

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลาวันทางจะเซ้เท่ากับ 1:5 และวัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลาวันทางจะเซ้เท่ากับ 1:10 ได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้เทคนิค TG-DTA, XRD, FTIR, TEM และ SEM และการศึกษาพฤติกรรมการเผาผนึกและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 และวัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

6.1 การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุผง และ วัสดุเซรามิก BaTiO_3 เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลาวันทางจะเซ้เท่ากับ 1:5

6.1.1 การศึกษาโครงสร้างของวัสดุผง BaTiO_3 โดยเทคนิค XRD

จากการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบโดยเทคนิค XRD ของวัสดุผง BaTiO_3 เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลาวันทางจะเซ้เท่ากับ 1:5 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดย สามารถสรุปได้ว่า วัสดุผง BTP_1 วัสดุผง BTP_2 และ วัสดุผง BTP_3 เป็นโครงสร้างของวัสดุผง BaTiO_3 ที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ และ สอดคล้องกับข้อมูลในงานวิจัยของ Peng et al. (2003) จากผลการศึกษาตรวจพบเฟสปลอมปนของ TiO_2 ในวัสดุ BTP_1 เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์สูงขึ้น พบว่า วัสดุผง BTP_2 และ วัสดุผง BTP_3 พบเฟสปลอมปนของ TiO_2 ที่มีเฟสเป็นอนาเทส และ TiO_2 ที่มีเฟสเป็นรูไทล์ ในปริมาณสูงกว่าที่พบใน วัสดุ BTP_1 และไม่พบองค์ประกอบของสารละลายเจลาวันทางจะเซ้ในวัสดุผงที่เตรียมได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบโดยเทคนิค FTIR และ TEM เมื่อคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (a) พบว่า วัสดุผง BTP_1 วัสดุผง BTP_2 และ วัสดุผง BTP_3 มีค่า 4.0087, 4.0071 และ 4.0088 Å ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าแลตทิซพารามิเตอร์ จากฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS No. 89-2263) ขนาดของอนุภาคของวัสดุผง BTP_1 วัสดุผง BTP_2 และ วัสดุผง BTP_3 ที่คำนวณจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ มีค่า 46.58 ± 26.62 , 39.67 ± 10.31 และ 45.96 ± 30.21 นาโนเมตร ตามลำดับ

6.1.2 การศึกษาโครงสร้างของวัสดุผง BaTiO_3 โดยเทคนิค SEM

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุผง BaTiO_3 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยเทคนิค SEM สรุปได้ว่า อนุภาคของวัสดุผง BTP_1 วัสดุผง BTP_2 และ วัสดุผง BTP_3 มีลักษณะรวมตัวกันเป็นแท่งขนาดเล็ก (nanorods) โดยประมาณได้ว่าแท่งขนาดเล็กนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร ซึ่งการเกิดแท่งขนาดเล็กในลักษณะเช่นนี้เกิดจากผลึกไม่มีการเติบโตในเชิงรัศมีในทุกทิศทาง แต่เกิดการเติบโตในทิศทางเดียวจึงทำให้วัสดุผงที่ผ่านการแคลไซน์ทุกอุณหภูมิแคลไซน์มีลักษณะเป็นแท่งขนาดเล็กซึ่งสอดคล้องในงานวิจัยของ Wei et al. (2006) และพบว่าเมื่ออุณหภูมิแคลไซน์สูงขึ้นจะพบปริมาณการเกิดแท่งขนาดเล็กมากขึ้นและแท่งมีความเพิ่มยาวขึ้น

6.1.3 การศึกษาโครงสร้างของวัสดุเซรามิก BaTiO₃ โดยเทคนิค XRD

หลังจากศึกษาการเกิดเฟสและโครงสร้างของวัสดุเซรามิก BTS_0, BTS_1, BTS_2 และ BTS_3 ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงสรุปได้ว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS No 81- 2203) โดยมีโครงสร้างแบบเพระโกนัล และสอดคล้องกับข้อมูลในงานวิจัยของ Lee et al. (2006) ไม่พบเฟสปลอมปนของ TiO₂ ที่มีเฟสเป็นอนาเทสแต่ตรวจพบเฟสปลอมปนของ TiO₂ ที่มีเฟสเป็นรูไทล์ในโครงสร้างของวัสดุเซรามิกเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น TiO₂ ที่มีเฟสเป็นอนาเทสจะเปลี่ยนเฟสจากอนาเทสเฟสไปเป็นรูไทล์เฟส และจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากข้อมูลมาตรฐานของวัสดุเซรามิก BaTiO₃ (JCPDS No 81- 2203) ที่มีโครงสร้างเพระโกนัล เฟส

