

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการเตรียมสารมีความสำคัญต่อการเกิดเฟส โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของสารเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีแบเรียมไทเทเนตเป็นฐานในระบบเซรามิก BT บริสุทธิ์ และชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) สามารถเตรียมผง BT ให้มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรได้ด้วยเทคนิค ball-milling ซึ่งใช้เวลาบดย่อยนาน 20 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1250 °ซ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาท จะทำให้ได้อนุภาคสาร BT ที่มีขนาดเล็กสุด และมีความบริสุทธิ์สูง
- (2) สามารถประดิษฐ์สารเซรามิก BT ด้วยเทคนิค mixed-oxide ที่ใช้ผง BT ขนาดอนุภาคนาโนเป็นสารตั้งต้น ซึ่งสารเซรามิกที่ได้จะอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งที่มีสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ใช้เผาซินเตอร์ ดังนี้
  - ก. เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้น จะทำให้ค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น โดยเซรามิก BT จะมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 10 °ซ/นาท
  - ข. เกรนของเซรามิก BT จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้เผาซินเตอร์สูงขึ้น
  - ค. สมบัติไดอิเล็กทริกของสารเซรามิก BT (วัดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์) จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์เป็น 1400 °ซ โดยจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด ( $\epsilon_r$ max) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ( $\tan\delta$ ) เท่ากับ 9395 และ 0.01 ตามลำดับ

- ง. วฏวนฮิสเทอรีซิสของสารเซรามิก BT จะแคบลงเมื่ออุณหภูมิขึ้นเตอรืสูงขึ้น โดยค่า  $E_c$  ลดลง แต่ค่า  $P_r$  และ  $P_s$  สูงขึ้น
- (3) สามารถประดิษฐ์สารเซรามิก BT ชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียมด้วยเทคนิค mixed-oxide ซึ่งสารเซรามิกที่ได้จะอยู่ในรูปของสารละลายของแข็ง ที่มีสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณสารเจือ
- สารเซรามิก BT ชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียมสูตร  $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$  จะมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ลดลงเมื่อปริมาณของไนโอเบียมที่เจือลงไปมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $x = 0.01$  เป็น 0.025
  - เกรนของสารเซรามิก BT ชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียมจะมีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณของไนโอเบียมในสูตร  $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$  มีค่าสูงขึ้น
  - เมื่อปริมาณการเจือของไนโอเบียมในเซรามิก  $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$  สูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงไป โดย  $T_c$  จะเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด ( $\epsilon_{max}$ ) จะลดลง และมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูงขึ้น (วัดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์)
  - วฏวนฮิสเทอรีซิสของสารเซรามิก BT ชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียมจะมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณไนโอเบียมที่เจือลงไปในสูตร  $Ba(Ti_{0.99-x}Fe_{0.01}Nb_x)O_3$  โดยค่า  $P_r$ ,  $P_s$  และ  $E_c$  จะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณไนโอเบียมที่เพิ่มขึ้น

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

- (1) ในกระบวนการเตรียมผงแบเรียมไทเทเนต ( $BaTiO_3$ ) ควรศึกษาขั้นตอนในระหว่างการเตรียม หรือเงื่อนไขที่เลือกใช้ในการเผาแคลไซน์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น การเพิ่มความถี่ของระยะเวลาการบดย่อยในช่วง 20-30 ชั่วโมง เพื่อหาระยะเวลาในการบดย่อยที่ดีที่สุด ที่ทำให้อนุภาคของ BT มีขนาดเล็กลง และลดอัตราการเกาะตัวของอนุภาค การเพิ่มหรือลดระยะเวลาในการเผาแคลไซน์ และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ เพื่อให้เกิดเฟสบริสุทธิ์ของผง BT

- (2) ควรทดลองศึกษาการเตรียมสารเซรามิกแบเรียมไทเทเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) โดยควบคุมขั้นตอนในระหว่างการเตรียมและเงื่อนไขที่เลือกใช้ในการเผาซินเตอร์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น การเพิ่มความถี่ของช่วงอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการเผาซินเตอร์ เปลี่ยนเทคนิคในการเผาซินเตอร์เช่น spark plasma sintering หรือ microwave sintering เพื่อให้เกรนของเซรามิก BT มีขนาดเล็กลง และมีความสม่ำเสมอ
- (3) สำหรับสารเซรามิกแบเรียมไทเทเนตชนิดที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียมควรเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ให้สูงขึ้น และเพิ่มความถี่ของปริมาณสารเจือ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของสารเซรามิก