

บทที่ 4

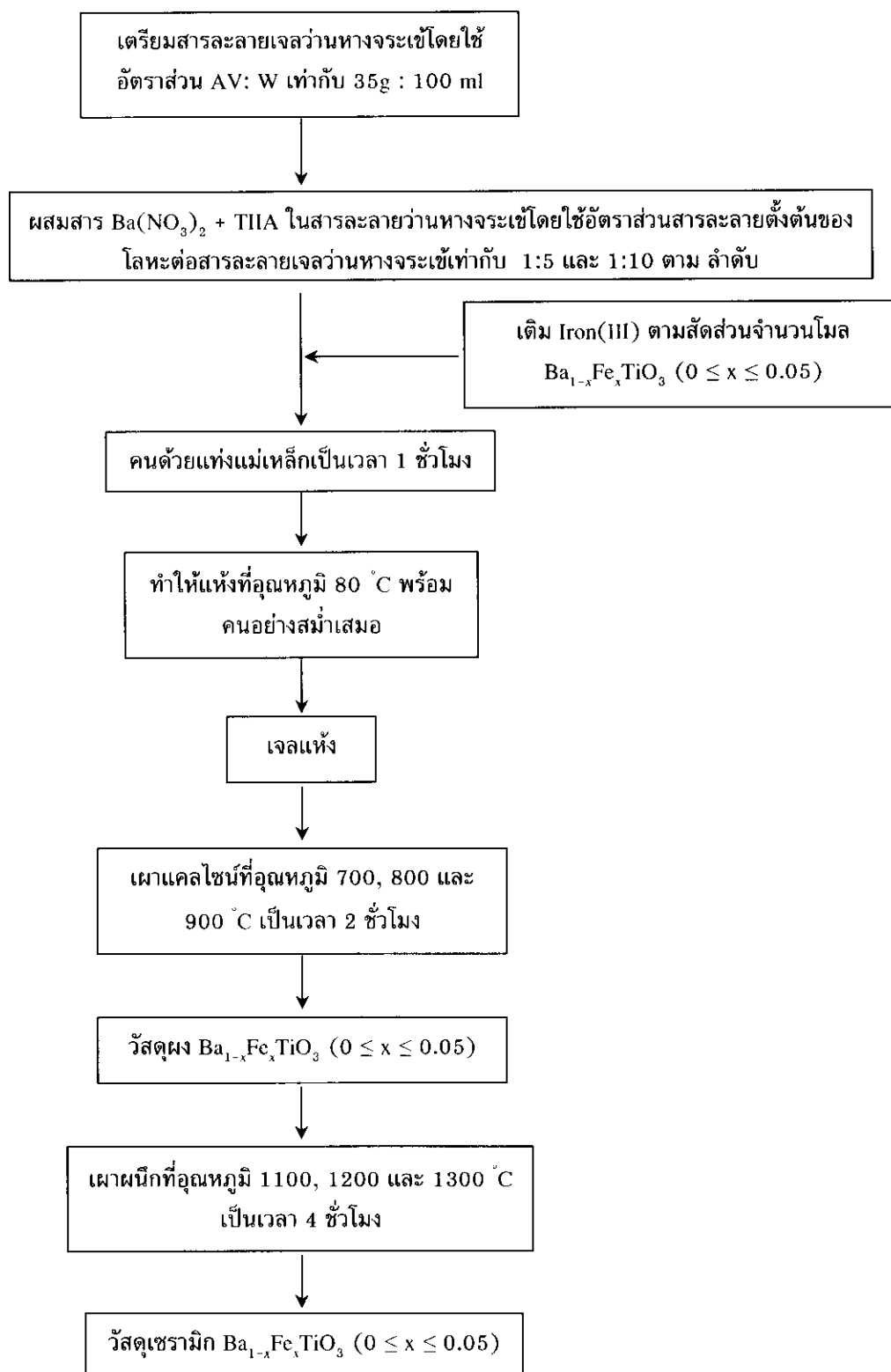
วิธีการวิจัย

วิธีการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 และ วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) มุ่งเน้นไปที่วิธีเตรียมแบบใหม่โดยใช้สารสกัดจากว่านหางจระเข้เป็นตัวทำละลายโดยใช้อัตราส่วนสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:5 และ 1:10 และทำการศึกษาสมบัติของวัสดุผงที่สังเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคต่างๆดังนี้ เทคนิค thermogravimetric/differential thermal analysis (TG/DTA), เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) เทคนิคการหาขนาดอนุภาคจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, เทคนิคการหาผลึกซ์พารามิเตอร์จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, เทคนิค Fourier transform infrared (FTIR), เทคนิคการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM) และ เทคนิคการกระเจิงรามาน (Raman scattering) สำหรับการขึ้นรูปวัสดุผงทำการอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดแบบทิศทางเดียว (uniaxial press) และทำการเผาผนึกแบบไร้แรงดัน (pressureless sintering) วัสดุเซรามิกที่เตรียมได้ประกอบด้วย วัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$) วัสดุเซรามิกที่เตรียมได้ถูกนำมาศึกษาพฤติกรรมการเผาผนึกโดยใช้เทคนิค XRD เพื่อศึกษาการเกิดเฟสของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ และศึกษาด้วยลักษณะพื้นผิวโดยเทคนิคการถ่ายภาพ SEM ซึ่งสามารถหาขนาดเกรนของวัสดุเซรามิกได้ สำหรับการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกได้ศึกษาโดยใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า HP-4194A impedance analyzer ศึกษาในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200°C และในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ขั้นตอนสุดท้ายของโครงการวิจัยเป็นการศึกษาผลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ศึกษาในช่วงความเค้น 0 ถึง 12 MPa และในช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz สำหรับขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุผง การขึ้นรูปและการสังเคราะห์วัสดุเซรามิก ตลอดจนเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 และ $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยใช้สารละลายเจลว่านหางจระเข้เป็นตัวทำละลาย

การสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 โดยใช้ว่านหางจระเข้เป็นตัวทำละลาย สารเคมีที่ใช้ ประกอบด้วย $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (99% Carlo Erba, Fw = 261.35) และ Titanium diisopropoxide bis (2, 4-pentane dionate), 75 wt.% in 2-propanol, Mw = 364.30, $\text{C}_{16}\text{H}_{28}\text{O}_6\text{Ti}$, (Acros Organics), (THIA) เริ่มต้นด้วยผสมสารละลายตั้งต้นของโลหะไนเตรดและสารละลายเจลว่านหางจระเข้(โดยวิธีการเตรียมสารละลายเจลว่านหางจระเข้แสดงในภาคผนวก ก.) โดยใช้อัตราส่วนสารละลายตั้งต้นของโลหะไนเตรดต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:5 ซึ่งสารตั้งต้นตามสัดส่วนโมล โดยใช้อัตราส่วนโดยโมล ของ Ba : Ti เท่ากับ 1:1 จากนั้นนำสารละลายโลหะไนเตรดกับสารละลายว่านหางจระเข้พร้อมกับคนด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หมุนคนจนสารละลายทั้งสองเข้ากัน หลังจากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ไปทำให้แห้งบน hot plate โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 80°C ใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์สารละลายตั้งต้นจะแห้งกลายเป็นเจลแห้งหรือวัสดุผงตั้งต้น (precursor) แล้วนำวัสดุผงตั้งต้นที่เตรียมได้ไปทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 , 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้วัสดุผงเกิดเป็นสารประกอบ BaTiO_3 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์วัสดุ

ผง BaTiO_3 แสดงในภาพที่ 4.1 ส่วนการสังเคราะห์วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยใช้วิธีทางจระเข้เป็นตัวทำละลาย สารเคมีที่ใช้ ประกอบด้วย $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (99% Carlo Erba, Fw = 261.35), Iron(III) nitrate 9- hydrate, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (AnalaR) Fw = 404, (Iron(III)) และ Titanium diisopropoxide bis (2, 4-pentane dionate), 75 wt.% in 2-propanol, Mw = 364.30, $\text{C}_{16}\text{H}_{28}\text{O}_6\text{Ti}$, (Acros Organics), (THIA) เริ่มต้นด้วยเตรียมสารละลายเจลาวันทางจระเข้โดยใช้อัตราส่วนของเจลาวันทางจระเข้ต่อน้ำเท่ากับ 35g : 100 ml และใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลาวันทางจระเข้เท่ากับ 1:10 ซึ่งสารตั้งต้นตามสัดส่วนโมล $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($x = 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$) จากนั้นนำสารละลายตั้งต้นของโลหะผสมลงไปในสารละลายเจลาวันทางจระเข้พร้อมกับคนด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) หมุนคนจนละลายสารทั้งหมดเข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ไปทำให้แห้งบน hot plate โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 80°C ใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์สารละลายตั้งต้นจะแห้งกลายเป็นเจลแห้งหรือวัสดุผงตั้งต้น(precursor) แล้วนำวัสดุผงวัสดุผงตั้งต้นที่เตรียมได้ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้วัสดุผงเกิดเป็นสารประกอบ $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) แผนภาพแสดงการสังเคราะห์วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) แสดงในภาพที่ 4.1 ส่วนเงื่อนไขการเตรียมวัสดุผงและวัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) แสดงได้ในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



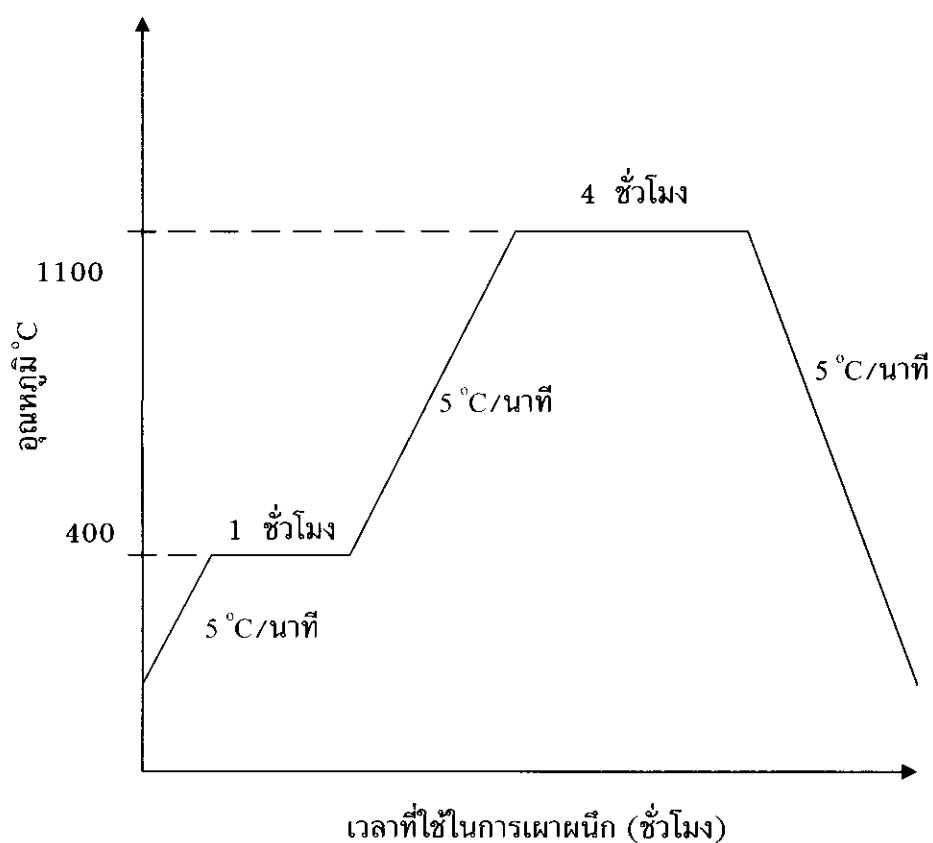
ภาพที่ 4.1 แผนภาพการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 และ $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) เตรียมแบบใหม่
โดยใช้อัตราส่วนสารละลายตั้งต้นของโลหะในเตรตต่อสารละลายเจลาวันทางจระเข้เท่ากับ 1:5
และ 1:10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการเตรียมวัสดุผงทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

