

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุผง BiFeO_3 การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้และสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 และวัสดุ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ สามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุผง BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$

6.1.1 การศึกษาโดยเทคนิค TG-DTA, FT-IR และ XRD

จากผลการสังเคราะห์วัสดุผง BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ (เมื่อ $x = 0.05, 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.40) ด้วยวิธีตกตะกอน โดยใช้สารละลาย PEG (PEG + น้ำปราศจากไอออน + กรดไนตริก) เป็นตัวทำละลาย และสารละลายแอมโมเนียเป็นทำให้เกิดการตกตะกอนผงของสารตั้งต้นแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 และ 800°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สำหรับวัสดุผง BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ แคลไซน์เฉพาะที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผงที่ได้ศึกษาโครงสร้างเฟสโดยเทคนิค XRD ผลการทดลองพบว่าการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เฟสของสารประกอบออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของเฟส BiFeO_3 เริ่มต้นที่อุณหภูมิแคลไซน์ 500°C มียอดกราฟหลักที่ค่า 2θ เท่ากับ 22.543, 31.993, 32.054, 40.543, และ 45.543 องศา ที่มีการจัดโครงสร้างผลึกแบบบรอมโบฮีตรอล (rhombohedral) มี space group เป็น R3m สอดคล้องกับ JCPDS ไฟล์เลขที่ 73-0548 และไม่พบว่ามีเฟสปลอมปนเกิดขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิแคลไซน์ และพบว่าที่อุณหภูมิแคลไซน์อุณหภูมิ 600°C เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสอดคล้องกับการศึกษาโดยเทคนิค TG-DTA ซึ่งไม่พบว่าการสลายตัวของสารอนินทรีย์หรือเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้ และการศึกษาโดยเทคนิค FT-IR พบว่าไม่มีการสั่นของโมเลกุลของสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิแคลไซน์อุณหภูมิ 600 °C นี้เช่นเดียวกัน ขณะที่การสังเคราะห์วัสดุผง $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ สามารถสังเคราะห์วัสดุผง $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ที่บริสุทธิ์ที่ปริมาณการเจือสูงสุด 0.05 โมล และที่ปริมาณการเจือมากกว่า 0.05 โดยโมล พบว่ามีเฟสปลอมปนเกิดขึ้นเช่น $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ และ $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ (JCPDS ไฟล์เลขที่ 25-0090 และ 46-0416 ตามลำดับ) และพบว่าการเปลี่ยนโครงสร้างจากโครงสร้างแบบบรอมโบฮีตรอลไปเป็นโครงสร้างแบบโมโนคลีนิก (monoclinic) หรือแบบเตตระโกนอล (tetragonal) และจากขนาดผลึกของวัสดุผง BiFeO_3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ ซึ่งขนาดของผลึกที่ได้มีขนาดระหว่าง 30-100 nm ในขณะที่ขนาดผลึกของวัสดุผง $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ มีแนวโน้มคงตัวเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ Mn ซึ่งขนาดของอนุภาคที่ได้มีขนาดระหว่าง 20-60 nm เฉพาะแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

6.1.2 การศึกษาโดยเทคนิค SEM และ UV-Vis

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ BiFeO_3 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $400\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเทคนิค SEM พบว่า ในช่วงอุณหภูมิ $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ อนุภาคมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนและส่วนใหญ่ค่อนข้างขรุขระกระจายตัวกันน้อย และที่อุณหภูมิ แคลไซน์ $600\text{ }^\circ\text{C}$ อนุภาคกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น อนุภาคที่ได้มีขนาดระหว่าง $100\text{--}200\text{ nm}$ ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิ $700\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ อนุภาคที่ได้มีลักษณะกลมรวมตัวกันเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น อนุภาคที่ได้มีขนาดระหว่าง $300\text{--}500\text{ nm}$ ขณะที่การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ เมื่อมีการเจือ Mn ในช่วง $0.05 \leq x \leq 0.4$ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $600\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า อนุภาคมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนแต่ส่วนใหญ่ค่อนข้างกลม และมีการกระจายตัวกันเป็นอย่างดีเมื่อมีการเจือ Mn มากขึ้น และขนาดของอนุภาคที่สังเกตจากเทคนิค SEM มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน อนุภาคที่ได้มีขนาดระหว่าง $100\text{--}200\text{ nm}$

ในการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาค BiFeO_3 โดยใช้ของอนุภาค BiFeO_3 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง $400\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเทคนิค UV-Vis พบว่าลักษณะสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงมีความคล้ายคลึงกัน โดยแสดงการดูดกลืนแสงได้ดีในย่าน UV คือที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 nm (3.10 eV) และมียอดกราฟของการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นประมาณ 288 nm (4.30 eV) ซึ่งการดูดกลืนแสงของอนุภาค BiFeO_3 เนื่องมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (electronic transition) จากแถบวาเลนซ์ (valence band) ไปยังแถบการนำ (conduction band) และผลจากการคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบไม่ตรง แสดงให้เห็นได้ว่าค่า E_g แบบตรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแคลไซน์ที่สูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ $1.48, 1.70, 1.93, 2.57$ และ 2.63 eV ในขณะที่ค่าช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงของอนุภาค $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ $600\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า E_g มีค่าค่อนข้างคงที่ ถึงแม้ว่าจะเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิแคลไซน์ที่สูงขึ้นก็ตาม โดยมีค่าอยู่ระหว่าง $1.8, 1.72, 1.69, 1.69$ และ 1.59 eV

6.1.3 การศึกษาโดยเทคนิค XANES และ VSM

ในการศึกษาสมบัติการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอนุภาค BiFeO_3 และอนุภาค $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง $600\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเทคนิค XANES พบว่าลักษณะสเปกตรัมของการดูดกลืนรังสีเอกซ์ความคล้ายคลึงกัน และพบว่าสถานะออกซิเดชันของ Fe ของอนุภาค BiFeO_3 มีสถานะออกซิเดชันเท่ากับ $3+$ และสถานะออกซิเดชันของ Fe ของอนุภาค $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ มีแนวโน้มสถานะออกซิเดชันเท่ากับ $2+$ แต่ไม่ขึ้นกับปริมาณการเมื่อเจือ Mn ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2.67+, 1.97+, 1.92+, 1.86+, 1.96+$ และ $2.04+$ เมื่อ x เท่ากับ $0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4 ตามลำดับ ในขณะที่สถานะออกซิเดชันของ Mn ของอนุภาค $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ พบว่ามีแนวโน้มสถานะออกซิเดชันเท่ากับ $2+$ แต่ไม่ขึ้นกับ

ปริมาณการเมื่อเจือ Mn ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.80+, 3.83+, 3.91+, 4.01+, และ 3.99+ เมื่อ x เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 ตามลำดับ

ผลการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาค BiFeO_3 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง $400\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเทคนิค VSM ศึกษาพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กของค่าแมกเนโตเซชันที่พบว่าอนุภาคที่ได้แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โรแมกเนติกในสารตัวอย่างทุกช่วงอุณหภูมิแคลไซน์ เนื่องจากการจัดเรียงสปินของเหล็กในออร์บิทัลเป็นแบบหักล้างกันหมดทำให้สปินสุทธิเป็นศูนย์ และผลจากการทดลองพบว่าค่าแมกเนโตเซชันลดลงเมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (ขนาดใหญ่ขึ้น) โดยมีค่าเท่ากับ 0.118, 0.090, 0.065, 0.051 และ 0.055 emu/g ที่สนามแม่เหล็ก 10 kOe สำหรับ BiFeO_3 ที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700, และ $800\text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ เกิดเนื่องจากผลของอัตราส่วนระหว่างสปินภายในเกรน (core) ซึ่งมีสปินสุทธิเป็นศูนย์ ทำให้วัสดุแสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและที่บริเวณผิวสัมผัส (surface) ซึ่งมีสปินสุทธิไม่เป็นศูนย์ ทำให้แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก และที่อุณหภูมิแคลไซน์ $800\text{ }^\circ\text{C}$ พบว่าค่าแมกเนโตเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุน่าจะเกิดจากผลของช่องว่างออกซิเจนเนื่องจากอุณหภูมิแคลไซน์ที่สูง

ผลการศึกษาพฤติกรรมทางแม่เหล็กอนุภาค $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ เมื่อมีการเจือ Mn ในช่วง $0.05 \leq x \leq 0.4$ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $600\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าวัสดุตัวอย่างทุกช่วงของการเจือแสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเช่นเดียวกับวัสดุ BiFeO_3 และมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิในการแคลไซน์เดียวกัน โดยที่ค่าแมกเนโตเซชันมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเจือ Mn ในช่วง $0.05 \leq x \leq 0.2$ และลดลงเมื่อเจือในปริมาณมากขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.101, 0.109, 0.136, 0.087 และ 0.099 emu/g ที่สนามแม่เหล็ก 10 kOe สำหรับ $x = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3,$ และ 0.4 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุของค่าแมกเนโตเซชันมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อทำการเจือ Mn นั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้พฤติกรรมที่ขึ้นกับขนาดของอนุภาคดังที่กล่าวได้มาแล้วข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ปริมาณการเจือ 0.3 และ 0.4 โมล พบว่าค่าแมกเนโตเซชันไม่ขึ้นกับขนาดของอนุภาคเพียงอย่างเดียว ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวอาจมีสาเหตุเนื่องจากวัสดุเกิดอันตรกิริยาที่เรียกว่า super exchange interaction ซึ่งเกิดจากการคู่ควบของไอออนที่สูงขึ้นเมื่อเจือในปริมาณมากขึ้นเช่น $\text{Fe}^{2+} - \text{O}^{2-} - \text{Fe}^{2+}$ และ $\text{Fe}^{2+} - \text{O}^{2-} - \text{Mn}^{4+}$

6.2 การเตรียม ศึกษาสมบัติพื้นฐานและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$

6.2.1 การศึกษาโดยเทคนิค XRD และ SEM

ผลการศึกษาการเกิดเฟสของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 600–880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเทคนิค XRD พบว่าที่อุณหภูมิเผาผนึก 600 °C ยอดกราฟของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นไม่มีเฟสปลอมปน สอดคล้องกับการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BiFeO_3 ที่มีการจัดโครงสร้างผลึกแบบเป็นรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) มี space group เป็น $R\bar{3}m$ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 700–880 °C พบว่าลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไม่มีเฟสปลอมปนของสารประกอบ $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ และ $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ เป็นต้น

ผลการศึกษาการเกิดเฟสของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ พบว่าลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเฟสหลักมีความคล้ายคลึงกัน ในเซรามิกที่เจือ Mn ในช่วง $0.05 \leq x \leq 0.1$ ไม่พบการเกิดเฟสแปลกปลอมของสารประกอบอื่น แต่เมื่อทำการเจือ Mn ในช่วง $0.2 \leq x \leq 0.4$ พบว่าลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบการเกิดเฟสแปลกปลอมของสารประกอบอื่นเกิดขึ้นเช่น $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกเป็น 700 °C พบว่า มีการเกิดเฟสแปลกปลอมของสารประกอบอื่นมากขึ้นเช่น $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ BiFeO_3 ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 600–880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเทคนิค SEM พบว่า ที่อุณหภูมิเผาผนึก 600 °C เกรนมีขนาดเล็กโดยมีค่าเท่ากับ 0.3–0.5 μm และมีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกนั้นมีค่าต่ำ ส่วนวัสดุเซรามิก BiFeO_3 ที่เผาผนึกระหว่าง 700–800 °C พบว่าเกรนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีลักษณะสม่ำเสมอโดยมีขนาดอยู่ระหว่าง 1.2–1.5 μm และมีการอัดเรียงตัวของเกรนที่แน่นขึ้นและไม่มีการเกิดรูพรุนเกิดขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิเผาผนึก 880 °C สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เกรนมีขนาดใหญ่มาก ๆ โดยมีค่าเท่ากับ 50 μm

ผลจากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_3$, $\text{BiFe}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_3$, $\text{BiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_3$, $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ และ $\text{BiFe}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_3$ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 600–880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า ที่อุณหภูมิเผาผนึก 600 °C วัสดุตัวอย่างทั้งหมดมีลักษณะคล้ายกับวัสดุเซรามิก BiFeO_3 คือเกรนมีขนาดเล็กโดยมีค่าเท่ากับ 0.3–0.4 μm และวัสดุมีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากกระจายทั่วทั้งวัสดุเซรามิก สำหรับวัสดุเซรามิก BiFeO_3 ที่เผาผนึกระหว่าง 700–800 °C พบว่าเกรนมีขนาดใหญ่มากขึ้น แต่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอโดยมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.8–1.5 μm และมีการอัดเรียงตัวของเกรนหนาแน่นน้อยลงเมื่อเจือ Mn ปริมาณมากขึ้น และมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

6.2.2 การศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริก

การเปลี่ยนแปลงกับความถี่และอุณหภูมิของสมบัติทางไดอิเล็กทริก (ค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกและการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก) ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 600, 700, 800 และ 880 °C พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงโดยอยู่ในช่วงระหว่าง $10^3 - 10^4$ ในช่วงความถี่ต่ำกว่าความถี่ของ และมีพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกที่แปลก กล่าวคือ การเกิดรีแลกเซชันทางไดอิเล็กทริก (dielectric relaxation) โดยการรีแลกเซชันทางไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในวัสดุเซรามิก BiFeO_3 ทั้งสามตัวอย่างนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสามช่วงเดียวกันคือ 3 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (low-temperature dielectric relaxation, LTDR) ระหว่าง -40 และ 50 °C ช่วงอุณหภูมิกึ่งกลาง (middle-temperature dielectric relaxation, MTDR) ระหว่าง 50 และ 170 °C และ ช่วงอุณหภูมิสูง (high-temperature dielectric relaxation, HTDR) กว่า 170 °C

งานวิจัยนี้ได้เสนอว่า ผลการรีแลกเซชันทางไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในวัสดุเซรามิก BiFeO_3 ทั้งสามตัวอย่างนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็นสามกรณีด้วยกัน โดยช่วงแรกในช่วงช่วงอุณหภูมิต่ำ เกิดเนื่องจากการกระโดด (hopping) ของประจุไฟฟ้าระหว่างคู่อิออนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งเกิดขึ้นภายในเกรนของวัสดุเซรามิก ช่วงที่สาม ผลการรีแลกเซชันที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้ เกิดเนื่องจากการสูญเสียของออกซิเจนในระหว่างการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ซึ่งส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างสมบัติทางไฟฟ้าที่ภายในของวัสดุและบริเวณผิวหน้าของวัสดุ

ผลการทดลองการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของสมบัติทางไดอิเล็กทริก (ϵ' และ $\tan \delta$) พบว่า การเจือไอออนของ Mn เพื่อแทนที่ตำแหน่งอะตอมของ Fe ในโครงสร้างผลึก ได้ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกและพฤติกรรมการรีแลกเซชันทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 ที่เตรียมโดยวิธีตกตะกอน โดยพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ BiFeO_3 มีค่าลดลงอย่างฉับพลันเมื่อเจือด้วยไอออนของ Mn ในปริมาณเพียง 0.05 โดยโมล จากนั้นยังพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไอออนของ Mn ที่ใช้เจือ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ กับปริมาณของไอออนของ Mn พบว่า ค่า $\tan \delta$ มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของไอออนของ Mn ที่ใช้เจือ นอกจากนี้ยังพบว่า ชุดของการรีแลกเซชันที่พบในวัสดุ BiFeO_3 ที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ (สามช่วงอุณหภูมิ) ถูกลดลงเหลือเพียงชุดเดียวและเกิดที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น และการรีแลกเซชันทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้น ตามปริมาณการเจือไอออนของ Mn ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการกระจายตัวตามอุณหภูมิเป็นอย่างมาก ผลการทดลองดังกล่าวนี้บ่งชี้ได้อย่างชัดเจนว่า การเจือไอออนของ Mn มีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการรีแลกเซชันทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BiFeO_3

ผลจากการศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์ พบว่า อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของวัสดุเซรามิกทั้งหกตัวอย่าง (ที่อุณหภูมิห้อง) แสดงลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปครึ่งวงกลมสองวง ผลดังกล่าวนี้บ่งชี้ว่าวัสดุเซรามิกมีองค์ประกอบทางไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอภายในเนื้อสาร โดยองค์ประกอบด้วยส่วนที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงและต่ำ จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ เราสามารถประมาณค่าความต้านทานไฟฟ้าในแต่ละสารตัวอย่างได้จากจุดตัดของเส้นกราฟกับแกน $x (Z')$ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นโค้งวงกลมวงแรกมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อเจือ Mn ในปริมาณ 0.05 โดยโมล และเล็กลงเมื่อเจือ Mn ในปริมาณมากขึ้น ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่าความต้านทานไฟฟ้าของเกรนมีค่ามากขึ้นเมื่อเจือ Mn ในปริมาณ 0.05 โดยโมล และน้อยลงเมื่อเจือ Mn ในปริมาณมากขึ้น ซึ่งสามารถประมาณค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าและสภาพการนำของเกรนและขอบเกรนในวัสดุเหล่านี้ที่ปริมาณการเจือต่าง ๆ

ผลจากการศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุเซรามิกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอดูลัส พบว่า สามารถสังเกตเห็นยอดกราฟ ซึ่งบ่งชี้ว่ามีกระบวนการนาเกิดขึ้นในวัสดุเซรามิก และยอดกราฟของ M^* มีลักษณะเคลื่อนไปในทิศทาง การเพิ่มของอุณหภูมิเมื่อความถี่สูงขึ้น ผลดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาค่าเวลาของการรีแลกเซชันที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลดังกล่าวเกิดเนื่องจาก การโพลาไรเซชันของคู่อิออนระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งเกิดขึ้นภายในเกรนของวัสดุ

6.3 ข้อเสนอแนะและงานที่ทำในอนาคต

ในการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุ $BiFeO_3$ ในงานวิจัยนี้ พบว่า การเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนนั้นสามารถสังเคราะห์วัสดุ $BiFeO_3$ ที่บริสุทธิ์ได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามการเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนยังมีข้อจำกัดอยู่เมื่อมีการเจือธาตุต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ธาตุหลักเข้าไปแทนที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เจือเฉพาะ Mn เท่านั้นซึ่งพบว่าการเจือ Mn เข้าไปแทนที่ Fe ได้เพียง 10% เท่านั้นซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ และขนาดอนุภาคที่ได้ยังมีขนาดใหญ่ ทำให้วัสดุที่เตรียมได้ไม่แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติกตามที่ต้องการ และเมื่อนำวัสดุผงที่สังเคราะห์ได้ไปทำการอัดเม็ดเพื่อทางไดอิเล็กทริกพบว่าวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้มีค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าที่สูงซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการประยุกต์ใช้งานในอนาคต ซึ่งผลการทดลองดังกล่าว จำเป็นต้องอาศัยความรู้ด้านอื่น ๆ เช่น การผนึกความเร็วสูงเพื่อปรับปรุงความต้านทาน เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองที่ได้ก็ยังมีจุดที่แตกต่างจากวรรณกรรมทั่วไปคือ การเกิดพฤติกรรมที่ไม่ปกติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ $BiFeO_3$ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในวรรณกรรมนี้ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวนี้ยังต้องการการพิสูจน์ถึงสาเหตุการเกิดพฤติกรรมดังกล่าวนี้ว่าเกิดเนื่องจากสาเหตุใด ๆ นอกเหนือจากสาเหตุที่ได้กล่าวไว้ในวรรณกรรมนี้หรือไม่ ซึ่งต้องอาศัยเทคนิคต่าง ๆ เข้ามาช่วยอธิบายเช่น X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) ใช้

เพื่อตรวจสอบสถานะประจุที่แท้จริงของ Fe และ Mn โดยมีค่าประจุเป็น $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$ หรือ $\text{Mn}^{3+} / \text{Mn}^{4+}$ ตามลำดับ

จากรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าในงานวิจัยนี้เป็นเพียงจุดเริ่มต้นของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนกลุ่ม $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ด้วยวิธีการตกตะกอน ซึ่งถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่าย จึงควรมีการศึกษาวิธีการตกตะกอนนี้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงการเตรียมอนุภาคให้มีประสิทธิภาพและได้อนุภาคที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เพื่อสามารถนำอนุภาคนาโนที่เตรียมได้จากวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในอนาคต

