอโรพสไกต์มีค่ามากขึ้น โดยมีความบริสุทธิ์เป็น ร้อยละ 100 เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C ขึ้นไป ยกเว้นที่ปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ เป็น 2.8 และ 3.2 เนื่องจากปริมาณของคอปเปอร์นั้นน้อยและมากเกินไปจึงทำให้ค่าร้อยละความ บริสุทธิ์ของเฟสเพอโรพสไกต์ไม่เป็นร้อยละ 100 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณคอปเปอร์น้อยเกินไปทำให้ เกิดเฟสเพอโรพสไกต์ของ CCTO ไม่ครบ และในส่วนที่ปริมาณคอปเปอร์มากเกินไปนั้นทำให้เฟส ของ CuO ยังเหลืออยู่ จึงทำให้ค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเฟสเพอโรพสไกต์ลดลงนั่นเอง

จากข้อมูลที่ได้จากการ XRD การคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ “a” และจากการหาร้อยละ ค่าความบริสุทธิ์ของเฟสเพอโรพสไกต์ จึงเลือกอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่ 900 °C มาทำการ ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของผงผลึก CCTO ที่แปรค่าปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ ตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.2 แสดงดังรูปที่ 3

รูป 3 เป็นภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก CCTO ที่แปร ค่าปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.2 และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากภาพถ่ายจะเห็นว่าสัณฐานวิทยาของผงผลึก CCTO มีปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ ตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.2 นั้น มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยที่ลักษณะของอนุภาคเป็นก้อนค่อนข้างกลม เกาะกลุ่มกันมีขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดย โมลของคอปเปอร์ และใหญ่ที่สุดที่ปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์เป็น 3.1 ขนาดของอนุภาค เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.80 ถึง 0.89 μm ดังกราฟในรูป 4



รูป 3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก CCTO ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยมีปริมาณร้อยละจำนวนโมลของ Cu: (ก) 2.8, (ข) 2.9, (ค) 3.0, (ง) 3.1 และ (จ) 3.2



รูป 4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก CCTO ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C เมื่อแปรค่าปริมาณร้อยละโดยโมลของ Cu ตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.2

จากกราฟในรูป 4 จะเห็นว่าแนวโน้มของขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงผลึก CCTO ที่แปรค่าปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ มีแนวโน้มเดียวกันกับค่าคงที่แลตทิซพารามิเตอร์ “a” ที่แสดงในกราฟรูปที่ 2 จากข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณของคอปเปอร์มีส่วนสำคัญต่อค่าพารามิเตอร์ “a” ในโครงสร้าง (Li *et al.*, 2005)

สรุปผลการทดลอง

ผลของปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ต่อค่าแลตทิซพารามิเตอร์และสัมฐานวิทยาของผงผลึกแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนียมออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีมิกซ์ออกไซด์นั้นพบว่าเมื่อเพิ่มค่าแลตทิซพารามิเตอร์เพิ่มขึ้น และขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นตามปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.1 เมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์เป็น 3.2 ค่าทั้งสองมีแนวโน้มลดลง เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเผาแคลไซน์และปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์ที่ได้จากการทดลองนี้เพื่อให้ได้โดยค่าของแลตทิซพารามิเตอร์ “a” ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลมาตรฐานที่สุดคือ อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 900 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยมีปริมาณร้อยละโดยโมลของคอปเปอร์เป็น 3.1 (CC(3.1)TO)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้รับความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบทางเคมี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.ทวี ตันฉศิริ และรองศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ รุจินากุล ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ โทรเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

- Bender, B.A. and Pan, M-J. (2005). The effect of processing on the giant dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. *Mat. Sci. Eng. B*, 117, 339-347.
- Cohen, M.H., Neaton, J.B., He, L. and Vanderbilt, D. (2003). Extrinsic models for the dielectric response of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. *J. Appl. Phys.*, 94 (5), 3299-3306.
- Calligaris, M. and Geremia, S. *X-ray powder program version 1.20A*, Department of Chemical Sciences, University of Trieste, Via Licio Giorgeri 1, 34100 Trieste, Italy
- Fang, T., Mei, L. and Ho, H. (2006). Effects of Cu stoichiometry on the microstructures, barrier-layer structure, electrical conduction, dielectric responses, and stability of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. *Acta Materialia*, 54, 2867-2875.
- Huang, C-L., Wang, M-H. and Yu, C-C. (2001). Low firable BiNbO_4 based microwave dielectric ceramics. *Ceram. Int.*, 27, 343-350.
- Kim, D-W., Kim, T-G., Hong, K.S. (1999). Low-firing of CuO-doped anatase. *Mater. Res. Bull.*, 34 (5), 771-781.
- Kim, Y.J., Wakimoto, S., Shapiro, S.M., Gehring, P.M. and Ramirez, A.P. (2002). Neutron scattering study of antiferromagnetic order in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. *Solid State Commun.*, 121, 625-629.
- Kim, K-M., Lee, J-H., Lee, K-M., Kim, D-Y., Riu, D-H. and Lee, S.B. (2008). Microstructural evolution and dielectric properties of Cu-deficient and Cu-excess $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics. *Mater Res Bull.*, 43, 284-291.
- Li, G-L., Yin, Z. and Zhang, M-S. (2005). First-principles study of the electronic and magnetic structures of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. *Physics Letters A*, 344, 238-246.

- Ni, L., Chen, X.M., Liu, X.Q. and Hou, R.Z. (2006). Microstructure-dependent giant dielectric response in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics. *Solid State Commun.*, 139, 45-50.
- Powder Diffraction File, Card No. 75-2188. (2000). Joint Committee for Powder Diffraction Standards (JCPDS) PDF-4. International Centre for Diffraction Data (ICDD).
- Ramirez, A.P., Subramanian, M.A., Garbel, M., Blumberg, G., Li, D., Vogt, T. and Shapiro, S.M. (2000). Giant dielectric constant response in copper-titanate. *Solid State Commun.* 115, 217–222.
- Subramanian, M.A., Dong, L., Resner, B.A. and Sleight, A.W. (2000). High dielectric constant in $\text{ACu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ phases. *J. Solid State Chem.*, 151, 323–325.
- Swart, S.L. and Shrout, T.R. (1982). Fabrication of perovskite lead magnesium niobate. *Mater. Res. Bull.*, 17, 1245-1250.