วัสดุผง	สัญลักษณ์	อัตราส่วนสารละลายตั้งต้นของโลหะในเตา ต่อสารละลายเจลาวันทางจระเข้	อุณหภูมิในการแคล ไซน์ (°C)	เวลาในการแคล ไซน์ (ชั่วโมง)
BaTiO ₃ ที่ซื้อ	BTP_0	-	-	-
BaTiO ₃	BTP_1	1:5	700	2
BaTiO ₃	BTP_2	1:5	800	2
BaTiO ₃	BTP_3	1:5	900	2
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0)	BFP_0	1:10	700	2
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.01)	BFP_1	1:10	700	2
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.02)	BFP_2	1:10	700	2
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.03)	BFP_3	1:10	700	2
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.04)	BFP_4	1:10	700	2
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.05)	BFP_5	1:10	700	2

4.2 การเตรียมวัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

วัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) สามารถเตรียมได้โดยเริ่มต้นจากนำวัสดุผงที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ มาอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแบบแผ่นจานกลม (disk) โดยใช้เครื่องอัดแบบทิศทางเดียว (uniaxial stress) ที่ความดัน 400 MPa ในอากาศ โดยใช้เข้าอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร อัดนาน 15 นาที ภายหลังการอัดจะได้เม็ดของสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร หนาประมาณ 1.0–1.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำเม็ดสารไปเผาผนึก (sintering) โดยใช้วิธีการเผาผนึกแบบไร้แรงดันที่อุณหภูมิ 1100, 1200 และ 1300 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในอากาศ อัตราการเพิ่มและลดลงของอุณหภูมิคือ 5 °C/นาที โดยมีแผนภาพแสดงการเผาผนึกดังภาพที่ 4.2 และเงื่อนไขการเตรียมวัสดุเซรามิกทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึก

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการเตรียมวัสดุเซรามิกทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

วัสดุเซรามิก	สัญลักษณ์	อัตราส่วนสารละลายตั้งต้นของโลหะไนเตรด ต่อสารละลายเจลาวันทางจระเข้	อุณหภูมิในการเผา ผนึก(°C)	เวลาในการเผา ผนึก (ชั่วโมง)
BaTiO ₃ ที่ซื้อ	BTS_0	-	1100	4
BaTiO ₃	BTS_1	1:5	1100	4
BaTiO ₃	BTS_2	1:5	1100	4
BaTiO ₃	BTS_3	1:5	1100	4
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0)	BFS_0	1:10	1100	4
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.01)	BFS_1	1:10	1100	4
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.02)	BFS_2	1:10	1100	4
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.03)	BFS_3	1:10	1100	4
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.04)	BFS_4	1:10	1100	4
Ba _{1-x} Fe _x TiO ₃ (x = 0.05)	BFS_5	1:10	1100	4

4.3 การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุผง BaTiO_3 , วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$), วัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

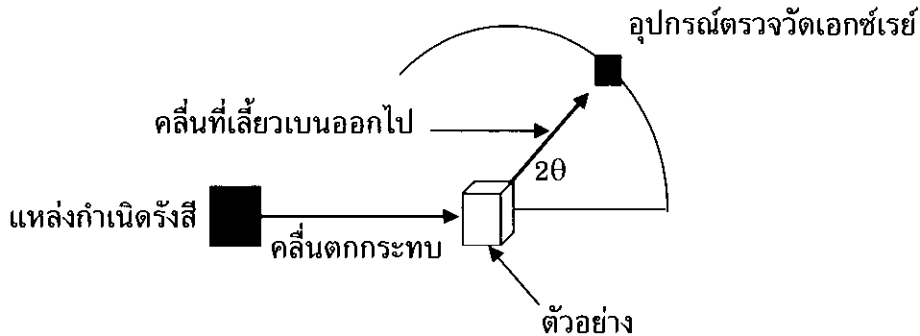
เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของ วัสดุผง BaTiO_3 , วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) วัสดุเซรามิก BaTiO_3 และวัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เทคนิค TG/DTA, เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD), เทคนิคการหาขนาดอนุภาคจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, เทคนิคการหาแลตทิซพารามิเตอร์จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, เทคนิค FTIR, เทคนิคการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ เทคนิคการถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 เทคนิค thermogravimetric/differential thermal analysis (TG/DTA)

เทคนิค TG/DTA ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุผงที่เตรียมโดยวิธีการทางเคมี เพื่อประมาณอุณหภูมิในการแคลไซน์วัสดุผงเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีโครงสร้างและองค์ประกอบตามที่ต้องการ การวิเคราะห์ประกอบด้วยสองเทคนิค คือ เทคนิค TGA เป็นเทคนิคที่ใช้ ศึกษาและตรวจสอบปริมาณการเปลี่ยนแปลงมวลของสารที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิหรือฟังก์ชันของเวลาที่เปลี่ยนแปลง เทคนิคที่สอง คือ เทคนิค DTA เป็นเทคนิคที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารซึ่งอยู่ในรูปของการดูดความร้อนหรือคายความร้อนของสารตัวอย่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค TG/DTA ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุผง BaTiO_3 และ วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายว่านทางจะเข้เป็นตัวทำละลาย เพื่อประมาณอุณหภูมิการแคลไซน์วัสดุผง ในการทดลองได้วัด TG และ DTA ไปพร้อมๆ กัน โดยทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 50 จนถึง 1000 °C ในอากาศ อัตราการเพิ่มและอัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 15 °C / นาที สารอ้างอิงที่ใช้คือ อัลฟาอลูมินา ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งเป็นสารที่เสถียรต่อความร้อนจึงไม่มีการสูญเสียมวลของสารและไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิของการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Pyris Diamond TG/DTA (Perkin Elmer Instrument, USA) ตั้งอยู่ ณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

4.3.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์เพื่อศึกษาเฟสของโครงสร้างผลึก (crystal phase identification) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ ซึ่งเกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วแคโทดทำให้อิเล็กตรอนจับกันหนาแน่น แล้วเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดเพื่อเร่งให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้าที่ขั้วแอโนด เป็นผลให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาชนกับวัสดุตัวอย่าง ส่วนรังสีที่เลี้ยวเบนจากสารจะถูกตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจวัดรังสี (detector) เทคนิคนี้ใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบบตัวอย่าง โดยอาศัยกฎของแบรกก์ที่กล่าวว่า สามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบบ โดยที่รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุแต่ละชนิดนั้นจะมีความเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุนั้นๆ โดยมีมุมตกกระทบบเท่ากับมุมสะท้อนคลื่นที่สะท้อนจากระนาบจะแทรกสอดกัน ในเทคนิคนี้ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ (X-ray detector) จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ลักษณะการจัดวางตัวอย่าง เมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และอุปกรณ์ตรวจวัด

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X-ray diffractometer ตั้งอยู่ ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผลิตโดยบริษัท Bruker ประเทศเยอรมันนี รุ่น D8 advance และใช้เป้าทองแดง ($\text{Cu K}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและเป้าทองแดงในการกำเนิดรังสีเอกซ์เท่ากับ 40 kV และใช้กระแสเท่ากับ 40 mA โดยวัดมุม 2θ ตั้งแต่ 20 องศา ถึง 90 องศา ความละเอียดในการวัดรังสีเอกซ์ของการหมุนวัสดุตัวอย่างคือ θ เท่ากับ 0.05 องศา การตรวจสอบวัสดุตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมของแบรกก์ 2θ หลังจากนั้นสามารถนำกราฟที่ได้มาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบ d_{hkl} ของแต่ละยอดกราฟฐานกว้าง ที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ โดยเมื่อทราบความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดลองคือ λ เท่ากับ 1.5406 $\text{\AA}$ ดังนั้นจากกฎของแบรกก์สามารถหาค่า d_{hkl} ได้ดังสมการที่ (4.1)

$$d_{hkl} = \frac{1.5406}{2 \sin \theta} \text{ (\AA)} \quad (4.1)$$

เมื่อคำนวณหาค่า d_{hkl} ของทุกยอดกราฟฐานกว้างได้แล้ว นำค่า d_{hkl} ที่คำนวณได้จากการทดลองไปเทียบกับฐานข้อมูลจาก Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS Card) ของสารประกอบหรือของธาตุแต่ละธาตุ

นอกจากนี้เทคนิค XRD ยังสามารถใช้คำนวณหาขนาดอนุภาค (particle size) และความเครียด (strain) ของอนุภาคโดยอาศัยความกว้างของพีคและใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) ในการคำนวณ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.2)

$$B_{\text{crystallite}} = \frac{K\lambda}{L \cos \theta} \quad (4.2)$$

โดยที่ $B_{\text{crystallite}}$ คือ full width at half maximum (FWHM) เนื่องจากขนาดของผลึก

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดลอง คือมีค่าเท่ากับ 0.15406 nm

L คือ ขนาดอนุภาค (nm)

θ คือ มุมที่รังสีเอกซ์ทำกับระนาบ hkl ของอะตอมในผลึก

K คือ ค่าคงที่ ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเมล็ดผลึก ในทางทฤษฎีพิสูจน์ได้ว่า $0.89 \leq k \leq 1.39$ แต่ในทางปฏิบัติอาจใช้ค่าประมาณ $k \sim 1$ (Suryanarayana and Grant Norton, 1998)

ความกว้างของยอดกราฟยังมีผลมาจากความเครียดของอนุภาค ซึ่งหาได้จาก

$$B_{\text{strain}} = \eta \tan \theta \quad (4.3)$$

โดยที่ B_{strain} คือ FWHM เนื่องจากความเครียดของผลึก (radian)

η คือ ความเครียดของอนุภาค

ความกว้างของยอดกราฟฐานกว้างที่เกิดขึ้นเป็นผลจากขนาดอนุภาคและความเครียดของอนุภาค ในการทดลองได้ใช้ผลต่างของค่า FWHM เนื่องจากวัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) ที่ผ่านการเผาผนึก (ใช้เป็นตัวอย่าง) และ วัสดุผง BaTiO_3 ที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C และ วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังนั้น จะได้ว่า $B_r = B_{\text{crystalline}} + B_{\text{strain}}$ จากสมการที่ (4.2) และ (4.3) จะได้

$$B_r = \frac{k\lambda}{L \cos \theta} + \eta \tan \theta \quad (4.4)$$

โดยที่ B_r คือ ผลต่างของค่า FWHM ของวัสดุอ้างอิงและวัสดุจากการทดลอง (radian) ซึ่งหาได้จาก

$$B_r = \sqrt{B_o^2 - B_i^2} \quad (4.5)$$

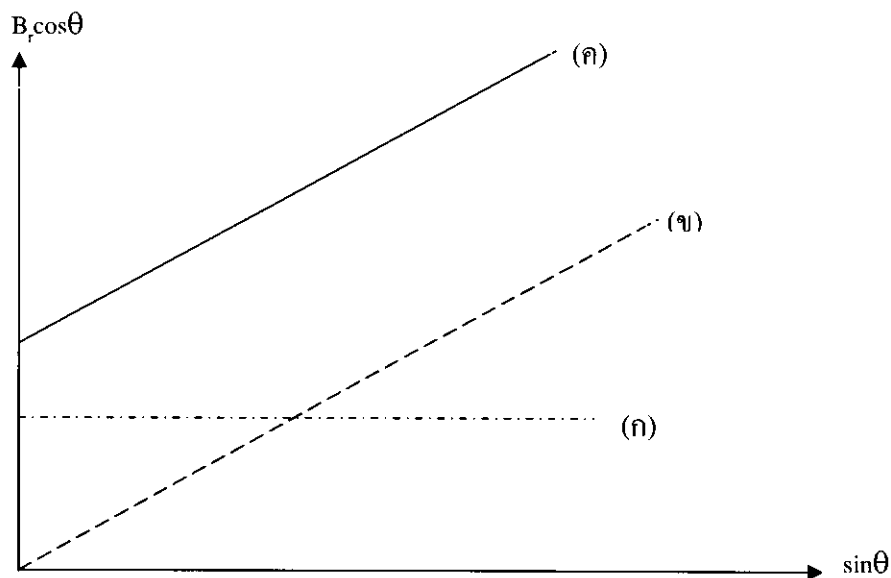
โดยที่ B_o คือ FWHM ของวัสดุจากการทดลอง (radian)

B_i คือ FWHM ของวัสดุอ้างอิง (radian)

จากสมการที่ (4.4) จะได้ว่า

$$B_r \cos \theta = \frac{k\lambda}{L} + \eta \sin \theta \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.6) นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $B_r \cos \theta$ กับ $\sin \theta$ จะได้ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $B_r \cos \theta$ และ $\sin \theta$ ที่แสดงกรณีต่างๆ ที่ทำให้ยอดกราฟมีความกว้างเพิ่มขึ้น (ก) การขยายความกว้างของยอดกราฟเป็นผลมาจากขนาดอนุภาค (ข) การขยายความกว้างของยอดกราฟเป็นผลมาจากความเครียด (ค) การขยายความกว้างของยอดกราฟเป็นผลจากขนาดอนุภาคและความเครียด

เทคนิค XRD สามารถใช้คำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameter) สำหรับโครงสร้างแบบลูกบาศก์ (cubic) และ โครงสร้างแบบเทตระโกนัล (tetragonal) โดยอาศัย d_{hkl} และระนาบการเลี้ยวเบน (hkl) ในการคำนวณ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.7) และ สมการที่ (4.8) ตามลำดับ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.8)$$

โดยที่ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
 hkl คือ ระนาบการเลี้ยวเบน
 a, c คือ แลตทิซพารามิเตอร์

4.3.3 เทคนิค Fourier transform infrared (FTIR)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางโครงสร้างและองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ของวัสดุแต่ละชนิด โดยอาศัยหลักการส่งผ่านแสงในย่านอินฟราเรดของพันธะเคมี เทคนิคนี้สามารถสังเกตความถี่ของหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่มีผลต่อการสั่นของพันธะเคมีแต่ละชนิดทำให้สามารถจำแนกชนิดของหมู่ฟังก์ชันในองค์ประกอบของสารได้โดยกราฟที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการส่งผ่าน (%T) กับเลขคลื่น (wavenumber, cm^{-1}) โดยที่ %T คือร้อยละของความเข้มของรังสีจากต้นกำเนิดแสงที่สามารถผ่านสารตัวอย่าง ดังสมการที่ 4.9

$$\%T = \frac{A}{B} \times 100 \quad (4.9)$$

โดยที่ A คือ ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง FTIR ตั้งอยู่ ณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer instruments รุ่น spectrum one FT-IR spectrometer Serial No. 60036 ทำการวัดสเปกตรัมในช่วง $370 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ และเตรียมตัวอย่างโดยใช้เทคนิคโปรแตส เชียมโบรไมน์ (KBr pellet technique) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารตัวอย่างกับ โปรแตสเชียมโบรไมน์เท่ากับ 1 ต่อ 10

4.3.4 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope, n.d.)

การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) มีหลักการทำงานของเครื่องโดยทั่วไปคือ อิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นโดยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสทำให้มีความเข้มเพิ่มขึ้นและใช้ Condenser Lens บีบลำอิเล็กตรอนให้เส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะทำให้ลำอิเล็กตรอนถูกโฟกัสให้ตกลงบนผิวตัวอย่างโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ซึ่งลำอิเล็กตรอนที่ตกลงบนผิวของสารตัวอย่างจะเป็นจุดที่เล็กมาก สแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของวัสดุตัวอย่างและเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบวัสดุตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของวัสดุตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งถูกนำไปขยายและแปลงสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอซีอาร์ที (CRT) โดยสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกได้บนฟิล์ม สัญญาณชนิดนี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI) ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของวัสดุตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของวัสดุตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่นูน

การเตรียมวัสดุสำหรับการศึกษาด้วย SEM เตรียมโดยการเคลือบทองลงบนผิวของวัสดุเพื่อให้วัสดุสามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งเครื่องเคลือบทอง (sputter coater) ตั้งอยู่ ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผลิตโดยบริษัท FISONS รุ่น POLARON SC500 โดยใช้กระแส 30 mA เวลาที่ใช้เคลือบนาน 3 นาที และในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง SEM ตั้งอยู่ที่ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผลิตโดยบริษัท LEO ประเทศอังกฤษ รุ่น 1450VP

4.3.5 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

(Transmission Electron Microscope, n.d.)

การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องผ่านสามารถสร้างภาพได้โดยอาศัย selected area electron diffraction (SAED) ซึ่งอยู่ระหว่างชิ้นงานที่มีลักษณะบาง และเลนส์โปรเจคเตอร์ ลำอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ส่วนใหญ่จะทะลุผ่านชิ้นงานโดยที่ไม่ได้เกิดการกระเจิง และมีลำอิเล็กตรอนบางส่วนที่สูญเสียพลังงานเนื่องจากการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น แต่จะไม่มี การเปลี่ยนเส้นทางภาพที่สร้างจากอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานโดยไม่เปลี่ยนทิศทาง และสามารถตรวจจับสัญญาณปรากฏบนจอภาพหรือแผ่นฟิล์ม

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ TEM ตั้งอยู่ ณ University of Arizona, USA ผลิตโดยบริษัท Hitachi รุ่น H8100 ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนในเครื่อง TEM เท่ากับ 200 kV

4.3.6 เทคนิคการกระเจิงรามาน

เทคนิคการกระเจิงรามาน (Raman scattering) ใช้ในการกำหนดโครงสร้างโมเลกุลและองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งอาศัยความเข้มแสงความถี่เดียวตกกระทบผิววัสดุและเกิดการกระเจิงด้วยความถี่ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับความถี่ของแสงเริ่มต้น ดังนั้นการกระเจิงรามานจะบอกคุณลักษณะของความถี่ของ functional group ที่เปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามความถี่บางความถี่ไม่สามารถสังเกตได้ในการกระเจิงรามานแต่สามารถสังเกตได้ในช่วงความถี่ของ IR ในการทดลองนี้ใช้เครื่องรามานที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นผลิตโดยบริษัท JOBIN YVON โดยมีสเปกโตรมิเตอร์รุ่น T6400 มีแหล่งกำเนิดเลเซอร์เป็นอาร์กอนเลเซอร์ (Ar-ion Laser) ความยาวคลื่น 514.5 nm (สีเขียว) มีขนาดลำเลเซอร์เท่ากับ 1–2 μm ในการทดลองใช้กำลังเลเซอร์เท่ากับ 30 mW ทำการวัดสเปกตรัมที่อุณหภูมิห้อง (room temperature) โดยใช้ single mode ช่วงสเปกตรัมที่วัดอยู่ในช่วง 100–100 cm^{-1} วัดสเปกตรัมซ้ำ 2 ครั้ง แต่ละครั้งใช้เวลา 30 วินาที

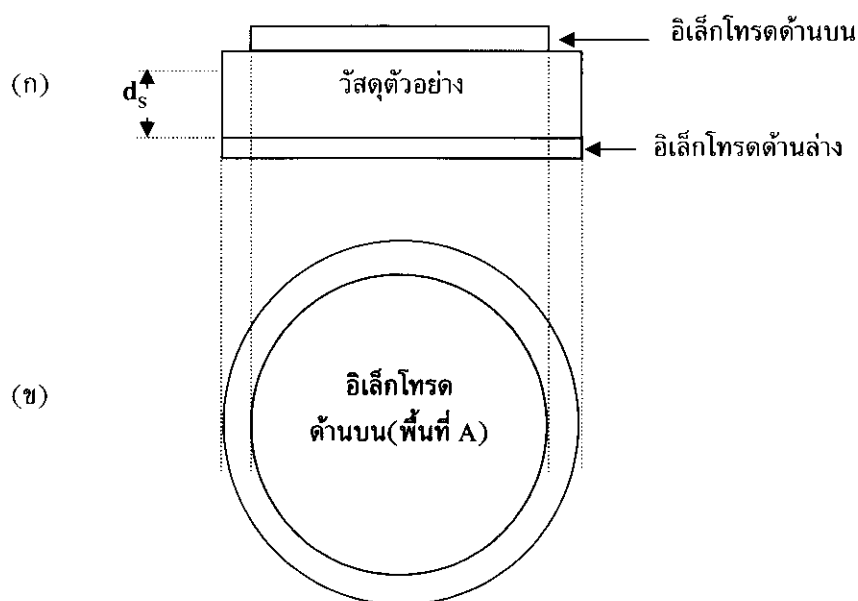
4.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความถี่ต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก

BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

วัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่ผ่านการศึกษาคโครงสร้างและคุณลักษณะพื้นฐานแล้ว ได้ถูกนำมาศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริก โดยเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิและความถี่ต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาในช่วงของอุณหภูมิ -50 ถึง 200°C และช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz และใช้ความต่างศักย์ของการสั่น 1 โวลต์ สำหรับขั้นตอนการเตรียมวัสดุตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก ระบบและหลักการทำงานของเครื่อง และขั้นตอนการวัด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 การเตรียมวัสดุตัวอย่างสำหรับทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก

การเตรียมวัสดุตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) เริ่มต้นด้วยการขัดผิวหน้าของวัสดุตัวอย่างทั้งสองด้านและผิวด้านข้างของวัสดุเซรามิกให้เรียบและมีความหนาสม่ำเสมอด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 และใช้น้ำเป็นตัวกลางในการช่วยขัดผิววัสดุตัวอย่างหลังจากวัสดุตัวอย่างมีพื้นผิวด้านข้างและด้านหน้าเรียบสม่ำเสมอแล้ว ล้างวัสดุตัวอย่างด้วยน้ำเพื่อกำจัดผงขัดที่ตกค้างจากการขัดด้วยกระดาษทราย แล้วอบวัสดุตัวอย่างให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 80°C หลังจากนั้นวัดความหนาของวัสดุตัวอย่างด้วยไมโครมิเตอร์ โดยทำการวัดที่จุดต่าง ๆ 3 จุดแล้วนำมาเฉลี่ยเป็นค่าความหนา (d_s) ของวัสดุตัวอย่าง หลังจากนั้นนำวัสดุตัวอย่างมาทำขั้วอิเล็กโทรด (electrodes) ที่บริเวณผิวทั้งสองด้านด้วยกาวเงิน (silver paint) โดยที่ขั้วอิเล็กโทรดด้านล่าง (bottom electrode) ทาด้วยกาวเงินจนเต็มพื้นที่ ส่วนอิเล็กโทรดด้านบน (top electrode) ทาเป็นพื้นที่วงกลมและทราบพื้นที่ (A) ของอิเล็กโทรด (ภาพที่ 4.5) โดยระวังไม่ให้กาวเงินติดพื้นผิวด้านข้างของวัสดุตัวอย่าง เมื่อทำขั้วอิเล็กโทรดบนวัสดุตัวอย่างเสร็จแล้วจะนำวัสดุตัวอย่างไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 100°C โดยใช้เวลาอบประมาณ 1 ชั่วโมง

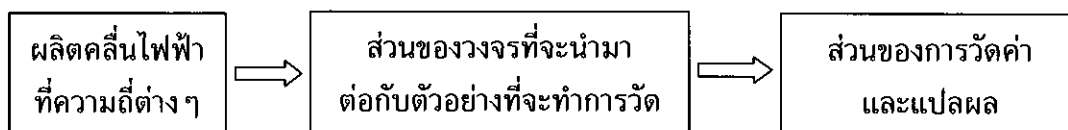


ภาพที่ 4.5 การเตรียมวัสดุตัวอย่างสำหรับทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก (ก) ภาควัดขวาง (ข) ผิวหน้าอิเล็กโทรดด้านบน

4.4.2 ระบบและหลักการทำงานของเครื่องทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก (ประสิทธิ์ ทองใบ, 2549)

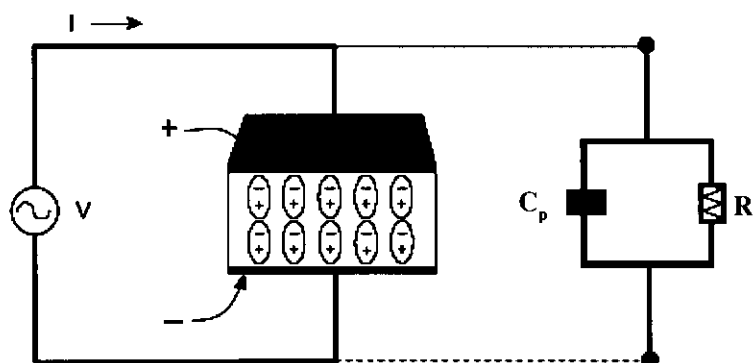
การทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุตัวอย่างในงานวิจัยนี้ ทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า HP-4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer ตั้งอยู่ ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) เครื่องมือทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุนี้สามารถวัดได้ในช่วงความถี่กว้าง (100 Hz – 40 MHz) และสามารถประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุตัวอย่างที่เป็นของเหลวหรือของแข็ง โดยใช้การวัดค่าในโหมดของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ (impedance measurement) เครื่องมือทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า HP-4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer นี้สามารถวัดค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ อิมพีแดนซ์ (impedance, $|Z|$), แอดมิตแตนซ์ (admittance, $|Y|$), θ (phase), ความต้านทานไฟฟ้า (resistance, R), รีแอกแตนซ์ (reactance, X), ความนำไฟฟ้า (conductance, G), ซัสเซปแตนซ์ (susceptance, B), ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance, L), ความจุไฟฟ้า (capacitance, C), แฟกเตอร์การสูญเสีย (dissipation factor, D) และ Q (quality factor)

หลักการทำงานของเครื่องมือทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า Impedance/Gain-Phase Analyzer (HP 4194A) คือ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในเครื่องทำหน้าที่ผลิตคลื่นไฟฟ้าที่มีความถี่ต่าง ๆ ในช่วงของการใช้งานเพื่อส่งให้กับวงจรในการวัดและนำค่าที่ได้ผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อแปลผล (ดังภาพที่ 4.6)



