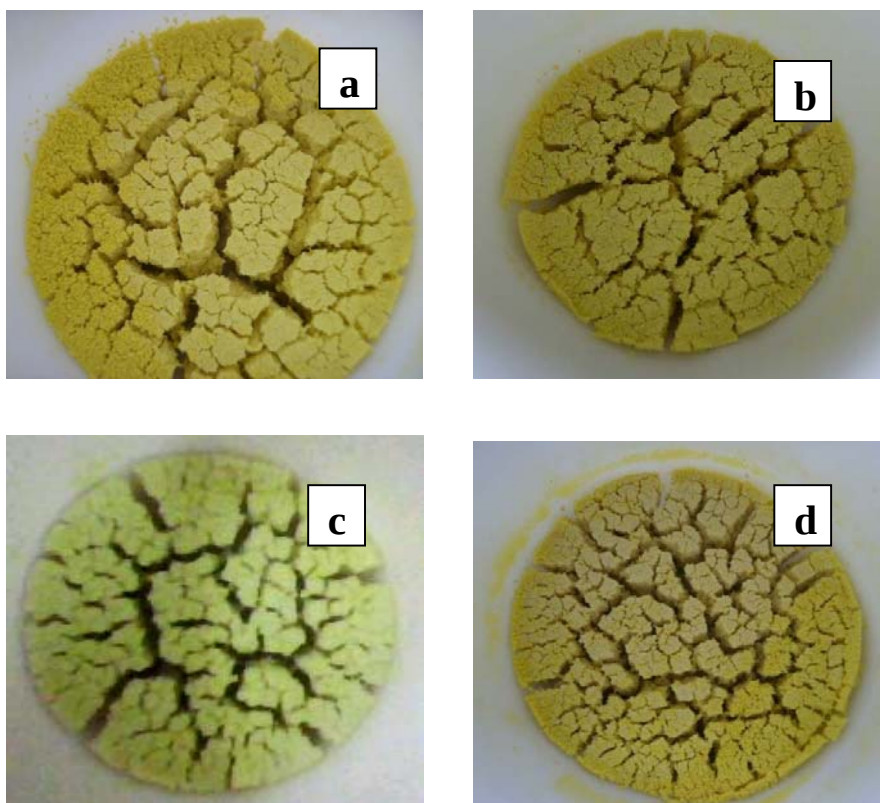
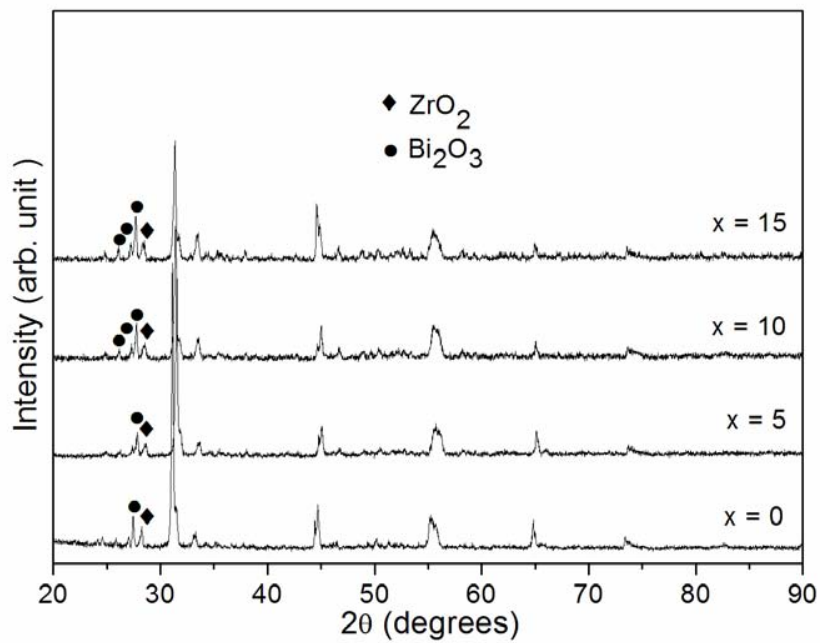




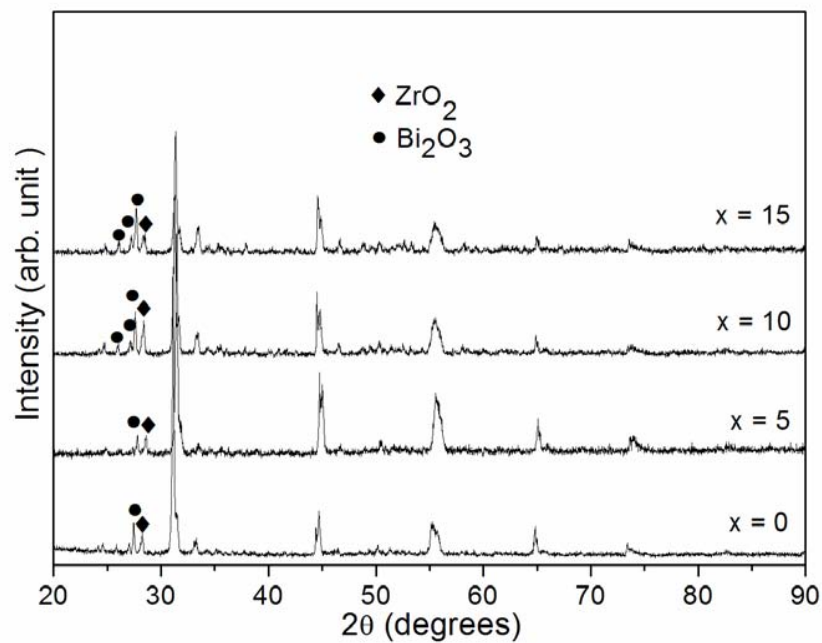
รูป 4.55 ภาพถ่ายผ้ง BNZ หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศา เมื่อ a-d คือ ที่ปริมาณการเติม  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตาราง 4.20 ข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียมและการเผาแคลไซน์โดยเปลี่ยนแปลง  $\text{ZrO}_2$

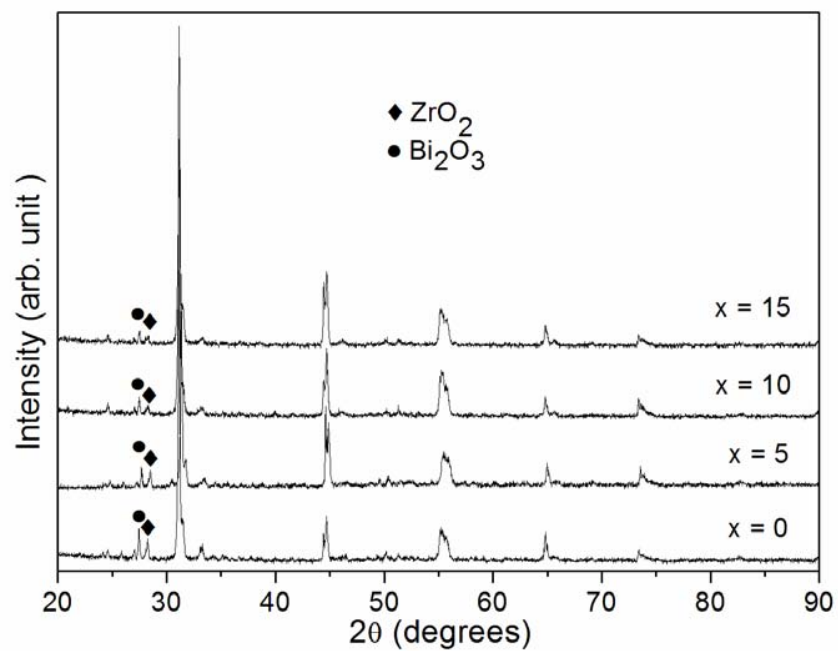
| สาร                     | อุณหภูมิ | น้ำหนักหายไปหลังบดผสม | น้ำหนักหายไปหลังเผาแคลไซน์ |
|-------------------------|----------|-----------------------|----------------------------|
| BNZ                     | 800      | 0.0340                | 1.3326                     |
| BNZ/5wtZrO <sub>2</sub> | 800      | 0.0358                | 1.2404                     |
| BNZ/5wtZrO <sub>2</sub> | 800      | 0.0296                | 1.4939                     |
| BNZ/5wtZrO <sub>2</sub> | 800      | 0.0571                | 1.2835                     |



รูป 4.56 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ/ $x\text{Bi}_2\text{O}_3$  แคลไซน์ที่ 800 °C



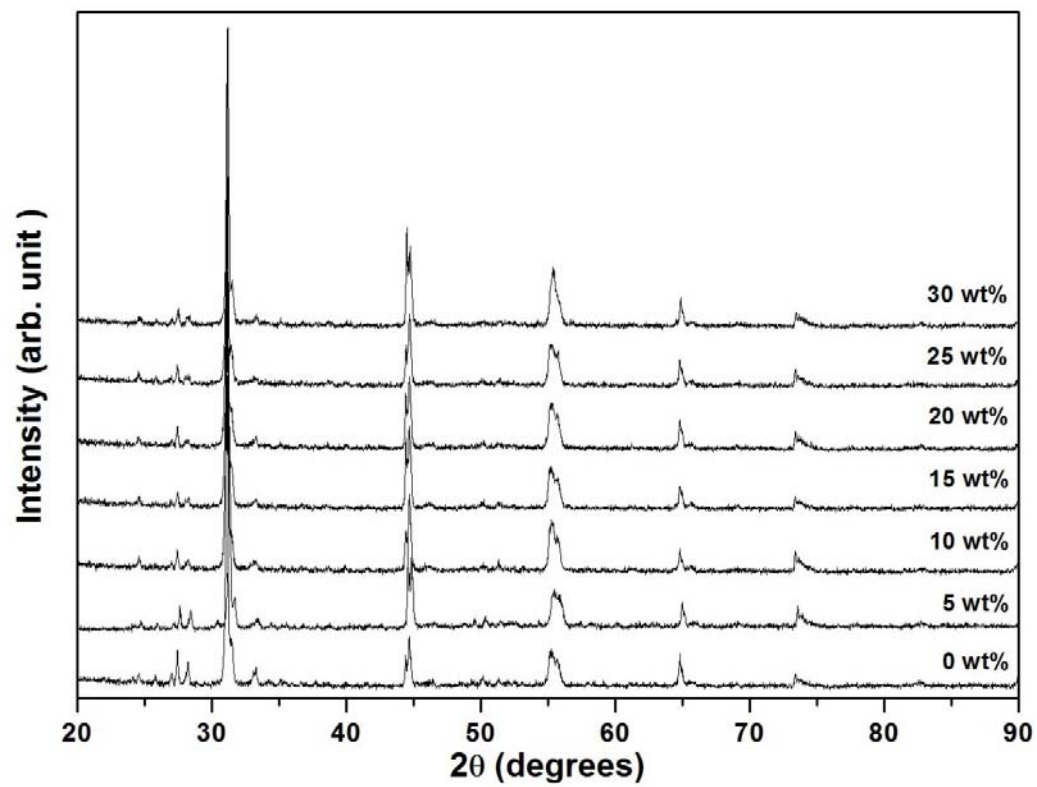
รูป 4.57 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ/ $x\text{ZrO}_2$  แคลไซน์ที่ 800 °C



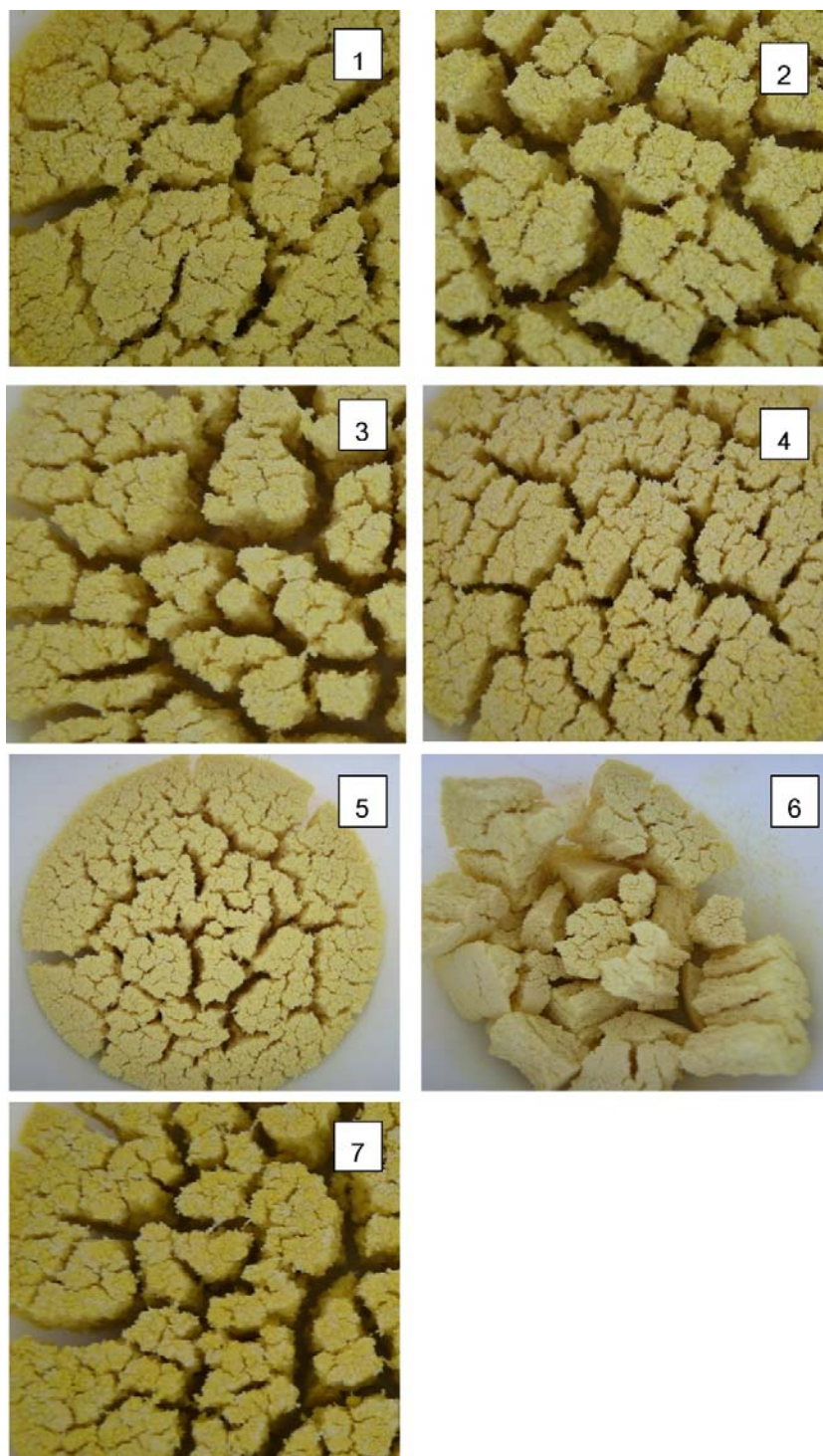
รูป 4.58 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ/xNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> แคลไซน์ที่ 800 °C

ตาราง 4.21 ข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียมและการเผาแคลไซน์โดยเปลี่ยนแปลงNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

| สาร                                     | อุณหภูมิ | น้ำหนักหายไปหลังบดผสม | น้ำหนักหายไปหลังเผาแคลไซน์ |
|-----------------------------------------|----------|-----------------------|----------------------------|
| BNZ                                     | 800      | 0.0340                | 1.3326                     |
| BNZ/5wtNa <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 800      | 0.1270                | 1.4483                     |
| BNZ/5wtNa <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 800      | 0.0884                | 1.5019                     |
| BNZ/15wtNa <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 800      | 0.0095                | 1.6036                     |
| BNZ/20wtNa <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 800      | 0.2000                | 1.6425                     |
| BNZ/25wtNa <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 800      | 0.0701                | 1.7708                     |
| BNZ/30wtNa <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 800      | 0.2000                | 1.8991                     |



รูป 4.59 XRD ของผง BNZ ที่เพิ่มปริมาณ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$



รูป 4.60 BNZ/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (1-7) ที่ปริมาณการเติมเท่ากับ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 wt% ตามลำดับ

#### 4.3.1.3 การเปลี่ยนแปลงส่วนผสม BNZ โดยการเพิ่มปริมาณ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ และ $\text{Bi}_2\text{O}_3$

อย่างละ 5 wt%

ตาราง 4.22 และรูป 4.61 แสดงข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียม และลักษณะทางกายภาพของผง BNZ ที่เปลี่ยนแปลงส่วนผสมโดยการเพิ่มปริมาณ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  อย่างละ 5 wt% พบว่า ลักษณะผงเหมือนกับผงเซรามิก BNZ เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิต่างกัน

ตาราง 4.22 ข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียมและการเผาแคลไซต์

| สาร                                                              | อุณหภูมิ | น้ำหนักหายไปหลังบดผสม | น้ำหนักหายไปหลังเผาแคลไซต์ |
|------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|----------------------------|
| BNZ/5wt% $\text{Bi}_2\text{O}_3$ /5 wt% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | 800      | 0.0520                | 1.3387                     |



รูป 4.61 รูปถ่ายของสาร BNZ ที่ถูกเติมด้วย  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  อย่างละ 5 wt%

#### 4.3.1.4 ผง BNZ/ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 800 องศา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 2 ครั้ง

ตาราง 4.23 และรูป 4.62 แสดงข้อมูลน้ำหนักที่หายไประหว่างการเตรียม และลักษณะทางกายภาพของผง BNZ เผาแคลไซต์ 2 ครั้ง เห็นได้ว่า อนุภาคผงมีขนาดเล็ก สีเหลือง รูป 4.63 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงเซรามิก BNZ/ $x\text{Na}_2\text{CO}_3$  เตรียมที่สภาวะการเผาแคลไซต์สองครั้ง เห็นได้ว่า ที่ปริมาณการเติม  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เท่ากับ 5 wt% มีเฟสเจือปนของ  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ปรากฏอยู่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับ การเติม  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ในปริมาณเท่ากัน ไม่ได้ผ่านการบดให้เนื้อละเอียด และเผาแคล

ไซนส์ครั้งเดียว รูป 4.64 พบว่า ปริมาณเฟสเจือปนที่พบในผง BNZ/5wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ผ่านการบด และเผาแคลไซน์อีกครั้ง ต่ำกว่าผง BNZ/5wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ที่ไม่ได้ผ่านการบด และเผาแคลไซน์ครั้งเดียว นอกจากนี้ยังไม่พบเฟสของ ZrO<sub>2</sub> ในผงBNZ/5wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ผ่านการบด และเผาแคลไซน์อีกครั้งด้วย คาดว่า การบดให้ผงเซรามิกมีเนื้อละเอียดขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของแต่ละอนุภาคมีมากขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าเมื่อนำไปเผาแคลไซน์อีกครั้ง ส่งผลให้ปริมาณเฟสเจือปนลดลง หลักฐานดังกล่าวเห็นด้วยกับสมมุติฐานที่ว่าขนาดและ ลักษณะอนุภาคมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของผงเซรามิก BNZ ในกรณีของผงเซรามิก BNZ ที่ปริมาณการเติม Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เท่ากับ 10 และ 15 ผ่านการบดให้เนื้อละเอียด และเผาแคลไซน์อีกครั้ง ทั้งคู่แสดงลักษณะเฟสเดียว ที่ปราศจากการเจือปนของผงตั้งต้นทั้ง Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ ZrO<sub>2</sub> คาดว่า ปริมาณการเติม Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ตั้งแต่ 10wt% ขึ้นไป รวมทั้งการบดให้เนื้อละเอียด และเผาแคลไซน์อีกครั้งเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาแคลไซน์ที่สมบูรณ์ของผงเซรามิกระบบใหม่ บิสมัทโซเดียมเซอโรโคเนต จากผลการศึกษาลักษณะเฟสของผงที่เตรียมด้วยสภาวะต่างๆ ทั้งหมดพบว่า การเติม Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เท่ากับ 10wt% ผ่านการบดให้เนื้อละเอียด เผาแคลไซน์อีกครั้ง เป็นสภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่สุด ทำให้ได้ผงเซรามิก BNZ ที่มีเฟสเดียว โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงเซรามิกเตรียมที่สภาวะนี้ ถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้โปรแกรม Powder Cell ต่อไป

ตาราง 4.23 มวลที่หายไปหลังการเตรียมและการเผาแคลไซน์ที่ 800 องศา 2 ชั่วโมง

| สาร<br>BNZ/Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | มวลหายไป  |                       |                       |
|--------------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|
|                                            | หลังบดผสม | หลังแคลไซน์ครั้งที่ 1 | หลังแคลไซน์ครั้งที่ 1 |
| 0 wt%                                      | 0.2328    | 1.6929                | 0.0208                |
| 5 wt%                                      | 0.0599    | 1.6816                | 0.0712                |
| 10 wt%                                     | 0.1000    | 1.5429                | 0.0110                |
| 15 wt%                                     | 0.0051    | 1.5539                | 0.0493                |

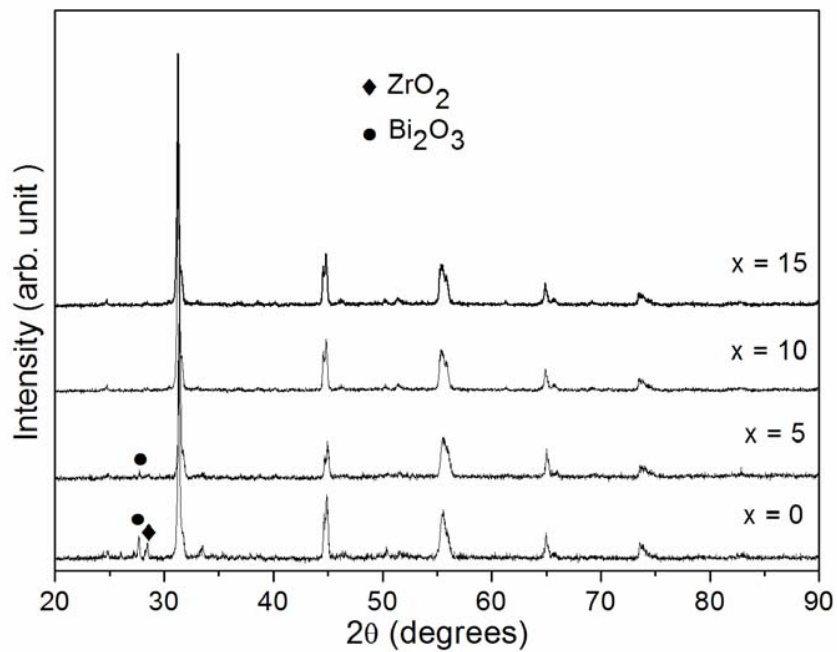


ก่อนเผาครั้งที่ 1



ก่อนเผาครั้งที่ 2

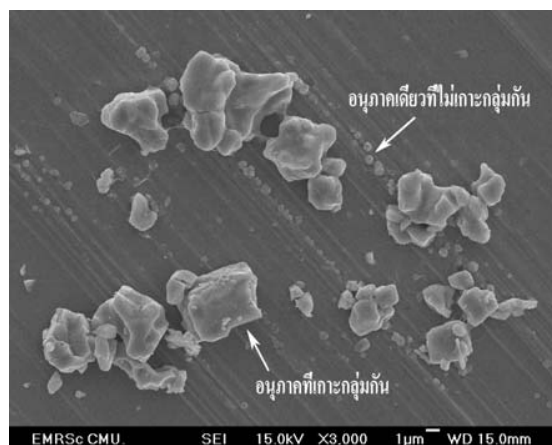
รูป 4.62 รูปลักษณะของผงก่อนเผาแคลไซน์ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยทั่วไปแล้วทุกส่วนผสมจะมีลักษณะก่อนเผาเหมือนกันหมด จึงยกมาแค่บางรูปเพื่อเป็นตัวอย่าง



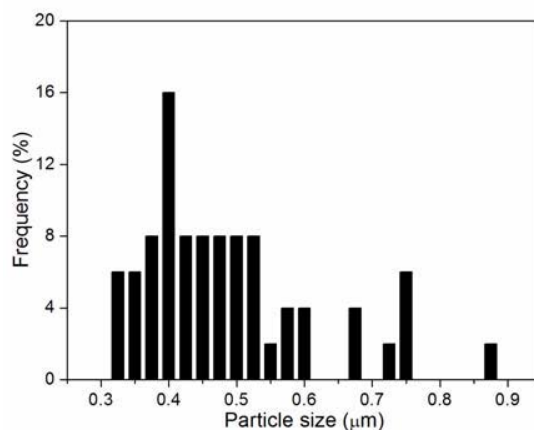
รูป 4.63 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ/ $x\text{Na}_2\text{CO}_3$  ผ่านการบดให้เนื้อละเอียด และเผาแคลไซน์อีกครั้ง

#### 4.3.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐาน ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคผงเซรามิกบิสมัทไทเตียมเซอร์โคเนต

ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของผงเซรามิกบิสมัทไทเตียมเซอร์โคเนตแสดงในรูป 4.64 เห็นได้ว่า ผงเซรามิกประกอบด้วยทั้งอนุภาคที่เกาะกลุ่ม (agglomeration) และไม่เกาะกลุ่มกัน โดยการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเป็นแผ่นขนาดใหญ่ คาดว่า เกิดจากการเพิ่มความเสถียรของระบบโดยรวม โดยการลดพื้นที่ผิวสัมผัสของแต่ละอนุภาค เนื่องจากอนุภาคของผงเซรามิกดังกล่าวมีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสค่อนข้างสูง นอกจากนี้ ภาพ SEM ดังกล่าวยังแสดงอนุภาคผงเซรามิก BNZ เดี่ยวๆ ที่ไม่เกาะกลุ่มกันด้วย ลักษณะของผงเซรามิกค่อนข้างเป็นทรงกลม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ  $0.47\ \mu\text{m}$  การที่อนุภาคผงมีขนาดเล็ก นำไปสู่การเกาะกลุ่มกันได้ง่าย รูป 4.65 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงเซรามิก BNZ พบว่า ขนาดผงเซรามิกระบบใหม่นี้มีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ  $0.32 - 0.87\ \mu\text{m}$  อนุภาคผงส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ  $0.4\ \mu\text{m}$  สอดคล้องกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ได้กล่าวข้างบน จากลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคผงที่ค่อนข้างกว้าง คาดว่า อาจมีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเซรามิก BNZ ซึ่งจะได้ศึกษาในอนาคตอันใกล้



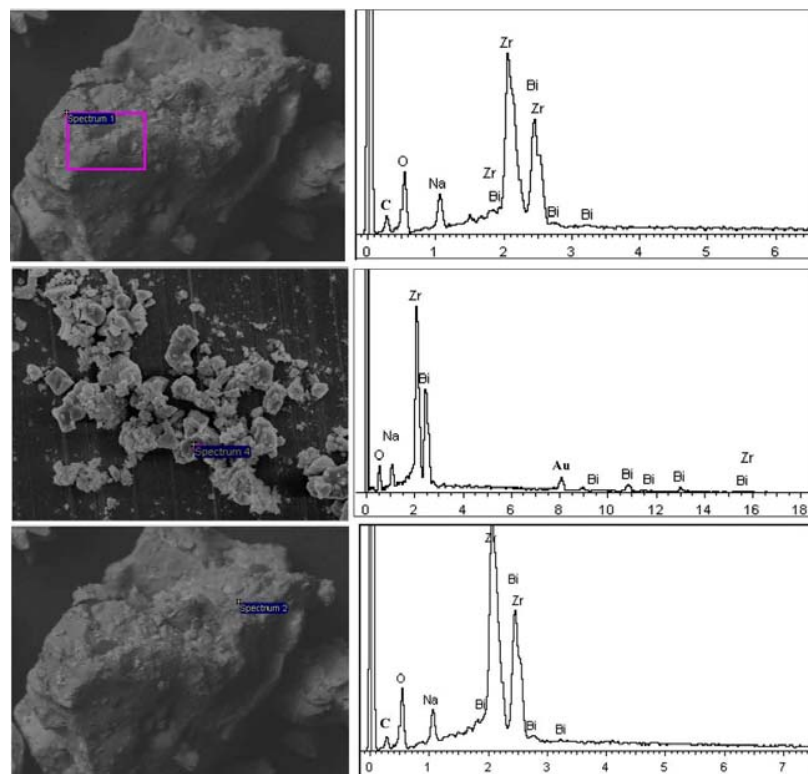
รูป 4.64 ภาพถ่าย SEM ของผง BNZ



รูป 4.65 การกระจายตัวของขนาดของผง BNZ

#### 4.3.1.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเซรามิกบิสมาทโซเดียมเซอร์โคเนต

รูป 4.66 แสดงบริเวณของผงเซรามิก BNZ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (X-ray energy dispersive technique) ทั้งแบบจุดและพื้นที่ พบว่า ผงเซรามิกประกอบด้วยสเปกตรัมของธาตุ Bi, Na, Zr และ O เป็นหลัก หลักฐานดังกล่าวยืนยันเป็นอย่างดีว่า ผงเซรามิกบิสมาทโซเดียมเซอร์โคเนต มีธาตุ Bi, Na, Zr และ O เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่วัดได้จากบริเวณดังกล่าวในหน่วยร้อยละของอะตอมได้แสดงในตาราง 4.24 เห็นได้ว่าปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่วัดได้มีค่าโดยประมาณใกล้เคียงกับปริมาณทางทฤษฎีของแต่ละธาตุ ผลดังกล่าว เชื่ออย่างยิ่งว่า ผงเซรามิก BNZ ที่เตรียมได้มีอัตราส่วนของธาตุเป็นไปตามสูตรโมเลกุลที่ต้องการดังนี้  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{ZrO}_3$



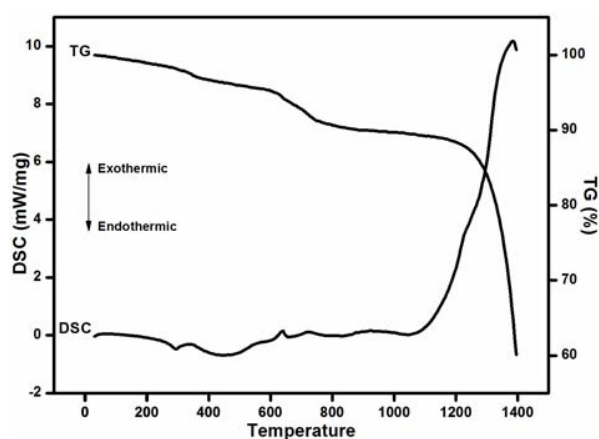
รูป 4.66 การวิเคราะห์ EDX ของผง BNZ

ตาราง 4.24 ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางทฤษฎีและที่วัดด้วย EDX

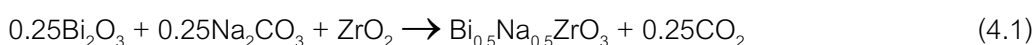
| ธาตุ | Atomic%          | Theoretical atomic% |
|------|------------------|---------------------|
| Bi   | $11.41 \pm 0.79$ | 10                  |
| Na   | $11.21 \pm 2.28$ | 10                  |
| Zr   | $20.04 \pm 3.46$ | 20                  |
| O    | $57.35 \pm 2.43$ | 60                  |
| รวม  | 100              | 100                 |

#### 4.3.1.7 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของผงผสมบิสมีทโซเดียมเซอร์โคเนตก่อนแคลไซน์

รูป 4.67 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของผงผสม BNZ ก่อนแคลไซน์ จากกราฟ DSC พบว่า ผงผสม BNZ มีการเปลี่ยนแปลงทั้งแบบดูดความร้อน (endothermic) และแบบคายความร้อน (exothermic) โดยพีคการเปลี่ยนแปลง endothermic เกิดขึ้นใกล้กับอุณหภูมิ 300 °C อาจเนื่องจากการระเหยของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในผงผสมดังกล่าว เมื่อพิจารณากราฟ TG เห็นได้ว่า มีน้ำหนักหายไปประมาณ 1.44% ใกล้กับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวด้วย ในกรณีของการเปลี่ยนแปลง exothermic พบว่า ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 640 °C คาดว่า อุณหภูมินี้อาจมีพลังงานสูงพอ ทำให้มีการแพร่ของอะตอมภายในสารประกอบ จึงเริ่มมีการตกผลึกเป็นสารประกอบเซรามิก BNZ ดังนั้น การเกิดผลึกของสารประกอบนี้เหมือนเริ่มที่อุณหภูมิดังกล่าว และอาจเสร็จสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 800 °C ดังหัวข้อ 4.1.1.1 สำหรับการหายไปของน้ำหนักประมาณ 4.09% สังเกตในกราฟ TG ที่บริเวณอุณหภูมิใกล้เคียงกัน คาดว่า เป็นการหายไปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากผงตั้งต้น Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ตามสมการ 4.1 เนื่องจากออกไซด์ดังกล่าวสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C [55] นอกจากนี้ น้ำหนักที่หายไปของ CO<sub>2</sub> วัดระหว่างการทดลองมีค่าประมาณ 4.24% ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักที่หายไปในกราฟ TG จากผลของ TG-DSC สามารถยืนยันได้อย่างดีว่าผงผสม BNZ มีการตกผลึกเป็นสารประกอบระบบใหม่ BNZ ที่อุณหภูมิสูง



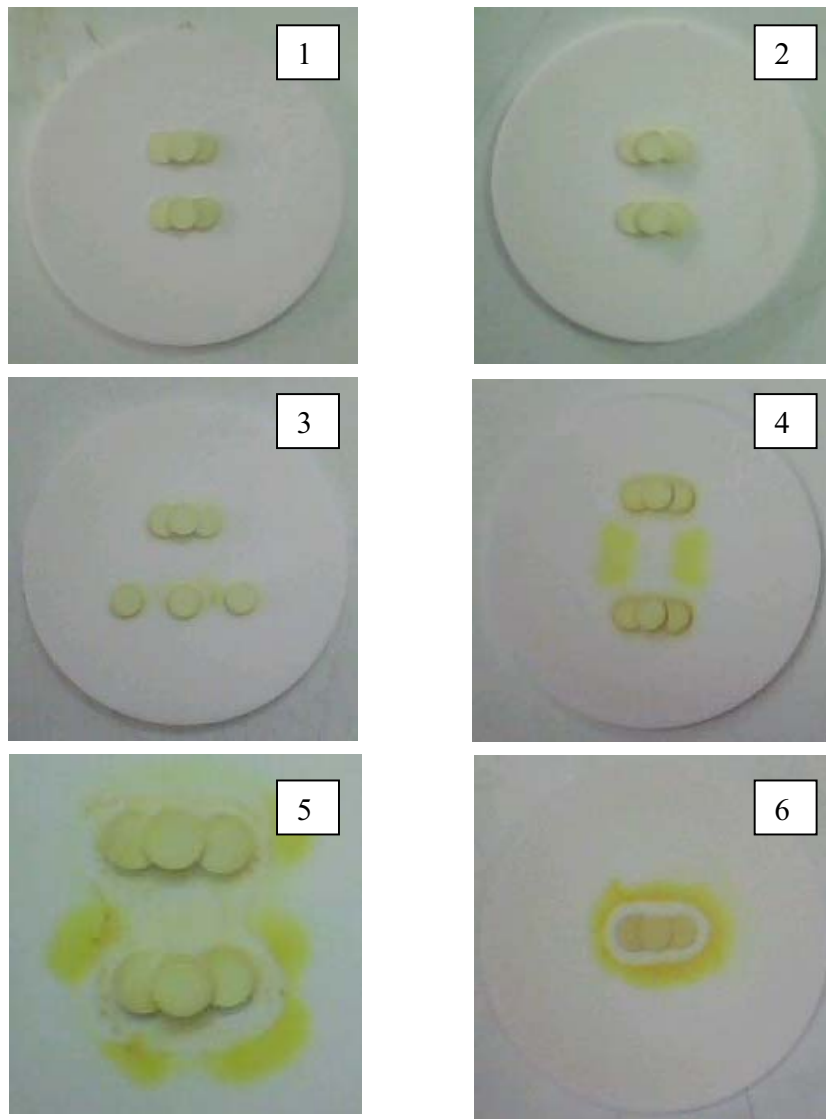
รูป 4.67 กราฟ TG-DSC ของผงผสม BNZ ก่อนแคลไซน์



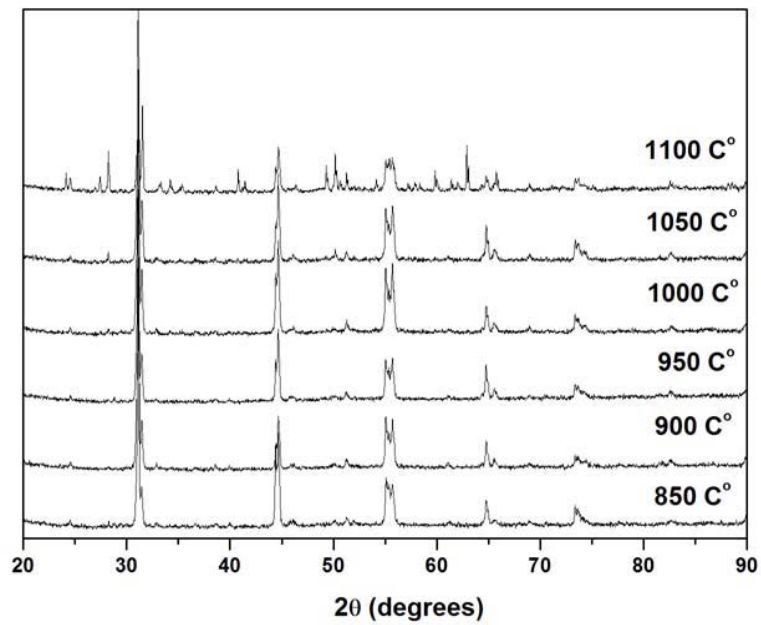
#### 4.3.2 ผลการเตรียมเซรามิก BNZ

จากการทดลองพบว่า สภาวะที่สามารถเผาให้เซรามิกมีความบริสุทธิ์และความหนาแน่น สูง คือการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ตัวช่วยเผา (sintering aid) คือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

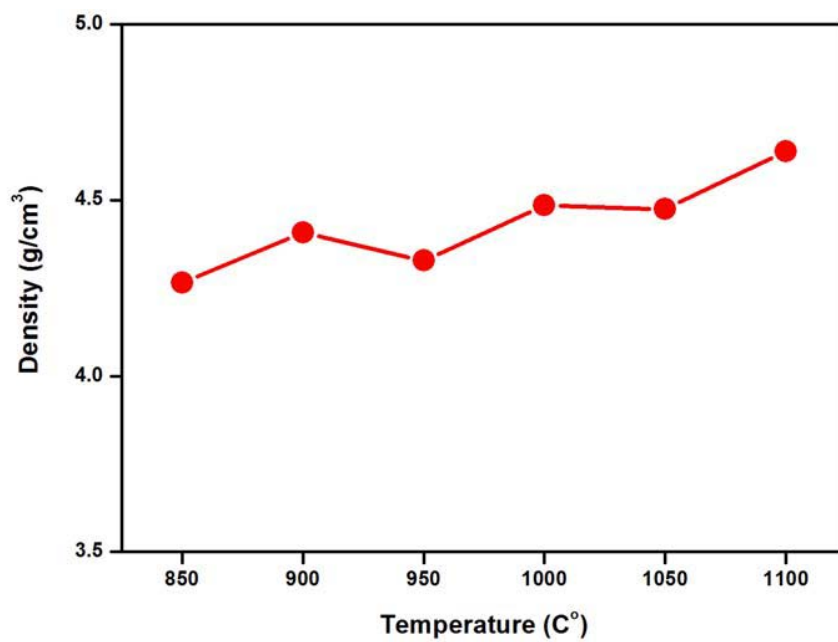
##### 4.3.2.1 เผาเซรามิกที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ BNZ/10wt% $\text{Na}_2\text{CO}_3$



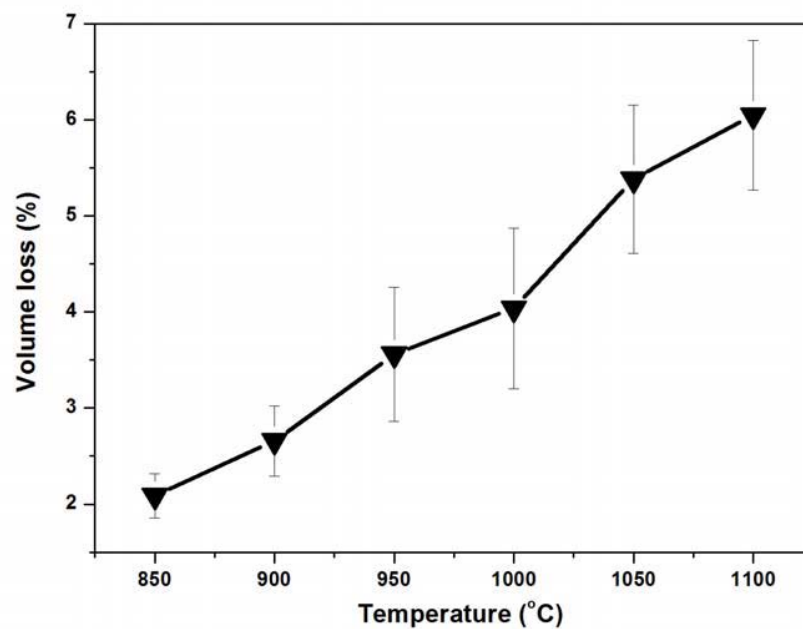
รูป 4.68 เซรามิก BNZ/10wt% $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เผาที่อุณหภูมิ (1) 850, (2) 900, (3) 950, (4) 1000, (5) 1050 และ (6) 1100 องศา ตามลำดับ



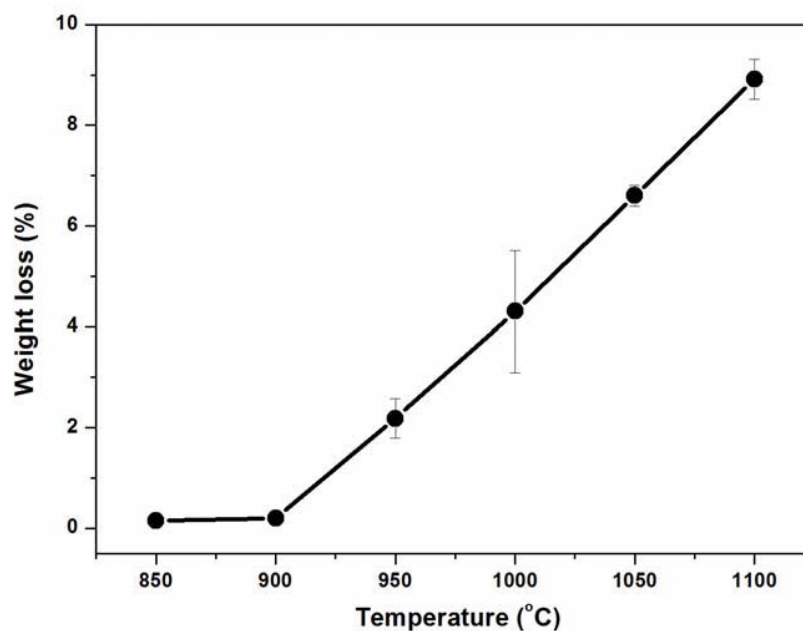
รูป 4.69 XRD ของเซรามิก BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เผาที่อุณหภูมิ 850, 900, 950, 1000, 1050 และ 1100 องศา



รูป 4.70 ค่าความหนาแน่นของเซรามิก BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เผาที่อุณหภูมิ 850, 900, 950, 1000, 1050 และ 1100 องศา

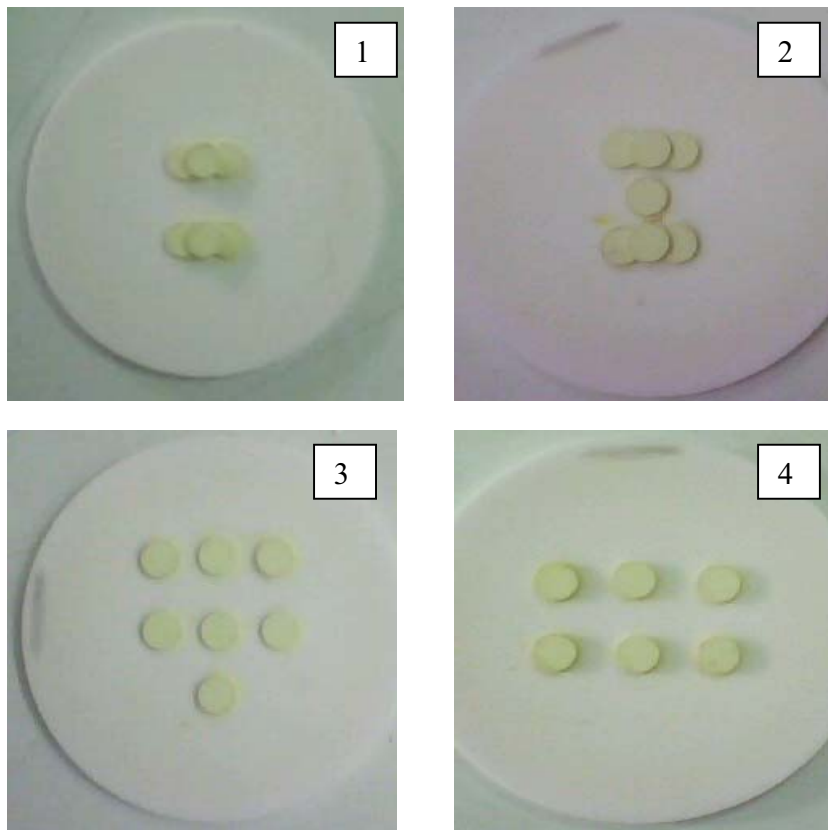


รูป 4.71 ค่าร้อยละของปริมาตรที่หายไปของเซรามิก BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เเผที่อุณหภูมิ 850, 900, 950, 1000, 1050 และ 1100 องศา

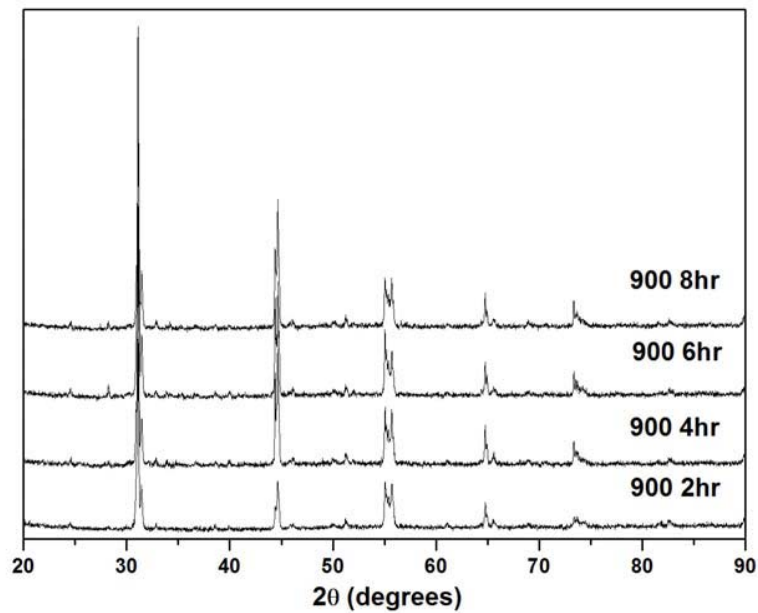


รูป 4.72 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของเซรามิก BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เเผที่อุณหภูมิ 850, 900, 950, 1000, 1050 และ 1100 องศา

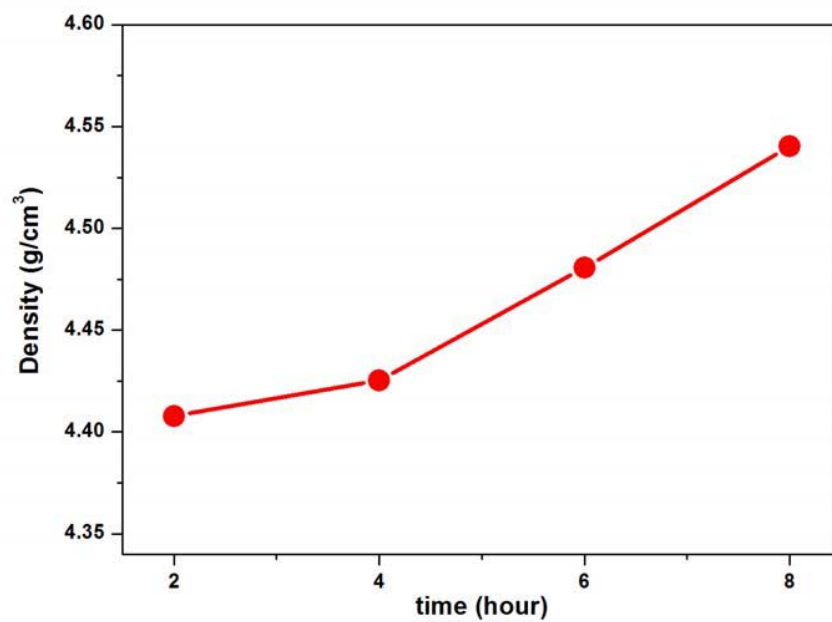
4.3.2.2 เเผเซรามิกที่อุณหภูมิ 900 องศาและเปลี่ยนแปลงเวลาในการเผ โดยใช้ BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>



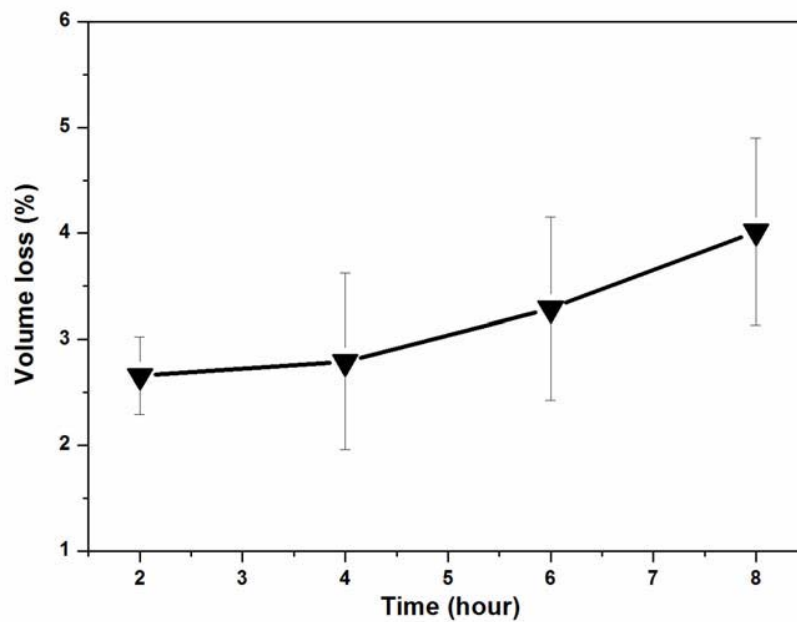
รูป 4.73 เซรามิก BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เผาที่อุณหภูมิ 900 องศา โดยเพิ่มเวลาในการเผคือ (1) 2, (2) 4, (3) 6 และ (4) 8 ชั่วโมง ตามลำดับ



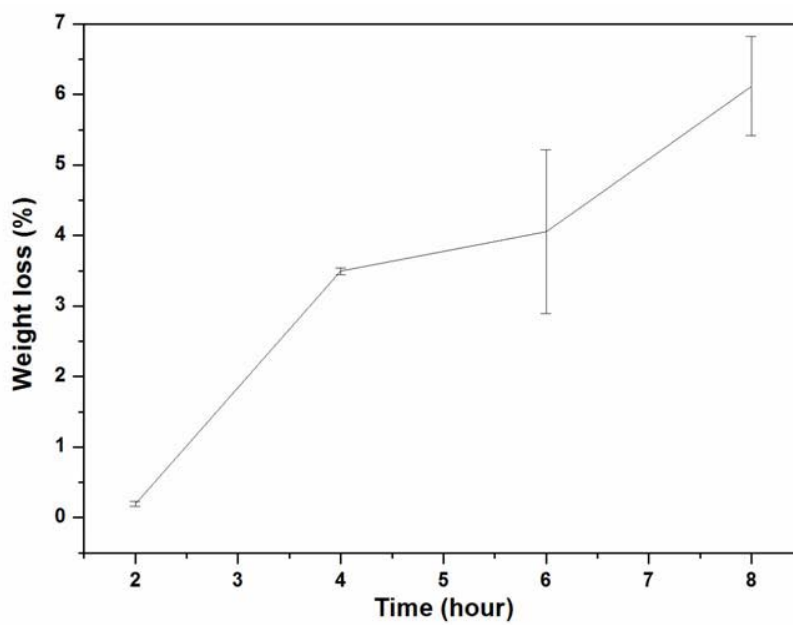
รูป 4.74 XRD เม็ดเซรามิก BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เผาที่อุณหภูมิ 900 องศา โดยเพิ่มเวลาในการเผาคือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง



รูป 4.75 ค่าความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เผาที่อุณหภูมิ 900 องศา โดยเพิ่มเวลาในการเผาคือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง



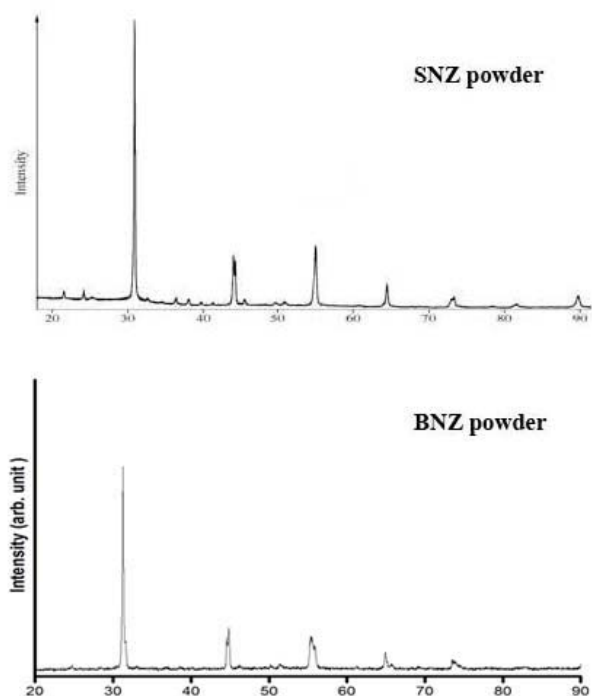
รูป 4.77 ค่าร้อยละของปริมาตรที่หายไปของเม็ดเซรามิก BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เเผที่อุณหภูมิ 900 องศา โดยเพิ่มเวลาในการเผา คือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง



รูป 4.78 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของเม็ดเซรามิก BNZ/10wt%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เเผที่อุณหภูมิ 900 องศา โดยเพิ่มเวลาในการเผา คือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง



บรรจุตรงตำแหน่ง A ในโครงสร้าง ไอออนของเซอร์โคเนียม ( $Zr^{4+}$ ) บรรจุตรงตำแหน่ง B ในโครงสร้าง จากข้อมูลดังกล่าว คาดว่า สารประกอบ BNZ น่าจะมีโครงสร้างเป็น perovskite เหมือนกับ สารประกอบ SNZ โดยต่างกันตรงไอออนบิสมัท ( $Bi^{3+}$ ) และ  $Sr^{2+}$  ณ ตำแหน่ง A ในโครงสร้าง จากการพิจารณาขนาดของหน่วยเซลล์ พบว่าขนาดหน่วยเซลล์ของผงเซรามิก BNZ เล็กกว่าหน่วยเซลล์ของผง เซรามิก SNZ เพราะรัศมีไอออน (ionic radius) ของ  $Bi^{3+}$  เท่ากับ 1.18 Å [42] มีค่าน้อยกว่ารัศมี ไอออนของ  $Sr^{2+}$  [42] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.26 Å ลักษณะดังกล่าวทำให้ขนาดหน่วยเซลล์ของ BNZ เล็ก กว่า SNZ รูป 4.79 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง SNZ และ BNZ เห็นได้ ว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงทั้งสองค่อนข้างมีลักษณะคล้ายกัน อย่างไรก็ตาม มีความ แตกต่างเล็กน้อยตรงตำแหน่งของพีคการเลี้ยวเบนของผง BNZ ที่ดูเหมือนจะเลื่อนไปทางด้านขวา เล็กน้อย สามารถเห็นได้ชัดเจนตรงตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนความเข้มสูงสุดที่มุมใกล้ๆ  $30^\circ$  คาดว่า การเลื่อนไปทางด้านขวาของพีคดังกล่าวในรูปแบบการเลี้ยวรังสีเอกซ์ของผง BNZ เป็นผลมาจาก ขนาดหน่วยเซลล์ของ BNZ ที่เล็กกว่า SNZ จากหลักฐานลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ เหมือนกัน และการพิจารณาความแตกต่างขนาดหน่วยเซลล์ของผงเซรามิกทั้ง SNZ และ BNZ เชื่อว่า ผงเซรามิกระบบใหม่ BNZ น่าจะมีโครงสร้างเป็น perovskite มีระบบผลึก (crystal system), สมมาตร ผลึก (space group) และแลตทิซพารามิเตอร์ต่างๆ (lattice parameters) ใกล้เคียงกับผงเซรามิก SNZ ด้วย



รูป 4.79 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง SNZ และ BNZ

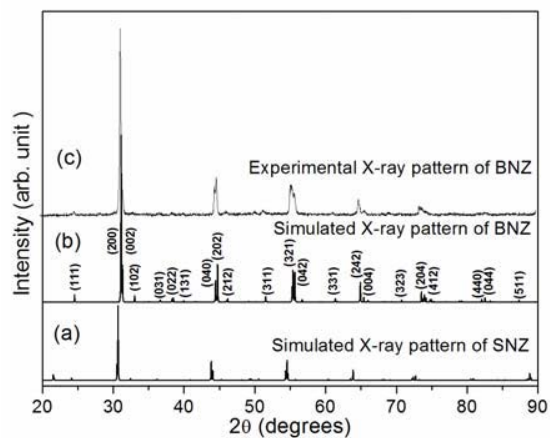
#### การวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากโปรแกรมและการทดลอง

ตาราง 4.25 แสดงข้อมูลโครงสร้างผลึกของผงเซรามิก SNZ และรูป 4.80(a) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงเซรามิก SNZ ที่จำลองจากข้อมูลเหล่านี้โดยโปรแกรม Powder Cell เห็นได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จำลองดังกล่าวค่อนข้างคล้ายกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง SNZ (รูป 4.79) ที่รายงานโดย M. V. Makarova และคณะ [55] จากผลดังกล่าว เชื่อว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม Powder Cell มีความถูกต้องเพียงพอสำหรับใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุ เมื่อพิจารณาข้อมูลโครงสร้างผลึกของ SNZ และการศึกษาในหัวข้อ 4.1.2.1 คาดว่า ผงเซรามิก BNZ น่าจะมีระบบผลึกเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) และสมมาตรผลึกคือ Pnma เหมือนกับผงเซรามิก SNZ ด้วยอย่างไรก็ตาม คาดว่าหน่วยเซลล์ของ BNZ ควรจะบิดเบี้ยวไปจากหน่วยเซลล์ของ SNZ เนื่องจากความแตกต่างของชนิด และขนาดไอออน  $\text{Bi}^{3+}$  และ  $\text{Sr}^{2+}$  ณ ตำแหน่ง A ในโครงสร้างของสารประกอบทั้งสอง รูป 4.80(b) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จำลองของผงเซรามิก BNZ พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนจำลองดังกล่าวเลื่อนไปทางด้านขวาเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบกับรูปการเลี้ยวเบนจำลองของผง SNZ ในรูป 4.80(a) เนื่องจากขนาดหน่วยเซลล์ของ BNZ เล็กกว่าหน่วยเซลล์ของ SNZ หลักฐานนี้สามารถยืนยันเป็นอย่างดีถึงขนาดหน่วยเซลล์ของผง BNZ ที่เล็กกว่าหน่วยเซลล์ของ SNZ รูป 4.80(c) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ ที่เตรียมได้จากการทดลองนี้ โดยใช้รังสี  $\text{CuK}\alpha_1$  ในการวิเคราะห์ และ  $2\theta$  step เท่ากับ 0.02 เหมือนกับเงื่อนไขการศึกษาของ M. V. Makarova ในตาราง 4.25 เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BNZ จากการทดลอง และแบบจำลอง รูป 4.80(b) และ 4.80(c) เห็นได้ว่า ลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนทั้งสองค่อนข้างใกล้เคียงกัน จึงเชื่อว่า รูปแบบจำลองนี้เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงเซรามิกระบบใหม่ BNZ ข้อมูลโครงสร้างผลึกของผงเซรามิก BNZ ได้จากการศึกษาด้วยโปรแกรม Powder Cell แสดงในตาราง 4.26 ดังนั้นสารประกอบเซรามิกระบบใหม่ BNZ มีโครงสร้างเป็น orthorhombic มี space group คือ Pnma มีขนาดความยาวแกน a, b และ c เท่ากับ 5.7742, 8.1443 และ 5.7037 Å ตามลำดับ และมีความหนาแน่นทางทฤษฎีเท่ากับ  $6.353 \text{ g/cm}^3$

ตาราง 4.25 ข้อมูลโครงสร้างผลึกของผงเซรามิก SNZ [55]

|                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| Crystal system      | orthorhombic         |
| Space group         | Pnma                 |
| Radiation           | $\text{CuK}\alpha_1$ |
| $2\theta$ step, deg | 0.02                 |
| a axis length, Å    | 5.8542               |
| b axis length, Å    | 8.2137               |
| c axis length, Å    | 5.8237               |
| Cell Volume, Å      | 280.03               |



รูป 4.80 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงเซรามิก เมื่อ (a) คือ รูปแบบจำลองของผง SNZ, (b) คือ รูปแบบจำลองของผง BNZ และ (c) คือ รูปแบบการเลี้ยวเบนของผง BNZ ที่ได้จากการทดลอง

ตาราง 4.26 ข้อมูลโครงสร้างผลึกของผงเซรามิก BNZ

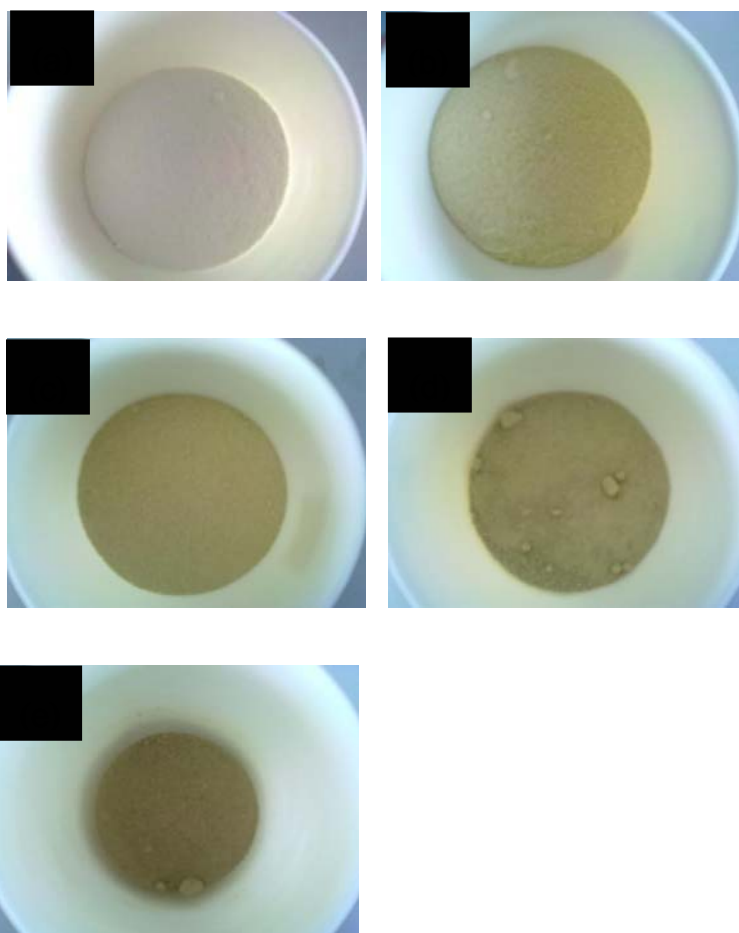
|                             |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| Crystal system              | orthorhombic         |
| Space group                 | Pnma                 |
| Radiation                   | $\text{CuK}\alpha_1$ |
| $2\theta$ step, deg         | 0.02                 |
| a axis length, Å            | 5.7742               |
| b axis length, Å            | 8.1443               |
| c axis length, Å            | 5.7037               |
| Cell Volume, Å <sup>3</sup> | 268.23               |

#### 4.4 สารปิสัมทโซเดียมไทเทเนตเจือโคบอลต์ ( $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$ )

##### 4.4.1 ผลการเตรียมผง $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$

##### 4.4.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผง $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$

เมื่อนำสาร  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.005, 0.010, 0.020 และ 0.030 เศษส่วนโดยโมล ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  พบว่า ที่ปริมาณ Co เพิ่มขึ้นสีของสารมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลืองเมื่อเทียบกับ BNT บริสุทธิ์ และสีเข้มขึ้นจนมีสีน้ำตาลเทาเมื่อปริมาณ Co เท่ากับ 0.030 ดังรูป 4.81 (a) - (e)



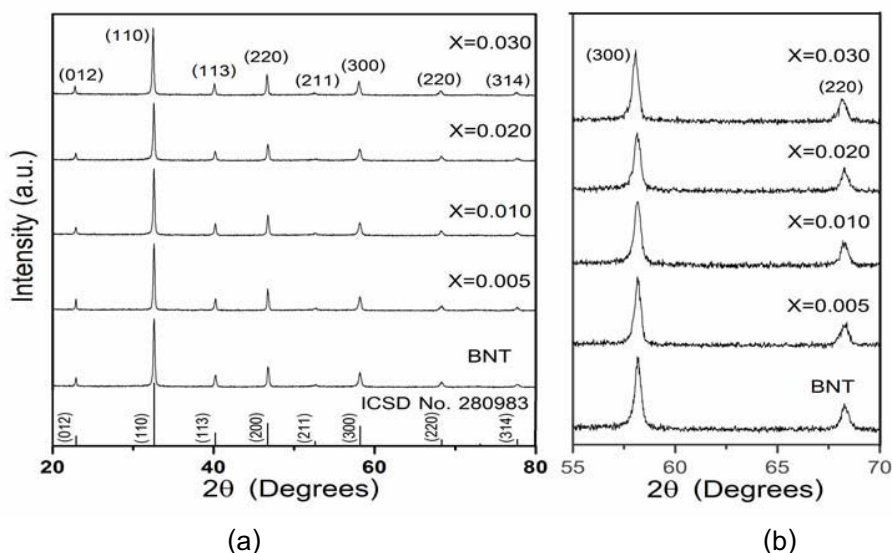
รูป 4.81 ลักษณะผงหลังการแคลไซน์  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  เมื่อปริมาณ Co เท่ากับ

(a) 0.000 (b) 0.005 (c) 0.010 (d) 0.02 (e) 0.03 เศษส่วนโดยโมล

#### 4.4.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผง

ในการสังเคราะห์ผง  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ใช้อุณหภูมิแคลไซน์  $800^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีปริมาณ Co เท่ากับ 0.005 0.010 0.020 และ 0.030 เศษส่วนโดยโมล ซึ่งโดยปกติสารบีสมัทโซเดียมไทเทเนต หรือ BNT ( $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ ) จะมีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ สูตรโมเลกุลคือ  $\text{ABO}_3$  แต่เนื่องจากการเติม Co เข้าไปในโครงสร้างของ BNT ทำให้ไอออนของ Co ต้องมีการเข้าไปแทนที่ไอออนในโครงสร้างเพื่อให้เกิดเป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) เมื่อพิจารณาขนาดไอออนพบว่า ไอออน Co ( $r_{\text{Co}^{2+}} = 0.72 \text{ \AA}$ ) มีขนาดใกล้เคียงกับไอออน Ti ( $r_{\text{Ti}^{4+}} = 0.61 \text{ \AA}$ ) มากที่สุด ดังนั้น ไอออน Co จึงน่าจะเข้าไปแทนที่ไอออน Ti ซึ่งเป็นตำแหน่ง B ของสาร BNT ซึ่งเป็นการแทนที่ของไอออนที่มีค่าวาเลนซ์ไม่เท่ากัน โดย Co และ Ti มีประจุของไอออน คือ 2+ และ 4+ ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ดังรูป 4.82 (a) ผงทุกอัตราส่วนการเจือ Co มีโครงสร้างเป็นแบบรอมโบอีไดรตรงกับ ICSD หมายเลข 280983 และไม่พบเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้นนอกจากนี้สังเกตได้ว่าเกิดการเลื่อนไปทางซ้ายทั้งระบบเล็กน้อย ดังรูป 4.82 (b) เนื่องมาจากการแทนที่ของไอออน Co ตรงตำแหน่งของไอออน Ti ซึ่งขนาดใหญ่กว่า จึงส่งผลทำให้เกิดการขยายตัวของโครงสร้างผลึก และมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Co ที่เพิ่มขึ้น



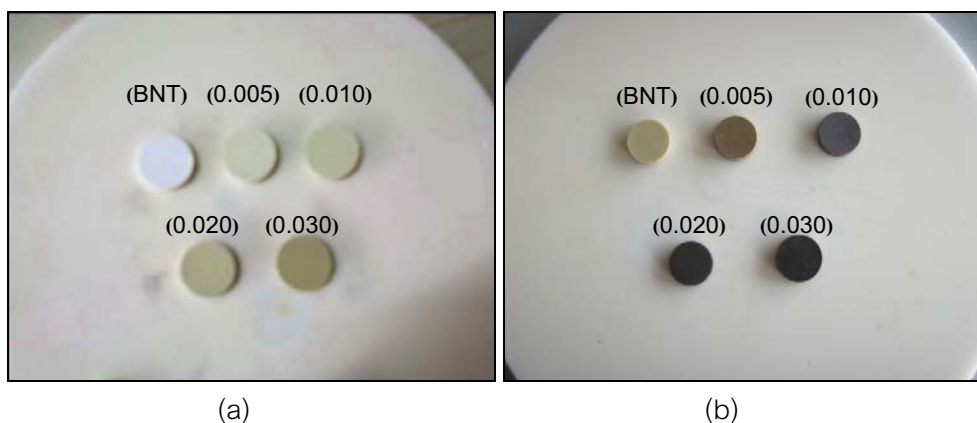
รูป 4.82 (a) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่ปริมาณ Co ต่างๆ

(b) พิกแสดงการเลื่อนไปทางมุม  $2\theta$  ที่ต่ำของระนาบ (300) และ (220)

#### 4.4.2 ผลการเตรียมเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$

##### 4.4.2.1 ผลตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก

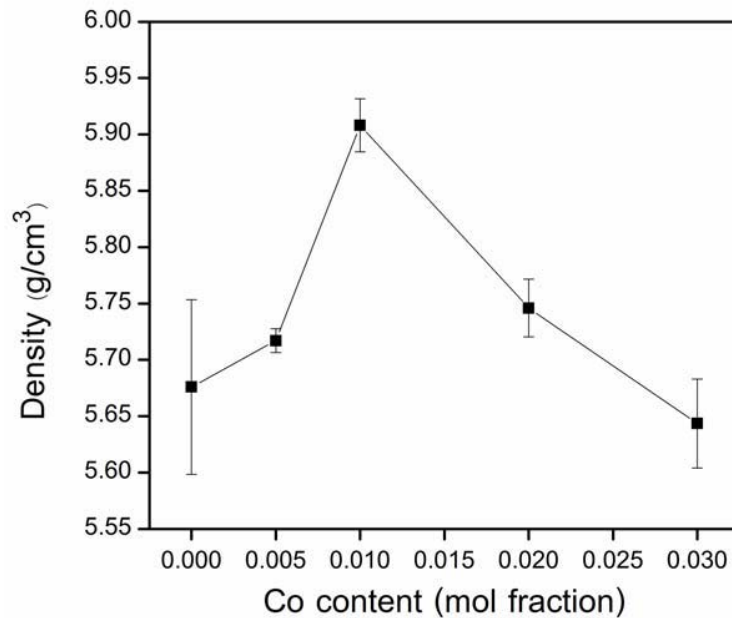
หลังจากการเผาซินเทอร์ผง  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้ว พบว่าเม็ดเซรามิกที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดแผ่นกลมสมบูรณ์ และมีสีแตกต่างกับผงที่ขึ้นรูปก่อนเผา โดยมีสีเข้มขึ้นกว่าเดิมจากสีเหลืองอ่อนไปจนถึงสีดำตามปริมาณการเจือ Co ที่เพิ่มขึ้น (รูป 4.83 (a)-(b)) นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นการหดตัวของเซรามิกได้อย่างชัดเจน เซรามิกที่ได้นี้จะถูกนำไปวัดสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น และร้อยละการหดตัว ซึ่งผลที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป



รูป 4.83 (a) ผงขึ้นรูปก่อนเผา (b) เซรามิก

##### ความหนาแน่นของเซรามิก

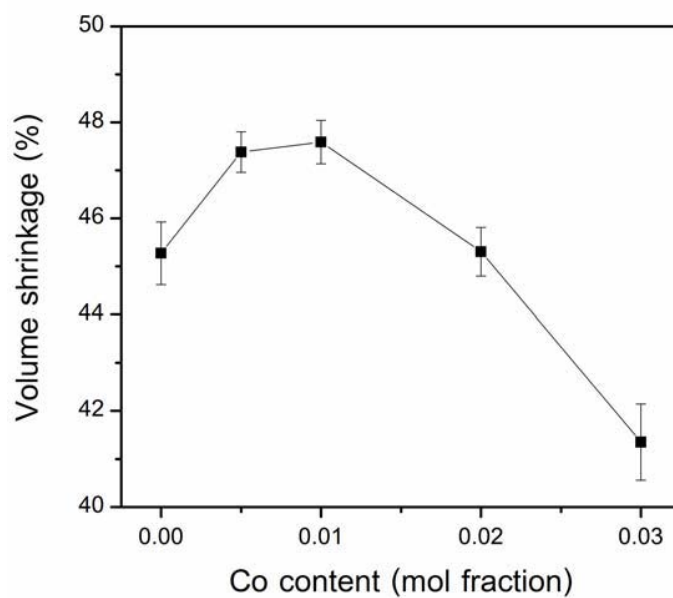
เมื่อนำเม็ดเซรามิกที่ผ่านการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ  $1050^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราขึ้น-ลง ของอุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นด้วยหลักการของอาร์คิมิดีส ได้ผลดังรูป 4.85 และตาราง 4.27 พบว่าค่าความหนาแน่นของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  มีค่าอยู่ในช่วง  $5.64 - 5.91 \text{ g/cm}^3$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเจือ Co เข้าไปปริมาณหนึ่ง และเมื่อเจือ Co เพิ่มมากขึ้นพบว่าเซรามิกมีความหนาแน่นลดลงโดยที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.010 เศษส่วนโดยโมลมีความหนาแน่นมากที่สุด อย่างไรก็ตามที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.0030 เศษส่วนโดยโมล เซรามิกมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าเซรามิก BNT บริสุทธิ์ ความหนาแน่นนี้มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิก ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค



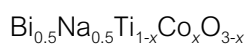
รูป 4.84 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณการเจือ Co  
ของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$

#### ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเทอร์ของเซรามิก

จากรูป 4.85 และตาราง 4.27 พบว่าค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรของเซรามิกมีค่าอยู่ในช่วง 41.35 - 47.69 ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับค่าความหนาแน่น เนื่องจากการซินเทอร์เกิดกระบวนการขนส่งมวลสาร (mass transport) ขึ้น ซึ่งเป็นการแพร่ของอะตอมทำให้เกิดการเชื่อมติดกันของอนุภาคภายในชิ้นงานส่งผลให้ในระดับจุลภาคช่องว่างหรือรูพรุนภายในชิ้นงานลดลง จึงส่งผลให้ในระดับมหภาคชิ้นงานโดยรวมมีการหดตัวเกิดขึ้น ดังนั้นชิ้นงานเซรามิกที่มีความหนาแน่นมากปริมาณช่องว่างหรือรูพรุนภายในจะมีน้อยลง ชิ้นงานเซรามิกจึงมีแนวโน้มการหดตัวมากขึ้น



รูป 4.85 กราฟความสัมพันธ์ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรกับปริมาณการเจือ Co ของเซรามิก

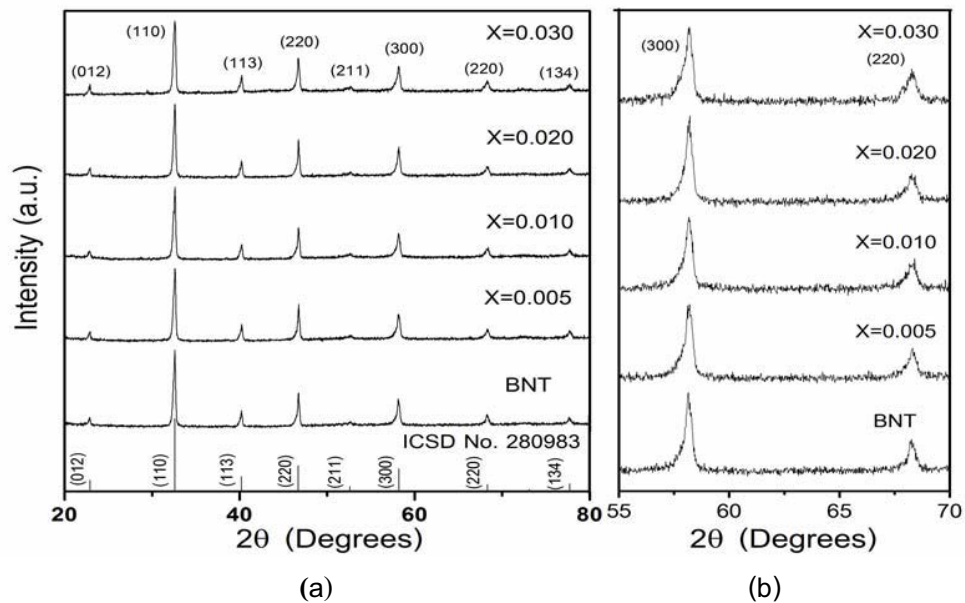


ตาราง 4.27 ค่าความหนาแน่น และร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่เจือด้วย Co ปริมาณต่างๆ

| Co<br>(mol fraction) | Density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Volume shrinkage<br>(%) |
|----------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0                    | 5.68 ± 0.08 95.1%               | 45.27 ± 0.65            |
| 0.005                | 5.72 ± 0.01 95.8%               | 47.38 ± 0.42            |
| 0.010                | 5.91 ± 0.02 99.0%               | 47.59 ± 0.45            |
| 0.020                | 5.75 ± 0.08 96.3%               | 45.30 ± 0.51            |
| 0.030                | 5.64 ± 0.03 94.4%               | 41.35 ± 0.79            |

#### 4.4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเซรามิก

เมื่อทำการเผาซินเทอร์ฟิง  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่อุณหภูมิ  $1050^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้เซรามิกที่มีสีแตกต่างกันตามปริมาณ Co แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึก พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก ยังมีโครงสร้างเป็นแบบรอมโบอีไดรอลเช่นเดียวกับผง ดังรูป 4.86 (a) และไม่พบเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาการเคลื่อนของพีคที่ปรากฏในผง พบว่าการเคลื่อนของพีคของเซรามิกไม่ปรากฏอย่างชัดเจน แต่สังเกตได้ว่าลักษณะของตำแหน่งที่ปลายและรูปร่างของพีคมีลักษณะที่ต่างกัน ดังรูป 4.86 (b) แสดงถึงการแทนที่ของ  $\text{Co}^{2+}$  เข้าไปในตำแหน่งของ  $\text{Ti}^{4+}$  ซึ่งมีขนาดรัศมีไอออนแตกต่างกัน โดยรัศมีของ  $\text{Co}^{2+}$  มีค่ามากกว่า รัศมีของ  $\text{Ti}^{4+}$  อยู่  $0.11 \text{ \AA}$  จึงทำให้โครงสร้างเกิดการบิดรูป (distortion) แต่ยังคงมีโครงสร้างเป็นแบบรอมโบอีไดรอล



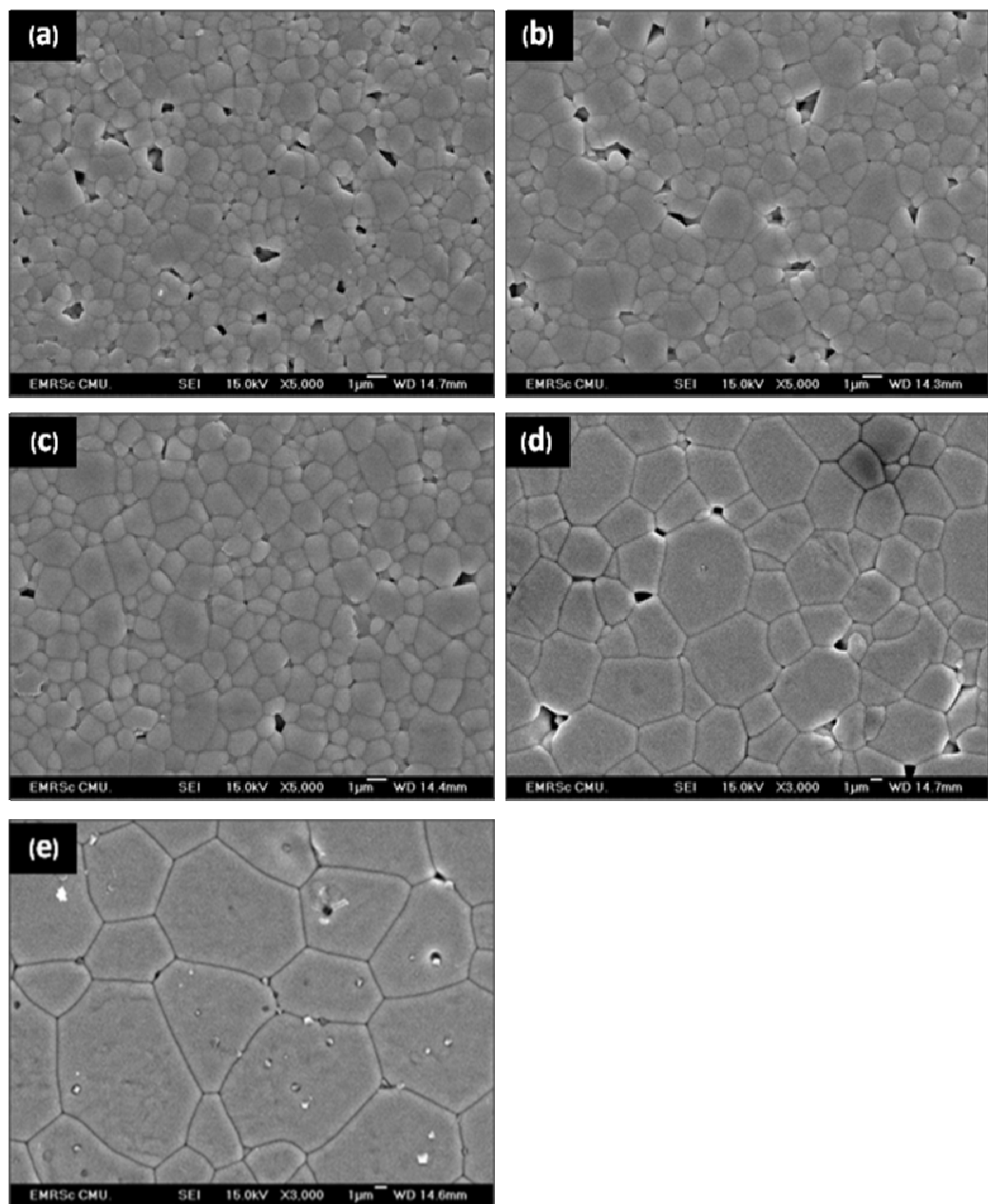
รูป 4.86 (a) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่ปริมาณ Co ต่างๆ  
(b) พิกแสดงการเคลื่อนไปทางมุม  $2\theta$  ที่ต่ำของระนาบ (300) และ (220)

#### 4.4.2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิก

เมื่อนำเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่ผ่านการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ  $1050^\circ\text{C}$  ด้วยอัตราขึ้น-ลงของอุณหภูมิ  $5^\circ\text{C}/\text{นาท}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาขัดด้วยกระดาษทรายและผงอะลูมินา จนเรียบได้ระนาบและมันวาว จากนั้นนำไปทำ thermal etching ที่อุณหภูมิ  $950^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำมาศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ผลจากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิกด้วยกล้อง SEM ดังรูป 4.87 พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นแบบอิกวิแอกซ์ (equiaxed grain shape) โดยมีขนาดของเกรนเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Co ที่เพิ่มขึ้น และพบเกรนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่กับเกรนขนาดใหญ่ นอกจากนี้พบว่าปริมาณรูพรุนมีน้อยลงเมื่อปริมาณการเจือ Co อยู่ในช่วง 0.000 – 0.010 ส่วนที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.020 – 0.030 รูพรุนเริ่มมีมากขึ้นและพบรูพรุนทั้งบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน และภายในเกรนของเซรามิกที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.030

การขยายตัวของขนาดเกรนทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ของ  $\text{Co}^{2+}$  ตรงตำแหน่ง  $\text{Ti}^{4+}$  ซึ่งมีค่าประจุน้อยกว่าทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancy) ขึ้น โดยช่องว่างออกซิเจนจะเกิดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Co ที่เพิ่มขึ้น ช่องว่างของออกซิเจนที่เกิดขึ้นนี้ช่วยทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมระหว่างการซินเทอร์มากขึ้น ด้วยเหตุนี้ขนาดเกรนจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

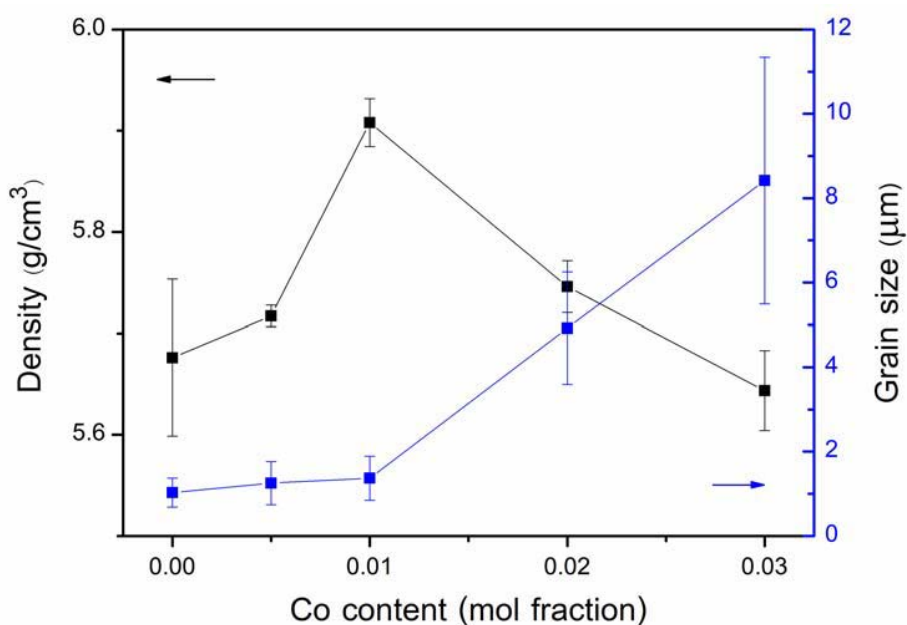


รูป 4.87 โครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่ปริมาณ Co ตั้งแต่ (a) 0.000 (b) 0.005 (c) 0.010 (d) 0.020 และ (e) 0.030 เศษส่วนโดยโมล

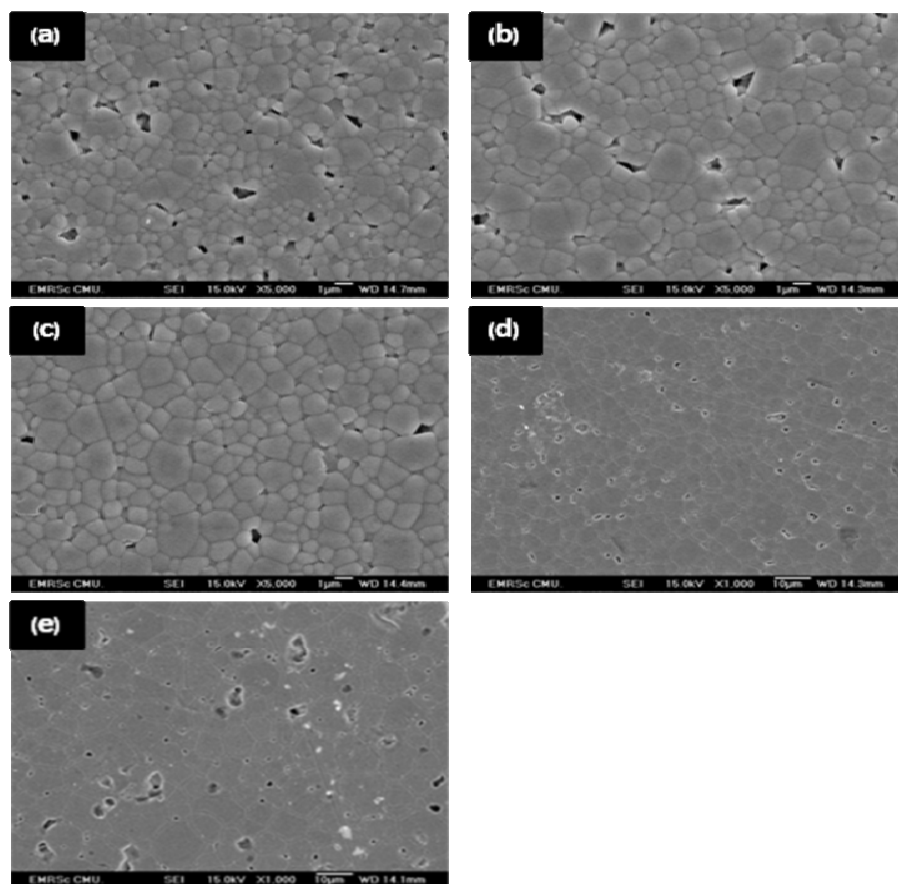
## ขนาดเกรน

ในการถ่ายภาพ SEM เพื่อใช้ในการหาขนาดของเกรน ได้เลือกกำลังขยายที่เหมาะสมให้มีจำนวนเกรนมากพอเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.000 – 0.010 ใช้กำลังขยาย 5000 เท่า ส่วนที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.020 และ 0.030 ใช้กำลังขยาย 1000 เท่า เนื่องจากเกรนมีขนาดใหญ่

ผลการวัดขนาดของเกรนพบว่า ขนาดเกรนของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  มีค่าอยู่ในช่วง 8.42 - 1.25  $\mu\text{m}$  ดังรูป 4.88 และตาราง 4.28 ซึ่งขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นนี้เป็นผลมาจากการแพร่ของอะตอมที่มากขึ้นเนื่องจากเกิดช่องว่างออกซิเจนดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากการแพร่ของอะตอมจะมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิกแล้วยังส่งผลต่อความหนาแน่นของเซรามิกด้วย เนื่องจากการแพร่ของอะตอมทำให้รูพรุนภายในชิ้นงานเซรามิกลดลง สังเกตได้จากรูป 4.89 (a)-(c) รูพรุนลดลงเมื่อปริมาณการเจือ Co เพิ่มขึ้นจาก 0.005 – 0.010 เมื่อเทียบกับ BNT บริสุทธิ์ จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของเซรามิกเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณ Co เพิ่มขึ้นจนถึง 0.030 (รูป 4.89 (d)-(e)) รูพรุนเริ่มมีเพิ่มมากขึ้น และพบรูพรุนภายในเกรนเนื่องมาจากเกรนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นของเซรามิกลดลง



รูป 4.88 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรน และ ความหนาแน่นของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่เจือ Co ปริมาณต่างๆ



รูป 4.89 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ใช้ในการวัดขนาดเกรน ที่ปริมาณ Co เท่ากับ (a) 0.000 (b) 0.005 (c) 0.010 (d) 0.020 และ (e) 0.030 เศษส่วนโดยโมล

ตาราง 4.28 ขนาดเกรนของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่เจือด้วย Co ปริมาณต่างๆ

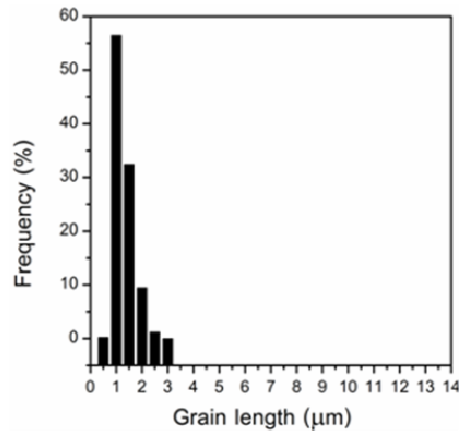
| ปริมาณ Co | ขนาดเกรน ( $\mu\text{m}$ ) |
|-----------|----------------------------|
| 0.000     | $1.03 \pm 0.34$            |
| 0.005     | $1.25 \pm 0.51$            |
| 0.010     | $1.37 \pm 0.52$            |
| 0.020     | $4.92 \pm 1.33$            |
| 0.030     | $8.42 \pm 2.92$            |

### การกระจายตัวของขนาดเกรน

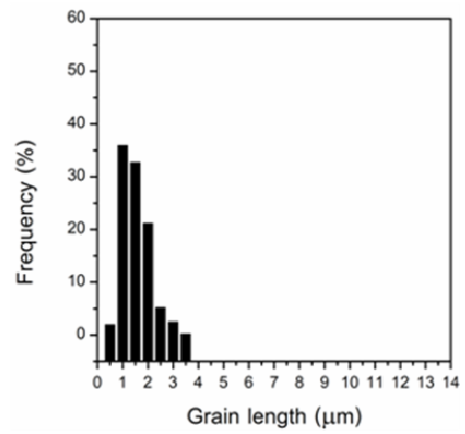
เมื่อวัดขนาดเกรนแล้ว จากนั้นทำการหาการกระจายตัวของขนาดเกรน ได้ผลดังรูป 4.90 และ ตาราง 4.29 โดยพบว่า การกระจายตัวของขนาดเกรนทุกอัตราส่วนการเจือ Co มีการกระจายตัวแบบต่อเนื่องและการเติม Co เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของเกรนมีการกระจายตัวแบบปกติมากขึ้น โดยการกระจายตัวของขนาดของเกรน BNT บริสุทธิ์ แสดงดังรูป 4.90 (a) มีช่วงแคบที่สุด โดยมีช่วงการกระจายตัวของขนาดเกรนระหว่าง 0.5 - 2.5  $\mu\text{m}$  และมีความถี่สูงสุดในช่วง 1  $\mu\text{m}$  สำหรับที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.005 เศษส่วนโดยโมล การกระจายตัวของขนาดเกรน แสดงดังรูป 4.90 (b) จะเห็นว่าช่วงของการกระจายตัวเริ่มกว้างขึ้นเมื่อเทียบกับ BNT บริสุทธิ์ โดยมีช่วงการกระจายตัวของขนาดเกรนระหว่าง 0.5 - 3.5  $\mu\text{m}$  และมีความถี่สูงสุดในช่วง 1 - 1.5  $\mu\text{m}$  สำหรับที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.010 เศษส่วนโดยโมล การกระจายตัวของขนาดเกรนมีช่วงกว้างขึ้นจากปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.005 แสดงดังรูป 4.90 (c) โดยมีช่วงการกระจายตัวของขนาดเกรนระหว่าง 0.5 - 4.0  $\mu\text{m}$  c และมีความถี่สูงสุดอยู่ในช่วง 0.5  $\mu\text{m}$  สำหรับที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.02 การกระจายตัวของขนาดเกรนมีลักษณะเป็นการกระจายตัวแบบปกติมากที่สุด โดยมีลักษณะเป็นแบบกราฟระฆังคว่ำ แสดงดังรูป 4.90 (d) มีช่วงการกระจายตัวของขนาดเกรนอยู่ในช่วง 0.5 - 10.0  $\mu\text{m}$  ซึ่งกว้างกว่าที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.010 มาก และมีความถี่สูงสุดในช่วง 4.5  $\mu\text{m}$  ซึ่งใกล้เคียงกับช่วง 5.5  $\mu\text{m}$  และสำหรับที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.030 เศษส่วนโดยโมล การกระจายตัวของขนาดเกรนมีช่วงกว้างที่สุด โดยมีการกระจายตัวของขนาดของเกรนในช่วง 2 - 14.0  $\mu\text{m}$  และมีความถี่สูงสุดอยู่ในช่วง 8 และ 11.5  $\mu\text{m}$

ตาราง 4.29 ช่วงการกระจายตัวของขนาดเกรนที่ปริมาณการเจือ Co ต่างๆ

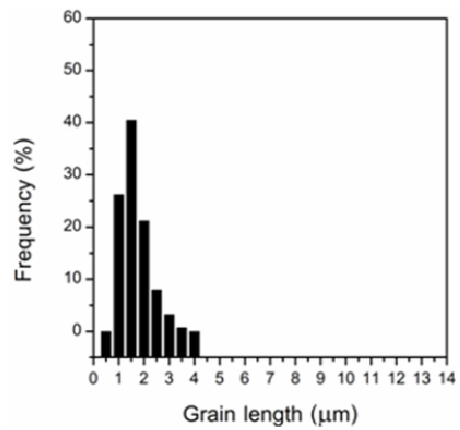
| Co Content (mol fraction) | Range of grain length ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------|-----------------------------------------|
| 0.000                     | 0.5 – 2.5                               |
| 0.005                     | 0.5 – 3.5                               |
| 0.010                     | 0.5 – 4.0                               |
| 0.020                     | 0.5 – 10.0                              |
| 0.030                     | 2.0 – 14.0                              |



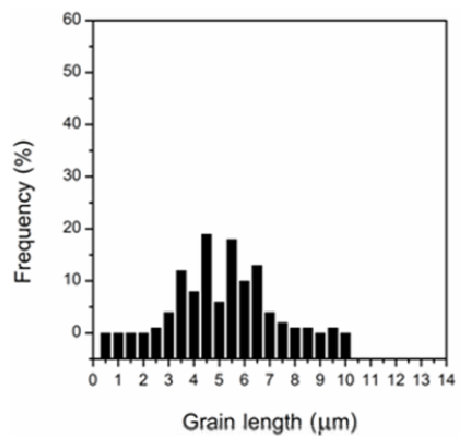
(a)



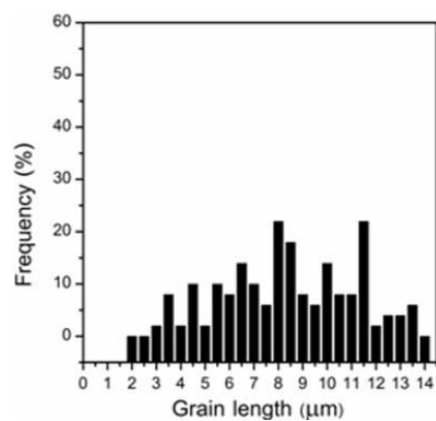
(b)



(c)



(d)



(e)

รูป 4.90 การกระจายตัวของขนาดเกรน ที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ (a) 0.000 (b) 0.005

(c) 0.010 (d) 0.020 และ (e) 0.030 เศษส่วนโดยโมล

#### 4.4.2.4 ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของเซรามิก

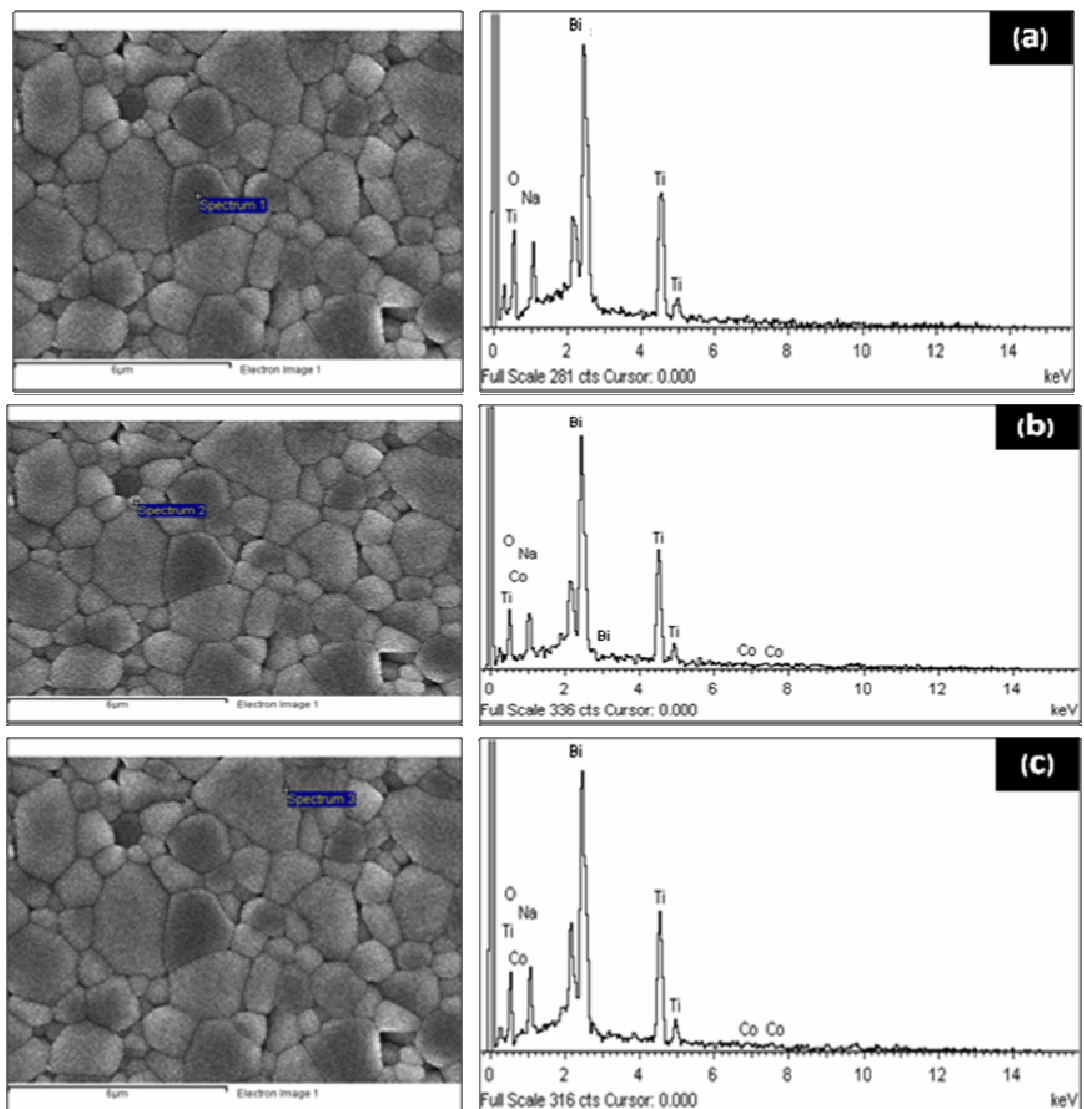
เมื่อถ่ายภาพ SEM เซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  แล้วนำมาตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการกระจายของรังสีเอกซ์ (EDX) ของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่เจือ Co ปริมาณต่างๆ โดยจากภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคจะพบว่าเกรนของเซรามิกมีทั้งขนาดเล็กและใหญ่กระจายตัวกันอยู่ ในการวิเคราะห์ EDX ในครั้งนี้จึงได้มีการวิเคราะห์บริเวณต่างๆ ที่แตกต่างกันสามจุด ได้แก่ บริเวณเกรนขนาดใหญ่ (Spectrum 1) เกรนขนาดเล็ก (Spectrum 2) และขอบเกรน (Spectrum 3) โดยได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

##### 1. ผลการวิเคราะห์ EDX ของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$ ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.005 เศษส่วนโดยโมล

จากรูป 4.91 และตาราง 4.30 แสดงปริมาณธาตุต่างๆ ที่พบในเซรามิก ซึ่งทั้งสามบริเวณที่ทำการวิเคราะห์พบธาตุ Bi, Na, Ti และ O ซึ่งเป็นธาตุหลักของเซรามิกนั่นเอง ส่วนธาตุ Co ซึ่งเป็นธาตุที่เจือลงไปปริมาณ 0.005 เศษส่วนโดยโมล พบในบริเวณ เกรนขนาดเล็ก และขอบเกรน โดยมีปริมาณมากที่สุดที่บริเวณเกรนขนาดเล็ก

ตาราง 4.30 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.005 เศษส่วนโดยโมล

| Element | Spectrum 1 |       | Spectrum 2 |       | Spectrum 3 |       |
|---------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|         | %Wt        | At%   | %Wt        | At%   | %Wt        | At%   |
| Bi L    | 44.16      | 15.5  | 47.06      | 18.49 | 44.96      | 16.47 |
| Na K    | 4.53       | 6.84  | 4.27       | 7.22  | 5.38       | 8.49  |
| Ti K    | 23.33      | 16.92 | 25.97      | 21.08 | 24.01      | 18.19 |
| Co K    | -          | -     | 1.11       | 0.73  | 0.79       | 0.49  |
| O K     | 27.98      | 60.75 | 21.59      | 52.48 | 24.86      | 56.37 |



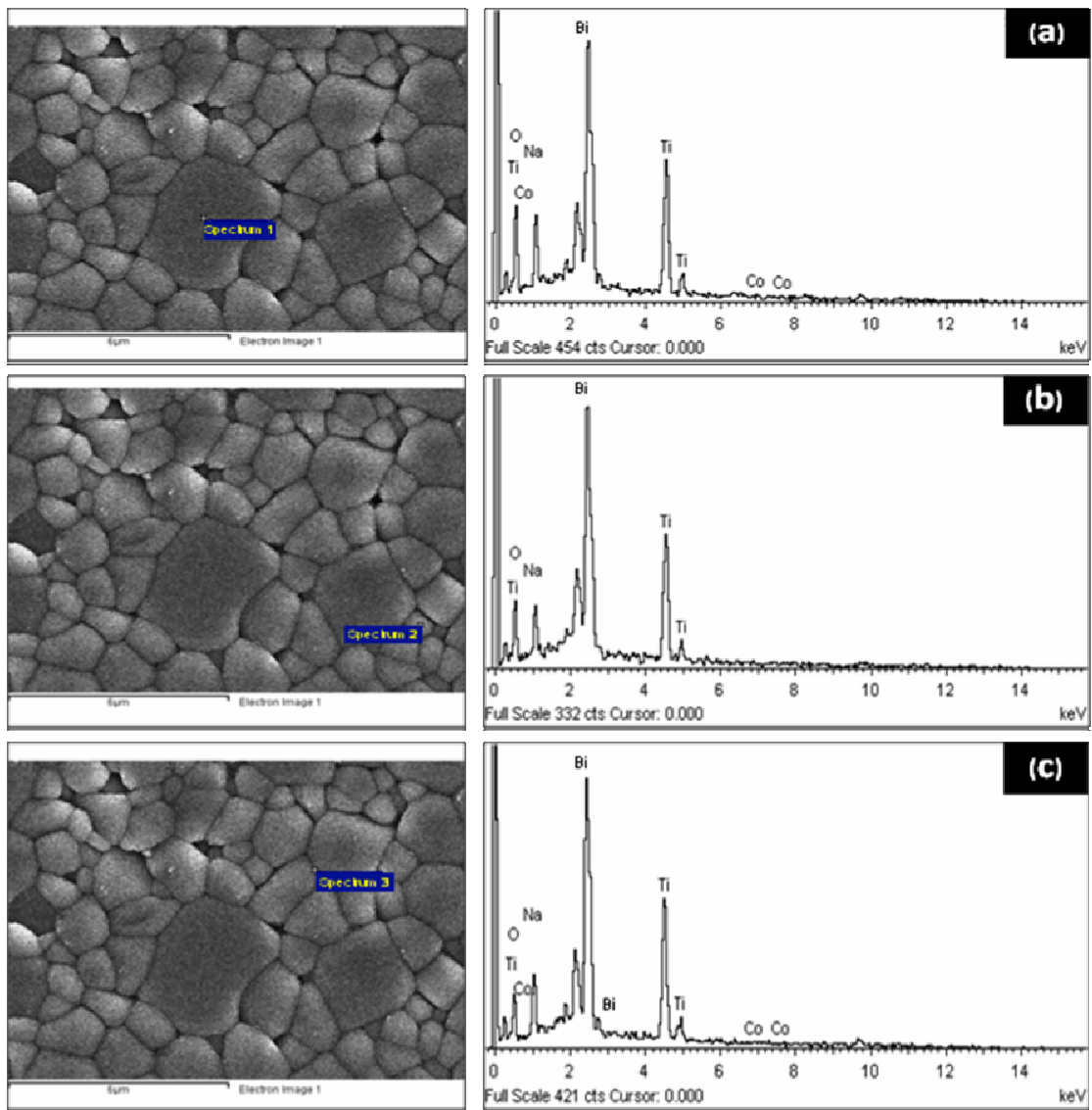
รูป 4.91 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 และ (c) Spectrum 3 ของเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.005 เศษส่วนโดยโมล

2. ผลการวิเคราะห์ EDX ของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.010  
 เศษส่วนโดยโมล

จากรูป 4.92 และตาราง 4.31 แสดงปริมาณธาตุต่างๆที่พบในเซรามิก ซึ่งทั้งสามบริเวณที่ทำการวิเคราะห์พบธาตุ Bi, Na, Ti และ O ซึ่งเป็นธาตุหลักของเซรามิกนั่นเอง ส่วนธาตุ Co ซึ่งเป็นธาตุที่เจือลงไปปริมาณ 0.001 เศษส่วนโดยโมล พบในบริเวณทั้งสามบริเวณเช่นเดียวกัน โดยมีปริมาณมากที่สุดที่บริเวณเกรนขนาดใหญ่

ตาราง 4.31 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก เมื่อ Co เท่ากับ 0.010 เศษส่วนโดยโมล

| Element | Spectrum 1 |       | Spectrum 2 |       | Spectrum 3 |       |
|---------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|         | %Wt        | At%   | %Wt        | At%   | %Wt        | At%   |
| Bi L    | 41.57      | 14.46 | 43.15      | 15.52 | 48.9       | 19.95 |
| Na K    | 5.94       | 8.9   | 4.73       | 7.32  | 4.94       | 8.68  |
| Ti K    | 23.91      | 17.2  | 25.32      | 18.82 | 26.63      | 22.44 |
| Co K    | 1.33       | 0.78  | 0.83       | 0.5   | 0.2        | 0.13  |
| O K     | 27.24      | 58.66 | 25.98      | 57.84 | 19.33      | 48.79 |



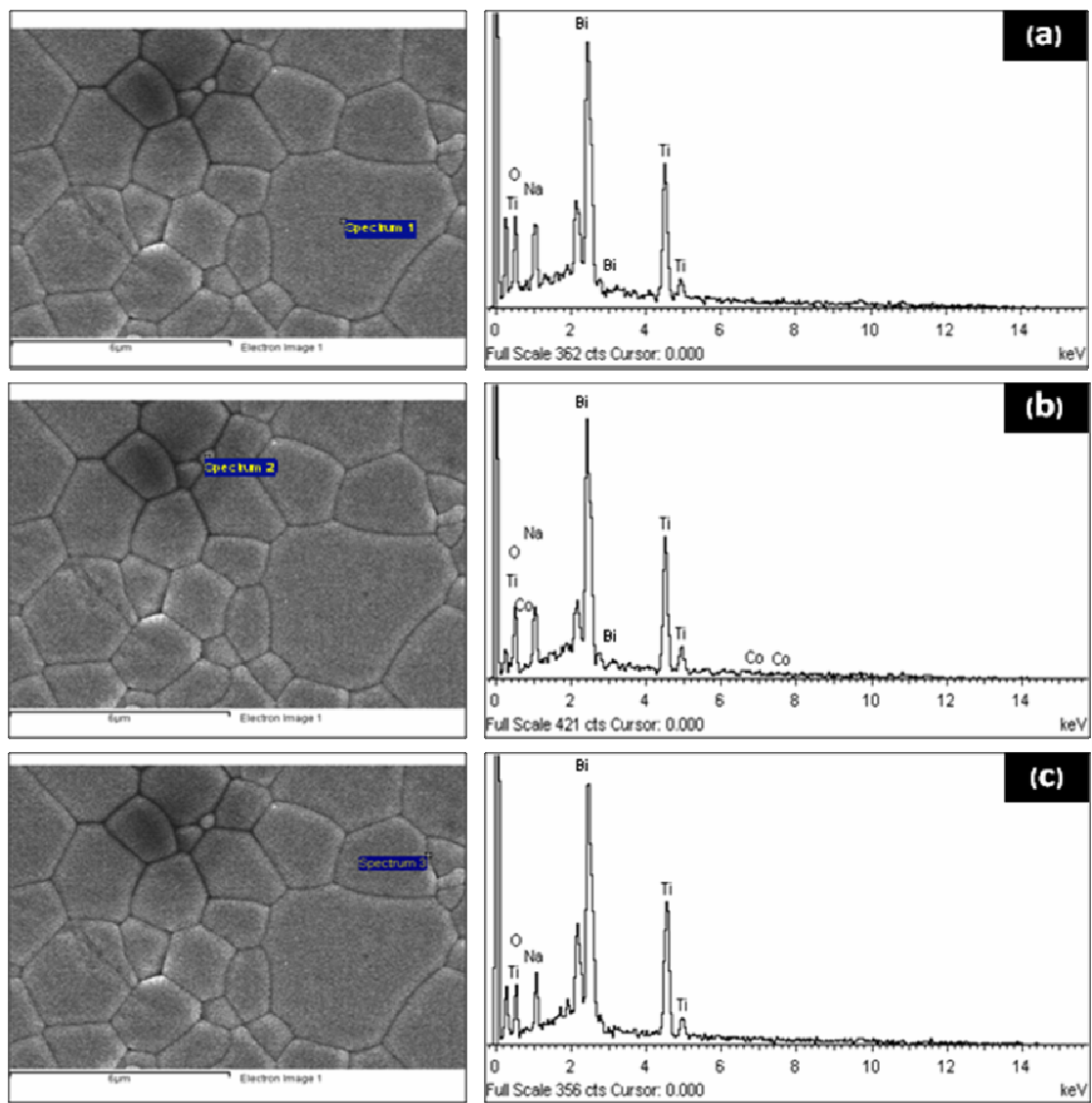
รูป 4.92 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 และ (c) Spectrum 3 ของเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.010 เศษส่วนโดยโมล

3. ผลการวิเคราะห์ EDX ของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.020  
เศษส่วนโดยโมล

จากรูป 4.93 และตาราง 4.32 แสดงปริมาณธาตุต่างๆที่พบในเซรามิก ซึ่งทั้งสามบริเวณที่ทำการวิเคราะห์พบธาตุ Bi, Na, Ti และ O ซึ่งเป็นธาตุหลักของเซรามิกนั่นเอง ส่วนธาตุ Co ซึ่งเป็นธาตุที่เจือลงไปปริมาณ 0.002 เศษส่วนโดยโมล พบเฉพาะในบริเวณเกรนขนาดเล็กเท่านั้น

ตาราง 4.32 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก เมื่อ Co เท่ากับ 0.020 เศษส่วนโดยโมล

| Element | Spectrum 1 |       | Spectrum 2 |       | Spectrum 3 |       |
|---------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|         | %Wt        | At%   | %Wt        | At%   | %Wt        | At%   |
| Bi L    | 43.97      | 15.72 | 44.75      | 16.76 | 47.69      | 18.96 |
| Na K    | 5.36       | 8.25  | 4.99       | 8.04  | 4.77       | 8.17  |
| Ti K    | 24.46      | 18.07 | 26.72      | 20.68 | 26.91      | 22.11 |
| Co K    | -          | -     | 0.04       | 0.03  | -          | -     |
| O K     | 26.21      | 57.96 | 23.51      | 54.49 | 20.63      | 50.76 |



รูป 4.93 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 และ (c) Spectrum 3 ของเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.020 เศษส่วนโดยโมล

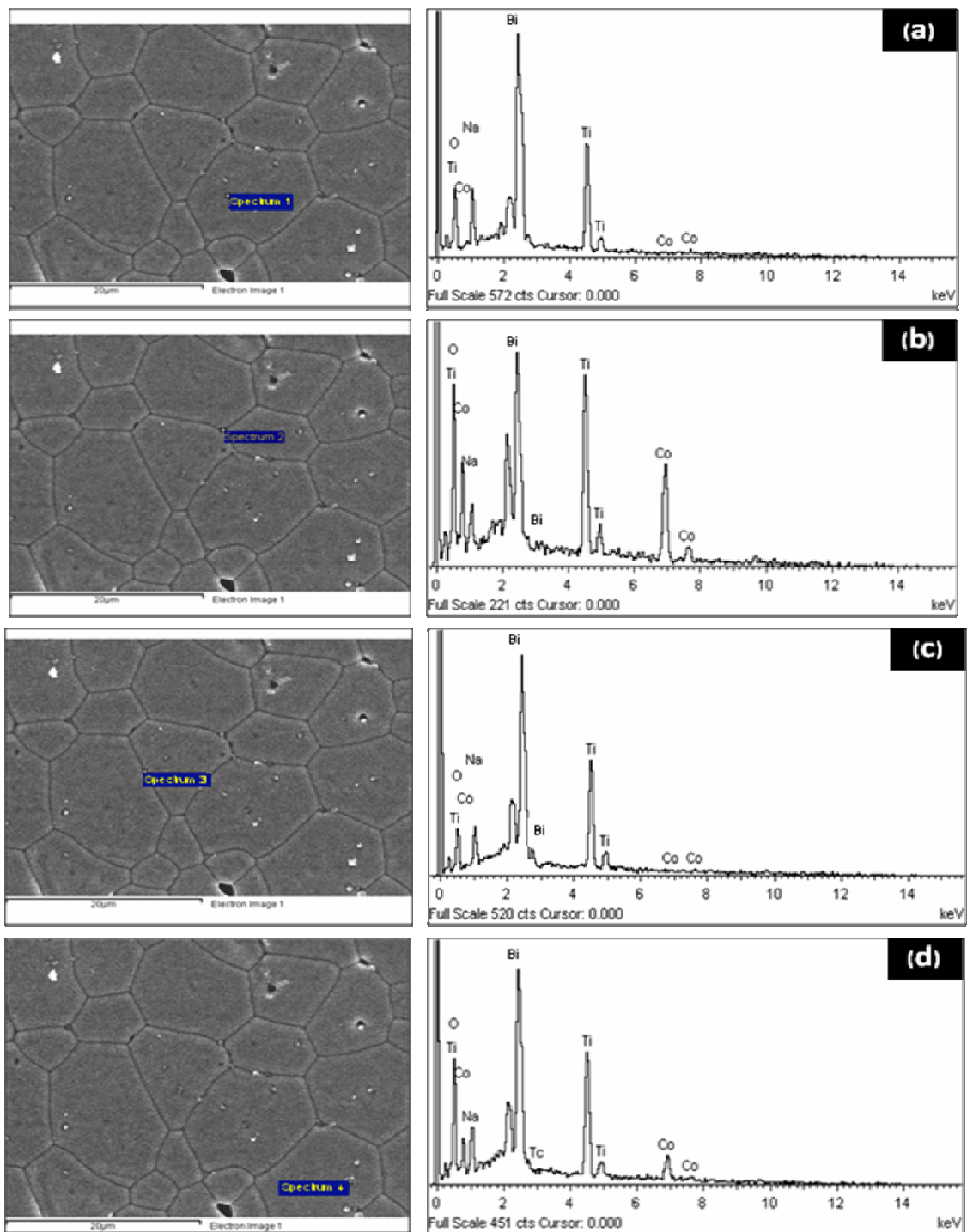
#### 4. ผลการวิเคราะห์ EDX ของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$ ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.030

##### เศษส่วนโดยโมล

จากภาพถ่าย SEM พบเกรนแปลกปลอมที่มีลักษณะเป็นจุดสนใจที่บริเวณผิว ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตรงบริเวณนี้ด้วย (spectrum 4) จากรูป 4.94 และตาราง 4.33 แสดงปริมาณธาตุต่างๆที่พบในเซรามิก ซึ่งทั้งสี่บริเวณที่ทำการวิเคราะห์พบธาตุ Bi, Na, Ti และ O ซึ่งเป็นธาตุหลักของเซรามิกนั่นเอง ส่วนธาตุ Co ซึ่งเป็นธาตุที่เจือลงไปปริมาณ 0.003 เศษส่วนโดยโมล พบในบริเวณทั้งสี่บริเวณเช่นเดียวกัน โดยมีปริมาณมากที่สุดที่บริเวณเกรนที่อยู่ผิว

ตาราง 4.33 องค์ประกอบของธาตุในเซรามิก เมื่อ Co เท่ากับ 0.030 เศษส่วนโดยโมล

| Element | Spectrum 1 |       | Spectrum 2 |       | Spectrum 3 |       | spectrum 4 |       |
|---------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|         | %Wt        | At%   | %Wt        | At%   | %Wt        | At%   | %Wt        | At%   |
| Bi L    | 44.83      | 16.35 | 21.98      | 8     | 48.54      | 19.9  | 32.80      | 10.87 |
| Na K    | 5.42       | 8.51  | 2.19       | 3.43  | 4.5        | 7.95  | 3.82       | 5.45  |
| Ti K    | 24.31      | 18.32 | 20.22      | 15.2  | 26.59      | 22.53 | 22.21      | 15.21 |
| Co K    | 0.33       | 0.2   | 31.6       | 19.31 | 1.11       | 0.76  | 10.66      | 5.93  |
| O K     | 25.1       | 56.62 | 24.01      | 54.06 | 19.26      | 48.87 | 30.50      | 62.54 |

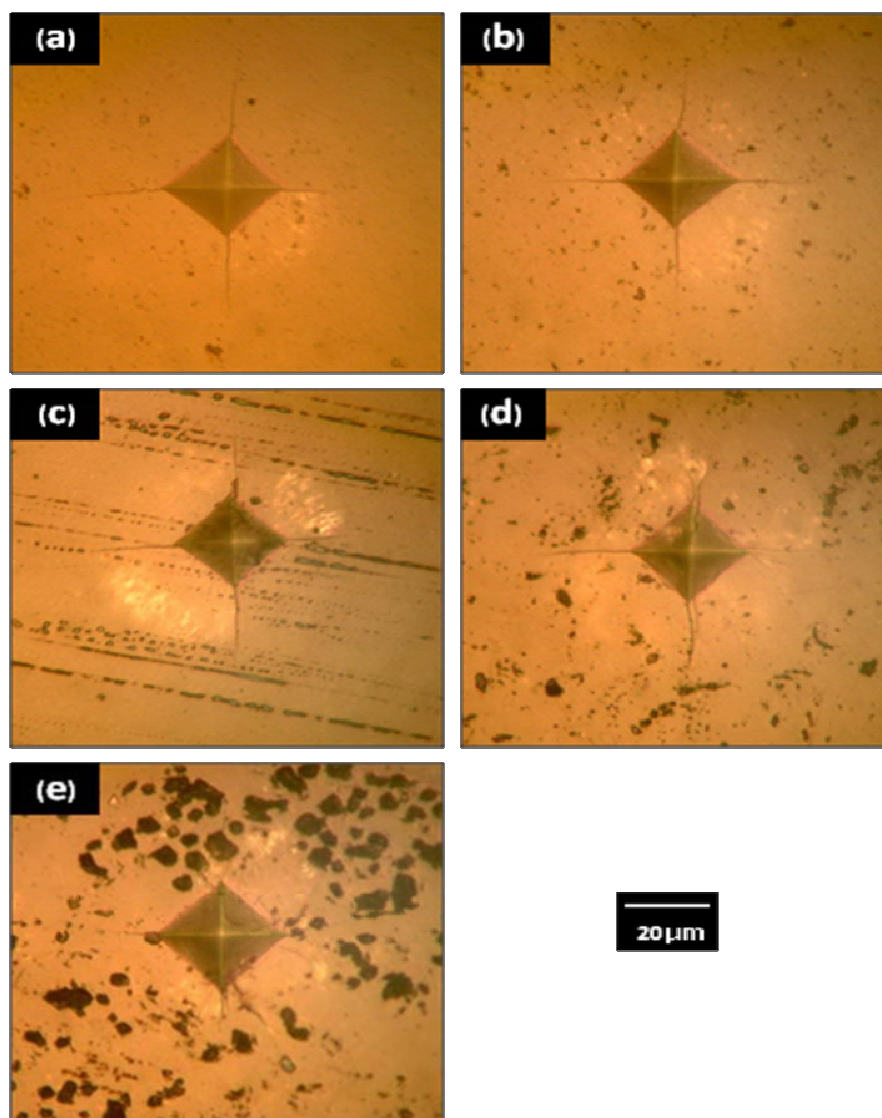


รูป 4.94 ภาพถ่าย SEM และการวิเคราะห์ EDX บริเวณ (a) Spectrum 1 (b) Spectrum 2 (c) Spectrum 3 และ (d) Spectrum 4 ของเซรามิก ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.030 เศษส่วนโดยโมล

#### 4.2.3 การศึกษาสมบัติของเซรามิก $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$

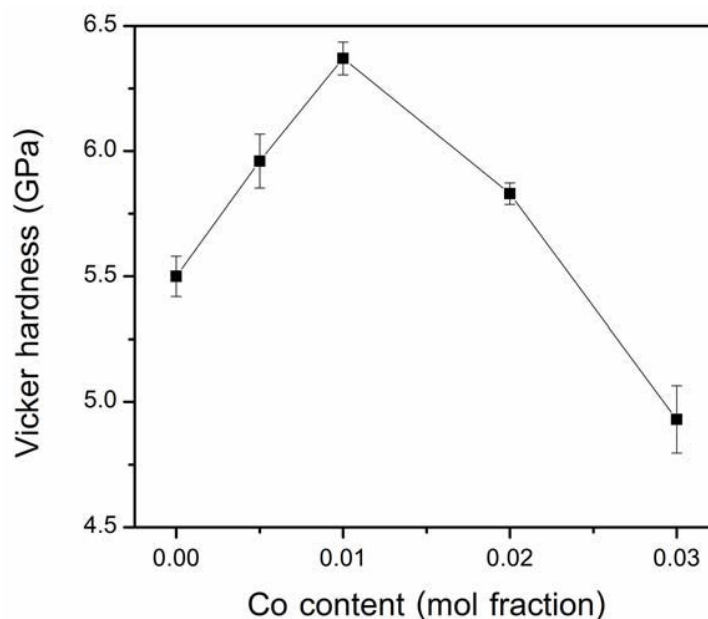
##### 4.2.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของเซรามิก

เมื่อนำชิ้นงานเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  มาทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์สโดยการ  
ใช้แรงกด 500 กรัม ทำให้ได้รอยกดดังรูป 4.95 โดยมีรูปร่างพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม พบว่ารอยกดของ  
เซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ทุกอัตราส่วนค่อนข้างมีความสมบูรณ์ดีทำให้ง่ายต่อการหาขนาดของ  
รอยกด โดยการหาขนาดของรอยกดจะใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (OM) ที่กำลังขยาย 40 เท่า



รูป 4.95 รอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก ที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ (a) 0.000 (b) 0.005  
(c) 0.001 (d) 0.002 และ (e) 0.003 เศษส่วนโดยโมล

จากผลการทดลองดังรูป 4.96 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและปริมาณการเติม Co ของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  พบว่าค่าความแข็งแบบวิกเกอร์มีค่าในช่วง 4.93 – 6.97 GPa โดยมีค่าความแข็งต่ำสุดและค่าความแข็งสูงสุดที่ปริมาณการเติม Co เท่ากับ 0.010 และ 0.030 เศษส่วนโดยโมล ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่น โดยปัจจัยที่ทำให้ค่าความแข็งของเซรามิกมีแนวโน้มดังกล่าวคือ รูพรุนที่หลงเหลืออยู่ (residual porosity) ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเสมอระหว่างการเผาซินเทอร์ของชิ้นงาน หรือเกิดขึ้นจากช่องว่างระหว่างอนุภาค (particle) ตอนขึ้นรูป ผง สังเกตได้ชัดเจนจากภาพถ่าย SEM ดังรูป 4.89 (c) พื้นผิวของเซรามิกที่ปริมาณการเติม Co เท่ากับ 0.030 เศษส่วนโดยโมลจะเกิดรูพรุนมากทั้งบริเวณรอยต่อระหว่างเกรนและภายในเกรน จึงทำให้มีค่าความแข็งต่ำสุด แต่ในทางกลับกันกับจากภาพถ่าย SEM ดังรูป 4.89 (e) พบว่าผิวของเซรามิกที่ปริมาณการเติม Co เท่ากับ 0.010 เศษส่วนโดยโมลจะเกิดรูพรุนน้อย สันนิษฐานว่าปริมาณเติม Co ในอัตราส่วนนี้มีความเหมาะสมที่ทำให้เกรนมีขนาดเหมาะสมและมีค่าความแข็งสูงสุด



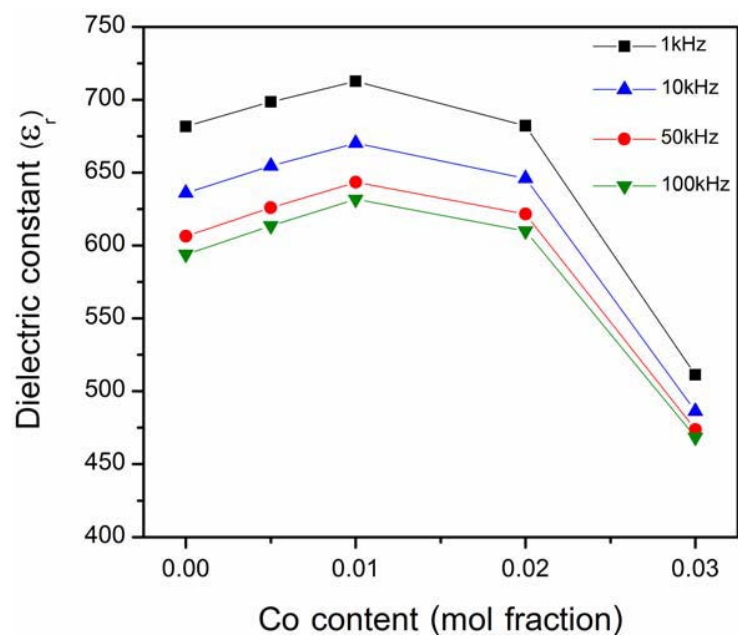
รูป 4.96 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิกกับปริมาณการเติม Co

#### 4.2.3.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก

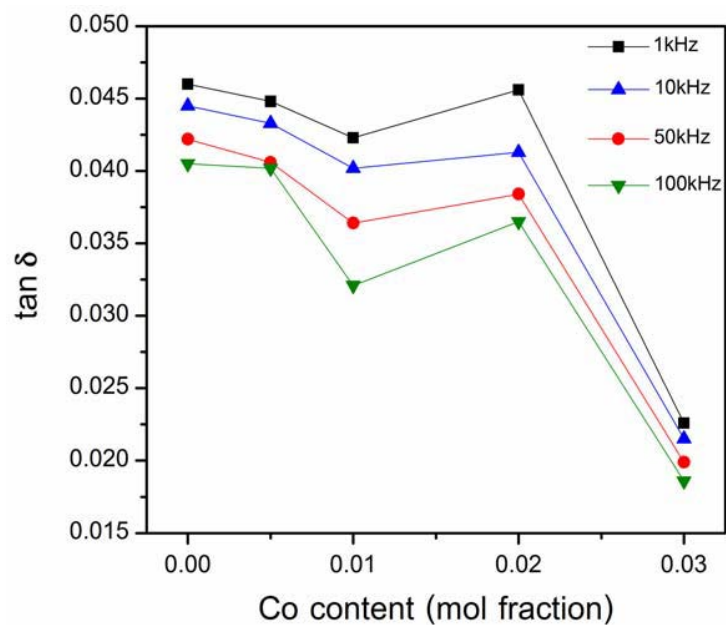
เมื่อนำเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่ปริมาณการเจือ Co เท่ากับ 0.005, 0.010, 0.020, และ 0.030 เศษส่วนโดยโมล ที่ผ่านการขัดเม็ดด้วยกระดาษทรายให้เป็นระนาบเรียบ และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแล้วมาตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติการนำไฟฟ้า และสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ได้ผลการทดลองต่อไปนี้

##### สมบัติไดอิเล็กทริก

เมื่อทดลองหาค่าสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความถี่ 1, 10, 50 และ 100 kHz ตามลำดับ จากผลการทดลองดังรูป 4.97 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เนื่องจากที่ความถี่สูงๆ ไดโพลในสารมีการตอบสนองได้ช้าลงโดยเฉพาะสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีเกรนขนาดใหญ่ [56] อย่างไรก็ตามค่าแฟกเตอร์การสูญเสียมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ส่วนเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก กับปริมาณการเติม Co พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มขึ้นกับปริมาณ Co เช่นเดียวกับค่าความหนาแน่น โดยที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.003 เศษส่วนโดยโมล มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำสุด และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ ส่วนที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.010 เศษส่วนโดยโมล มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงเช่นกัน ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงนี้น่าเป็นผลมาจากการที่เซรามิกมีเกรนขนาดเล็กซึ่งจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าเซรามิกที่มีขนาดเกรนใหญ่ และเนื่องจากเซรามิกมีค่าความหนาแน่นสูงซึ่งมีปริมาณช่องว่างหรือรูพรุนน้อย จึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกมีค่าสูง ทำให้ความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yanfang Qu และคณะ [57] ที่พบว่าการเจือ  $\text{Ba}^{2+}$  เข้าไปแทนที่  $\text{Bi}^{3+}$  ในเซรามิก BNT ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นที่ปริมาณการเจือ 0 - 6 atomic% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการเจือสูงขึ้นกว่านี้ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นด้วย และค่าไดอิเล็กทริกที่ลดลงเป็นผลของปริมาณช่องว่างของออกซิเจนที่มากเกินไป



(a)



(b)

รูป 4.97 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ (b) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียกับปริมาณการเติม Co ของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$

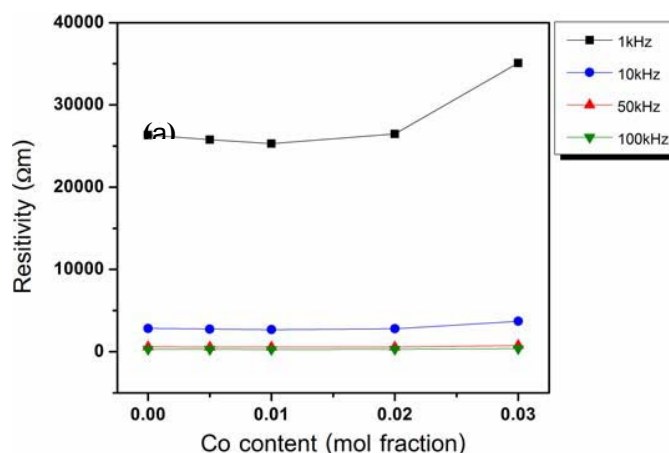
ตาราง 4.34 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่อุณหภูมิห้อง (29°C)

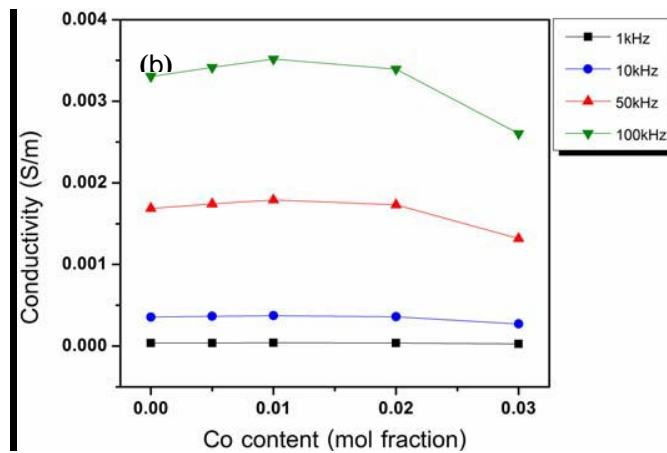
| Frequency<br>(kHz) | Co content<br>( mo fraction) | Dielectric constant<br>( $\epsilon_r$ ) | Dielectric loss<br>( $\tan\delta$ ) |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| 1                  | 0.000                        | 682                                     | 0.0460                              |
|                    | 0.005                        | 699                                     | 0.0448                              |
|                    | 0.010                        | 713                                     | 0.0423                              |
|                    | 0.020                        | 682                                     | 0.0456                              |
|                    | 0.030                        | 511                                     | 0.0226                              |
| 10                 | 0.000                        | 636                                     | 0.0445                              |
|                    | 0.005                        | 655                                     | 0.0433                              |
|                    | 0.010                        | 670                                     | 0.0402                              |
|                    | 0.020                        | 646                                     | 0.0413                              |
|                    | 0.030                        | 486                                     | 0.0215                              |
| 50                 | 0.000                        | 606                                     | 0.0422                              |
|                    | 0.005                        | 626                                     | 0.0406                              |
|                    | 0.010                        | 643                                     | 0.0364                              |
|                    | 0.020                        | 622                                     | 0.0384                              |
|                    | 0.030                        | 474                                     | 0.0199                              |
| 100                | 0.000                        | 594                                     | 0.0405                              |
|                    | 0.005                        | 614                                     | 0.0402                              |
|                    | 0.010                        | 632                                     | 0.0321                              |
|                    | 0.020                        | 610                                     | 0.0365                              |
|                    | 0.030                        | 468                                     | 0.0186                              |

## สมบัติการนำไฟฟ้า

เมื่อทดลองหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$  ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความถี่ 1, 10, 50 และ 100 kHz ตามลำดับ จากนั้นจึงมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้ากระแสสลับ (Electrical conductivity;  $\sigma_{AC}$ )

จากผลการทดลอง ดังรูป 4.97 แสดงให้เห็นว่าความถี่ที่ใช้ในการวัดส่งผลต่อค่าสภาพการนำไฟฟ้าของเซรามิก กล่าวคือ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ในการวัดสูงขึ้น และพบว่าแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของเซรามิกไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณ Co เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณ Co เท่ากับ 0.030 เศษส่วนโดยโมล มีค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าต่ำสุด ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากที่ปริมาณการเจือ Co 0.030 เศษส่วนโดยโมล เซรามิกมีความหนาแน่นต่ำ และมีรูพรุนมาก จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าต่ำ





รูป 4.97 (a) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (b) สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า

ตาราง 4.35 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของเซรามิก  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3-x}$

| Frequency<br>(kHz) | C content<br>( mol fraction) | Resistivity<br>( $\Omega \cdot \text{m}$ ) | Conductivity<br>(S/m) |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| 1                  | 0.000                        | $2.64 \times 10^4$                         | $3.79 \times 10^{-5}$ |
|                    | 0.005                        | $2.58 \times 10^4$                         | $3.88 \times 10^{-5}$ |
|                    | 0.010                        | $2.53 \times 10^4$                         | $3.95 \times 10^{-5}$ |
|                    | 0.020                        | $2.65 \times 10^4$                         | $3.77 \times 10^{-5}$ |
|                    | 0.030                        | $3.51 \times 10^4$                         | $2.85 \times 10^{-5}$ |
| 10                 | 0.000                        | $2.82 \times 10^3$                         | $3.54 \times 10^{-4}$ |
|                    | 0.005                        | $2.75 \times 10^3$                         | $3.64 \times 10^{-4}$ |
|                    | 0.010                        | $2.68 \times 10^3$                         | $3.73 \times 10^{-4}$ |
|                    | 0.020                        | $2.78 \times 10^3$                         | $3.59 \times 10^{-4}$ |
|                    | 0.030                        | $3.70 \times 10^3$                         | $2.70 \times 10^{-4}$ |
| 50                 | 0.000                        | $5.92 \times 10^2$                         | $1.69 \times 10^{-3}$ |
|                    | 0.005                        | $5.74 \times 10^2$                         | $1.74 \times 10^{-3}$ |
|                    | 0.010                        | $5.58 \times 10^2$                         | $1.79 \times 10^{-3}$ |