6.1.4 การศึกษาลักษณะพื้นฐานวัสดุเซรามิก BaTiO₃ โดยเทคนิค SEM

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุเซรามิก BTS_0, BTS_1, BTS_2 และ BTS_3 ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงสรุปได้ว่า วัสดุเซรามิก BTS_0 มีเกรนอย่างสมบูรณ์ เกรนมีลักษณะค่อนข้างกลม โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 0.39(±0.10) ไมโครเมตร โครงสร้างทางจุลภาคของเกรนมีลักษณะเป็นรูปพรุนแบบเปิด วัสดุเซรามิก BTS_1 มีลักษณะของพื้นผิวมีการเติบโตของเกรนที่ผิดปกติเนื่องจากเกิดการหลอมตัวของเกรนทำให้เกรนบางส่วนมีขนาดใหญ่ เกรนเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 0.66(±0.26) ไมโครเมตร วัสดุเซรามิก BTS_2 และ วัสดุเซรามิก BTS_3 พบว่าพื้นผิวมีการเกิดเกรนอย่างสมบูรณ์ เกรนมีลักษณะค่อนข้างกลม ลักษณะของเกรนที่พบมีสองลักษณะคือเกรนขนาดเล็ก และเกรนที่มีการเติบโตของเกรนที่ผิดปกติ ซึ่งขนาดเกรนของ วัสดุเซรามิก BTS_2 และ BTS_3 มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 0.47(+0.19) และ 0.63(+0.29) ไมโครเมตร ตามลำดับ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิแคลไซน์สูงขึ้นขนาดเกรนของวัสดุเซรามิกมีค่ามากขึ้นด้วย

6.1.5 การศึกษาองค์ประกอบของวัสดุเซรามิก BaTiO₃ โดยใช้เทคนิคการกระเจิงรามาน

จากการศึกษาองค์ประกอบของวัสดุเซรามิก BaTiO₃ ของวัสดุเซรามิก BTS_0, BTS_2 และ BTS_3 จากการทดลองพบว่าสเปกตรัมรามานของวัสดุเซรามิก BTS_2 และ วัสดุเซรามิก BTS_3 เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 718, 515, 306, 260 และ 182 cm⁻¹ ส่วนวัสดุเซรามิก BTS_0 สเปกตรัมรามานเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 718, 515, 306 และ 260 cm⁻¹ เมื่อเปรียบเทียบกับรายงานการวิจัยของ Li et al. (2004) และ Zhang et al. (2006) พบว่ามีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นบางตำแหน่งซึ่งอาจเกิดจากความเค้นขณะที่ทำการวัดจึงทำให้เลขคลื่นบางตำแหน่งเกิดการเลื่อนไป จากสเปกตรัมรามานของวัสดุ BTS_2 และ วัสดุเซรามิก BTS_3 ยอดกราฟฐานกว้างที่ตำแหน่งเลขคลื่น 182 cm⁻¹ คาดว่าน่าจะเป็นเฟสแบบออโรโรมบิกที่แฝงอยู่ในโครงสร้างแบบลูกบาศก์เทียม คล้ายกับรายงานการวิจัยของ Li et al. (2004) ที่พบยอดกราฟฐานกว้างที่เลขคลื่น 180 cm⁻¹ บ่งบอกถึงเฟสแบบออโรโรมบิกที่เป็นเฟสแฝงอยู่ในโครงสร้างแบบเพระโกนัล

6.2 การศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO₃

6.2.1 การขึ้นกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

จากผลการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO₃ ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 °C และในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง -20 °C ช่วง

อุณหภูมิ 30 ถึง 120 °C และในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200 °C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BTS_0 วัสดุเซรามิก BTS_2 และ วัสดุเซรามิก BTS_3 ที่ความถี่ต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยที่วัสดุเซรามิก BTS_2 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดคือมีค่าประมาณ 2,500 และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกมีค่าประมาณ 0.01 ถึง 0.20 และมีอุณหภูมิคูรีเท่ากับ 120 °C ส่วน วัสดุเซรามิก BTS_0 และ วัสดุเซรามิก BTS_3 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 2000 และ 1200 ตามลำดับ โดยค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าเท่ากันคือมีค่าประมาณ 0.02 ถึง 0.30 โดยที่มีอุณหภูมิคูรีเท่ากับ 130 °C และ 120 °C ตามลำดับ และพบว่าในทุกวัสดุเซรามิกที่ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง 20 °C ที่ทุกความถี่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกมีค่าอยู่ในช่วง 2,000 ถึง 12,000 และการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกค่าอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.7 จากพฤติกรรมที่ผิดปกติดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากเปลี่ยนเฟสของวัสดุเซรามิก จากอโรธโรมบิคเฟสไปเป็นเททรโกนัลเฟส จึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 0 °C ถึง 25 °C มีค่าสูง

6.2.2 การขึ้นกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

จากผลการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO₃ ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 °C และในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่น้อยมากตลอดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา เนื่องจากวัสดุเซรามิก BaTiO₃ เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงความถี่ประมาณ 10 GHz ดังนั้นในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ที่ทำการศึกษาจึงไม่พบการขึ้นกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BTS_0, BTS_2 และ BTS_3

6.2.3 ผลของขนาดเกรนต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO₃

จากผลการศึกษาผลของขนาดเกรนต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO₃ สรุปได้ว่าวัสดุเซรามิก BTS_0 วัสดุเซรามิก BTS_2 และ วัสดุเซรามิก BTS_3 มีขนาดเกรนเท่ากับ 0.39(+0.10), 0.47(+0.19) และ 0.63(±0.29) พิจารณาผลของขนาดเกรนวัสดุเซรามิก BTS_0 น่าจะเป็นวัสดุเซรามิกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดเนื่องจากมีขนาดเกรนเล็กที่สุด แต่จากผลการศึกษาพบว่าวัสดุเซรามิก BTS_2 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่สุดซึ่งอาจเป็นผลมาจากวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน และยังพบรูพรุนในวัสดุเซรามิก BTS_2 ในปริมาณที่น้อยกว่าเซรามิก BTS_0 และ วัสดุเซรามิก BTS_3 ดังนั้นวัสดุเซรามิก BTS_2 จึงน่าจะมีค่าความหนาแน่นของวัสดุสูงกว่าวัสดุเซรามิกอื่นจึงส่งผลให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดด้วย

6.3 การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุผง และ วัสดุเซรามิก Ba_{1-x}Fe_xTiO₃ (0 ≤ x ≤ 0.05) เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลาวันทางจะเซเท่ากับ 1:10

6.3.1 การศึกษาโครงสร้างของวัสดุผง Ba_{1-x}Fe_xTiO₃ (0 ≤ x ≤ 0.05) โดยเทคนิค XRD

จากการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบโดยเทคนิค XRD ของวัสดุผง Ba_{1-x}Fe_xTiO₃ (0 ≤ x ≤ 0.05) เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลาวันทางจะเซเท่ากับ 1:10 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยสามารถสรุปได้ว่า เมื่อ x = 0, 0.01, 0.03 และ 0.05 วัสดุผงที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีรูปแบบการ

เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผงทุกอุณหภูมิแคลไซน์สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS No. 89-2263) ซึ่งเป็นโครงสร้างของ BaTiO_3 ที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ และพบว่ามีเฟสปลอมปนของ TiO_2 ในวัสดุผงที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 900 °C แต่พบในปริมาณที่น้อยกว่าวัสดุผงที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C เจือไน $x = 0.02$ วัสดุผงที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C และ เจือไน $x = 0.04$ วัสดุผงที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 °C สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS No. 89-2263) ซึ่งเป็นโครงสร้างของ BaTiO_3 ที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ ส่วนเจือไน $x = 0.02$ วัสดุผงที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C และ เจือไน $x = 0.04$ วัสดุผงที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS No. 81-2203) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเทตระโกนัล เจือไน $x = 0.02$ และ 0.04 ทุกอุณหภูมิแคลไซน์ ยังตรวจพบการพบเฟสปลอมปนของ TiO_2 เช่นเดียวกับกรณีที่มี $x = 0.01, 0.03$ และ 0.05 ซึ่งเมื่อค่า x สูงขึ้นการตรวจพบเฟสปลอมปนของ มีแนวโน้มลดลงซึ่งอาจหมายถึงการเกิดผลึกที่สมบูรณ์ของ BaTiO_3 และไม่พบองค์ประกอบของสารละลายเจือไนทางจะเข้าในวัสดุผงที่เตรียมได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบโดยเทคนิค FTIR จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถคำนวณขนาดอนุภาคและค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของวัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) พบว่าขนาดอนุภาคของวัสดุผงทุกเจือไน x มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคไม่ขึ้นกับอุณหภูมิแคลไซน์ ซึ่งขนาดอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกันและมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของวัสดุผงทุกเจือไน x และทุกอุณหภูมิแคลไซน์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าแลตทิซพารามิเตอร์จากข้อมูลมาตรฐานของวัสดุผง BaTiO_3 (JCPDS No. 89-2263) ที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ และ (JCPDS No. 81-2203) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเทตระโกนัล

6.3.2 การศึกษาโครงสร้างของวัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยเทคนิค SEM

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของวัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยเทคนิค SEM สรุปได้ว่า วัสดุผงทุกเจือไน x ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C ตรวจพบความเข้มของปริมาณ TiO_2 และ $\text{Ba}(\text{CO}_3)$ น้อยที่สุด ดังนั้นจึงเลือกศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเฉพาะวัสดุผงที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C และพบว่าวัสดุผง BFP_0 มีการเกาะตัวกัน (agglomerate) ของอนุภาคขนาดเล็กและเกิดการหลอมเข้าหากันก่อนการเผาผนึก (pre-sintering) ทำให้เกิดเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ มีขนาดประมาณ 4 ไมโครเมตร ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับวัสดุผงที่เตรียมด้วยเจือไน $0.01 \leq x \leq 0.05$ โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของขนาดกลุ่มก้อนของอนุภาคเมื่อ x มากขึ้น ซึ่งอาจคาดได้ว่า Fe^{3+} ที่เจือเข้าไปน่าจะเข้าไปแทนที่ Ti^{4+} และแทรกอยู่ในโครงสร้างของ BaTiO_3 จึงทำให้อนุภาคผงขนาดเล็กมีการหลอมรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคขนาดใหญ่

6.3.3 การศึกษาโครงสร้างของวัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยเทคนิค XRD

หลังจากศึกษาการเกิดเฟสและโครงสร้างของวัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้โดยเจือไนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ของวัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) วัสดุเซรามิก BFS_0, BFS_1, BFS_2, BFS_3, BFS_4 และ BFS_5 วัสดุเซรามิกทั้งหมดผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100, 1200 และ 1300 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สรุปได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุเซรามิก BFS_1, BFS_2, BFS_3, BFS_4 และ BFS_5 สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (JCPDS No. 76-0738) ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกของ BaTiO_3 มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ส่วนวัสดุเซรามิก BFS_0 พบว่าไม่สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐานรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ BaTiO_3 ใดเลย สาเหตุอาจเนื่องมาจากวัสดุเซรามิก BFS_0 ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่ต่ำและไม่เหมาะสมจึงทำให้เกิดผลึกไม่สมบูรณ์ เพิ่มขึ้นการเกิดเฟสของ BaTiO_3 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลมีค่าสูงขึ้นด้วยมีค่าสูงขึ้นด้วยซึ่งสังเกตได้จากการตรวจพบระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุและพบว่าวัสดุเซรามิก BFS_5 ที่ตรวจพบระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มากกว่าวัสดุเซรามิกอื่น ซึ่งอาจคาดได้ว่าวัสดุเซรามิก BFS_5 มีความเป็นผลึกของ BaTiO_3 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่สมบูรณ์กว่าวัสดุเซรามิกอื่น และพบว่ายังคงมีเฟสปลอมปนของ TiO_2 แต่เฟสที่ตรวจพบเป็นเฟสรูไทล์ ซึ่งเกิดจาก Fe^{3+} ที่ต้องการเจือเข้าไปเพื่อให้แทนที่ Ba^{2+} นั้น Fe^{3+} ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ Ba^{2+} ได้เนื่องจาก Fe^{3+} มีรัศมีอะตอมใกล้เคียงกับ Ti^{4+} มากกว่า Ba^{2+} (รัศมีอะตอมของ Ba^{2+} , Fe^{3+} และ Ti^{4+} มีค่าเท่ากับ 2.53, 1.56 และ 1.76 Å ตามลำดับ) ดังนั้น Fe^{3+} จึงเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของ Ti^{4+} แทน ทำให้มี Ti^{4+} ส่วนเกินในปฏิกิริยาส่งผลให้ในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ตรวจพบเฟสปลอมปนของ TiO_2 วัสดุเซรามิก BFS_3 ตรวจพบเฟสปลอมปนในปริมาณความเข้มที่น้อยกว่าวัสดุเซรามิกอื่น ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของวัสดุเซรามิกทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากข้อมูลมาตรฐานของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ส่วนวัสดุเซรามิกทุกเงื่อนไขการเตรียมที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 °C และ 1300 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าหลังจากผ่านการเผาผนึกประมาณ 72 ชั่วโมง วัสดุเซรามิกทุกเงื่อนไขการเตรียมเกิดการแตกเป็นผงละเอียด ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ Fe^{4+} ที่เจือเข้าแทนที่ Ti^{4+} ทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจนเกิดขึ้นทำให้โครงสร้างภายในเกิดการขยายตัวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maso et al. (2006) ที่พบการออกซิเดชันของ Fe^{3+} ไปเป็น Fe^{4+} แต่กลุ่มวิจัยของ Maso et al. (2006) ไม่ได้รายงานการแตกเป็นผงละเอียดของวัสดุเซรามิกที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 °C

6.3.4 การศึกษาลักษณะพื้นฐานวัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยเทคนิค SEM

จากการผลศึกษาลักษณะของพื้นผิวของวัสดุเซรามิก BFS_0 ศึกษาพบว่าพื้นผิวมีการเกิดเกรนอย่างสมบูรณ์เกรนมีลักษณะรูปร่างคล้ายกัน และขนาดของเกรนแต่ละเกรนมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 2.31 ± 0.89 ไมโครเมตร และเกรนบางเกรนที่อยู่ติดกันมีการหลอมของเกรน จากการผลการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของวัสดุเซรามิก BFS_1 พบว่าพื้นผิวมีการเกิดเกรนอย่างสมบูรณ์เกรนมีลักษณะค่อนข้างกลมโดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 0.92 ± 0.24 ไมโครเมตร ตรวจพบรูพรุนแบบเปิด ในโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเซรามิก BFS_1 ซึ่งมีสาเหตุมาจากวัสดุเซรามิก BFS_1 มีความหนาแน่นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเชิงทฤษฎี คือมีความหนาแน่นประมาณ 48.55% จากผลการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของวัสดุเซรามิก BFS_2 พบว่าพื้นผิวของวัสดุเซรามิกเกิดการหลอมตัวของเกรนโดยที่ขนาดเกรนของมีค่าน้อยกว่า 0.2 ไมโครเมตร และยังพบรูพรุนแบบเปิด ในโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเซรามิกเช่นเดียวกับวัสดุเซรามิก BFS_1 ส่วนลักษณะของพื้นผิวของวัสดุเซรามิก BFS_2, BFS_4 และ BFS_5 นั้นเกิดการหลอมตัวของเกรนโดยที่ขนาดเกรนของวัสดุเซรามิกทั้งสองมีค่าน้อยกว่า 0.2 ไมโครเมตร สำหรับการหลอมตัวของเกรนที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุเนื่องจากวัสดุผง BFP_2, BFP_4 และ BFP_5 ที่ใช้สังเคราะห์เป็นวัสดุเซรามิก BFS_2, BFS_4 และ BFS_5 มีการรวมตัวกันก่อนเผาผนึก ดังนั้นเมื่อทำการเผาผนึกจึงทำให้เกิดการหลอมตัวของเกรน และยังตรวจพบรูพรุนแบบเปิดเช่นเดียวกับที่พบในวัสดุเซรามิกอื่น สำหรับรูพรุนที่พบในวัสดุเซรามิกทั้งสอง มีสาเหตุมาจากวัสดุเซรามิก BFP_2, BFS_4 และ BFS_5 มีความหนาแน่นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเชิง

ทฤษฎีคือมีค่าประมาณ 46.10, 46.32 และ 46.71% ตามลำดับ และจากผลการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของวัสดุเซรามิก BFS_3 พบว่าพื้นผิวมีการเกิดเกรนอย่างสมบูรณ์ เกรนมีลักษณะค่อนข้างกลม ลักษณะของเกรนที่พบมีสองลักษณะคือเกรนขนาดเล็ก และเกรนที่มีการเติบโตของเกรนที่ผิดปกติ เนื่องจากเกิดการหลอมตัวของเกรนทำให้เกรนบางส่วนมีขนาดใหญ่มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 1.20 ± 0.35 ไมโครเมตรมีความหนาแน่นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเชิงทฤษฎีคือมีความหนาแน่นประมาณ 49.09%

6.4 การศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

6.4.1 การขึ้นกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

การขึ้นกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของ วัสดุเซรามิก BFS_0, BFS_1, BFS_2, BFS_3, BFS_4 และ BFS_5 ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 200 °C ที่ความถี่ 100 kHz มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิคูรีแสดงในตารางที่ 5.8 และค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 1 เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิคูรีที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิคูรีที่มีค่าต่ำ ซึ่งสาเหตุการมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิคูรีที่ต่ำกว่าอาจเนื่องมาจาก วัสดุเซรามิกทั้งหมดที่เตรียมได้ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 1100 °C นั้นอาจทำให้วัสดุเซรามิกมีการเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่ไม่สมบูรณ์ มีความหนาแน่นต่ำ อีกทั้งมีการตรวจพบเฟสปลอมปนของสารอื่น

6.4.2 การขึ้นกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

การขึ้นกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของ วัสดุเซรามิก BFS_0, BFS_1, BFS_2, BFS_3, BFS_4 และ BFS_5 พบว่าวัสดุเซรามิกทุกเงื่อนไขมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกทุกเงื่อนไขที่ทำการศึกษาในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ที่ช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 °C พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงและค่อยๆ และคงที่เมื่อความถี่สูงกว่า 100 kHz ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่น้อยมากตลอดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา อาจเนื่องมาจากการเจือ Fe^{3+} เข้าไปในโครงสร้างของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 ในปริมาณที่น้อย จึงทำให้วัสดุเซรามิกที่เตรียมได้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกไม่ขึ้นกับความถี่ เนื่องจากวัสดุเซรามิก BaTiO_3 เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงความถี่ประมาณ 10 GHz ดังนั้นในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่เพียงเล็กน้อย และพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BFS_4 มีค่าสูงที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุเซรามิก BFS_4 พบว่ามีความเป็นผลึกของ BaTiO_3 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่ค่อนข้างสมบูรณ์ อาจส่งผลให้วัสดุเซรามิก BFS_4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุเซรามิกอื่น

6.4.3 ผลของขนาดเกรนต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

จากการขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BFS_0, BFS_1, BFS_2, BFS_3, BFS_4 และ BFS_5 ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C ที่ความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz พบว่าวัสดุเซรามิก BFS_4 และ BFS_5 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกันและสูงกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกอื่นคือมีค่าประมาณ 6000 และ 5700 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุของการมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงของวัสดุเซรามิกนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาด

เกรนของวัสดุเซรามิก ส่วนวัสดุเซรามิก BFS_2, BFS_4 และ BFS_5 มีขนาดของเกรนเล็กกว่าวัสดุเซรามิกอื่น คือมีขนาดน้อยกว่า 200 นาโนเมตรซึ่งวัสดุเซรามิกที่มีขนาดเกรนเล็กอาจเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง เนื่องจากวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็กนั้นทำให้ความเค้นที่อยู่ภายในเกรนของวัสดุเซรามิกลดลงเนื่องจากผนังโดเมน 90° ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก แต่เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของวัสดุเซรามิก พบว่าวัสดุเซรามิก BFS_2, BFS_4 และ BFS_5 มีความหนาแน่นมีค่า 46.42, 46.96 และ 47.51% ตามลำดับ และสูงกว่าวัสดุเซรามิกอื่น ประกอบกับการพิจารณาจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุเซรามิกพบว่าวัสดุเซรามิก BFS_4 และ BFS_5 มีความเป็นผลึกของ BaTiO_3 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่สมบูรณ์กว่าทุกวัสดุเซรามิกที่เตรียมได้ จึงน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้วัสดุเซรามิก BFS_4 และ BFS_5 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุเซรามิกอื่น

6.4.4 ผลของความเค้นต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงของการเพิ่มความเค้นที่ความเค้นต่างๆ เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกขณะที่วัสดุเซรามิกไม่ได้รับความเค้น พบว่าวัสดุเซรามิกทุกเงื่อนไขการเตรียมมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงความเค้น 0 ถึง 7.5 MPa ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนี้อาจเกิดจากความเค้นที่เข้าไปมีผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของไดโพลไฟฟ้าภายในโครงสร้างมากขึ้น หรือเกิดการโพลาไรเซชันภายในโครงสร้างทางจุลภาค อีกทั้งความเค้นที่เข้าไปยังทำให้ผนังโดเมนเกิดการเคลื่อนที่ จึงส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นถึง 12.5 MPa ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะค่อนข้างคงที่ ซึ่งการที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าคงที่นั้นอาจเกิดจากการให้ความเค้นที่ไม่เกิน 12.5 MPa นั้นไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายในของวัสดุเซรามิก เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกวัสดุเซรามิก พบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกทุกวัสดุเซรามิกมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเค้นมีค่ามากขึ้นยกเว้นวัสดุเซรามิก BFS_0 และ BFS_1 ที่มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมนก็เป็นได้

6.5 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป

การเจือ Fe เข้าไปในโครงสร้างของ BaTiO_3 และทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C มีผลทำให้อุณหภูมิคูรีของวัสดุเซรามิกมีค่าลดลงและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่วัดได้มีค่าต่ำมาก ซึ่งคาดว่าอาจเกิดเนื่องจากการพบเฟสเจือปนของ TiO_2 ไทล์ ซึ่งเกิดจาก Fe^{3+} ที่ต้องการเจือเข้าไปเพื่อให้แทนที่ Ba^{2+} นั้น Fe^{3+} ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ Ba^{2+} ได้เนื่องจาก Fe^{3+} มีรัศมีอะตอมใกล้เคียงกับ Ti^{4+} มากกว่า Ba^{2+} ดังนั้น Fe^{3+} จึงเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของ Ti^{4+} ทำให้มี Ti^{4+} ส่วนเกินในปฏิกิริยาส่งผลให้ตรวจพบเฟสปลอมปนของ TiO_2 ในโครงสร้างผลึกของ BaTiO_3 ดังนั้นงานวิจัยที่ควรทำต่อไป คือ เจือ Fe^{3+} เข้าไปแทนที่ Ti^{4+} เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก ควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก เช่น ควบคุมขั้นตอนกระบวนการเตรียมวัสดุผง ควบคุมขั้นตอนกระบวนการเผาผนึกวัสดุเซรามิก เป็นต้น และทำการศึกษารูปร่างทางจุลภาคด้วยเทคนิค TEM และเทคนิค EXAPS เพื่อตรวจสอบตำแหน่งของ Fe ที่ถูกเจือเข้าไปในโครงสร้างของ BaTiO_3 และงานวิจัยที่ควรทำต่อไป คือ การศึกษาพฤติกรรมและสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 ที่เจือด้วย Fe เนื่องจากวัสดุเซรามิก BaTiO_3 เป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดีเยี่ยม