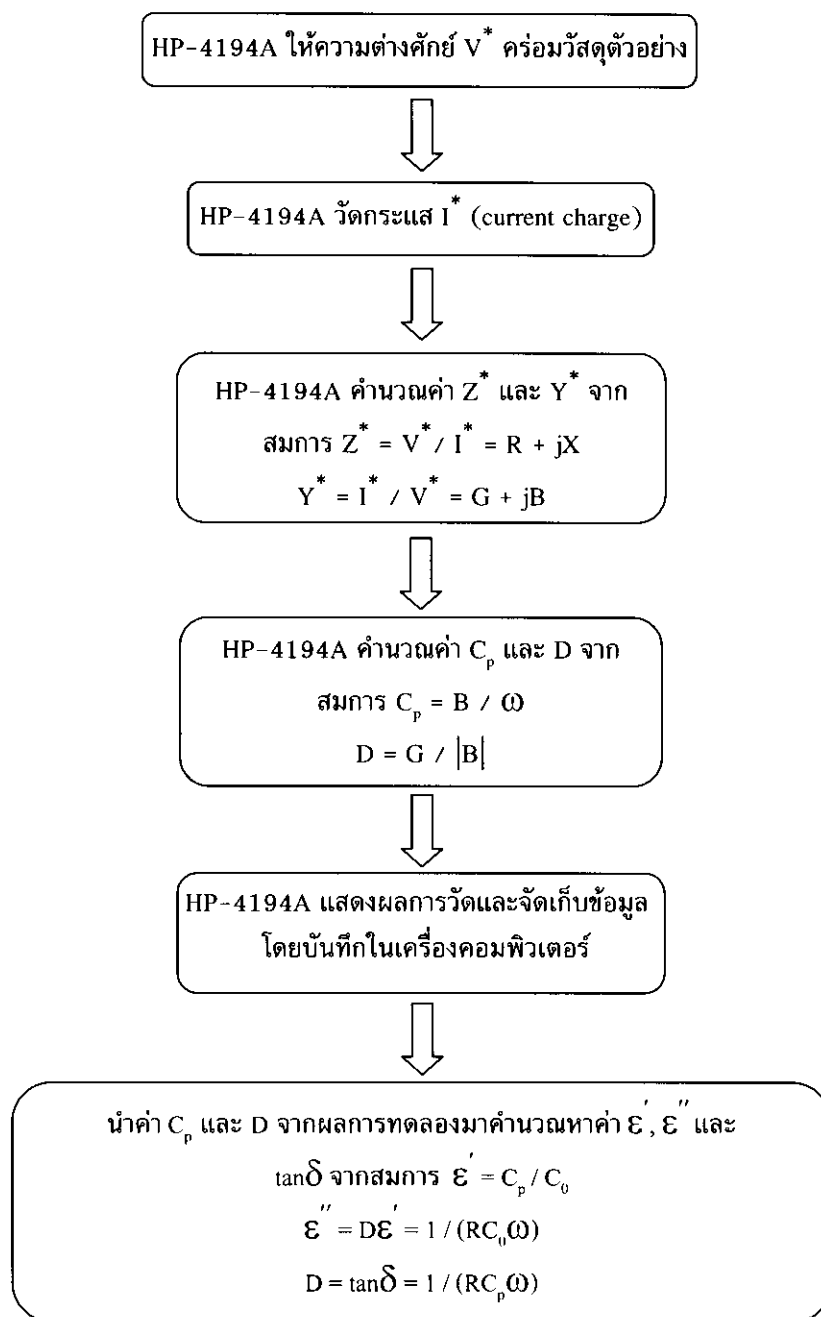
ภาพที่ 4.6 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า Impedance/Gain-Phase Analyzer (HP 4194 A)

หลักการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการของตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนาน โดยไดอิเล็กทริกแทนด้วยวัสดุเซรามิกที่นำมาทดสอบและส่วนของแผ่นคู่ขนานแทนด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมบนผิวหน้าทั้งสองด้านของวัสดุตัวอย่าง (ภาพที่ 4.5) แผนภาพของการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ระบบทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก

จากภาพที่ 4.7 เครื่องมือทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า Impedance/Gain-Phase Analyzer (HP-4194A) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าที่มีความถี่ต่าง ๆ ต่อเชื่อมกับส่วนที่ออกแบบมาเป็นเซลล์เพื่อทดสอบตัวเก็บประจุ ในการทดลอง เซลล์ดังกล่าวนี้แทนด้วยวัสดุเซรามิกไดอิเล็กทริกที่ขั้วอิเล็กโทรดทำจากกาวเงิน และเซลล์ดังกล่าวนี้ถูกพิจารณาว่าเป็นวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (C_p) และตัวต้านทาน (R_p) ที่ต่อกันแบบขนาน โดย C_p เป็นส่วนที่แสดงถึงการเก็บประจุไฟฟ้า และ R_p เป็นส่วนที่แสดงการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปของความร้อน แผนภาพแสดงหลักการคำนวณและประมวลผลข้อมูลแสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 หลักการวัดและการเก็บข้อมูลในการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้

หมายเหตุ ; $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f คือความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ให้

$C_0 = A\epsilon_0/d_s$ เมื่อ A คือ พื้นที่ของอิเล็กโทรด (m^2), d_s คือ ความหนาของวัสดุตัวอย่าง (m)

ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $8.845 \times 10^{-12} F/m$

4.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ทำการเปิดเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า HP-4194A เปิดโปรแกรมควบคุมการวัดและโปรแกรมบันทึกข้อมูล จากนั้นรอประมาณ 30 นาทีเพื่อให้เครื่องวัดพร้อมทำงาน โดยตั้งค่าความถี่เริ่มต้นและความถี่สุดท้ายของการวัด คือ 100 Hz และ 1 MHz ตามลำดับ ทำการตั้งค่าการวัดตามแกนความถี่เป็นแบบลอการิทึมโดยทำการวัดทั้งหมด 51 จุดตลอดช่วงของความถี่ที่วัด โดยตั้งค่าโวลเตจการสั่น (oscillation voltage) เท่ากับ 1 โวลต์ ตั้งค่าในโหมดของการวัดค่าอิมพีแดนซ์เป็นการวัดค่า C_p , D ซึ่ง หมายถึงการวัดค่าความจุไฟฟ้า และ แฟกเตอร์การสูญเสีย ($\tan\delta$) นำวัสดุตัวอย่างใส่เข้าไปในระบบที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ โดยทำการวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 °C ทำการวัดและเก็บข้อมูลทุกๆ 10 °C โดยที่แต่ละอุณหภูมิของการวัดจะทิ้งให้อุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 10 นาที และนำข้อมูลที่ได้ออกมาจากการวัดไปคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (คำนวณโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel)

4.5 การศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 และวัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$)

4.5.1 ความเค้นแบบแกนเดียว

ความเค้น (stress) เป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เป็นแรงต้านทานภายในของวัสดุที่พยายามต้านแรงภายนอกที่กระทำ เพื่อไม่ให้วัสดุเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง โดยแรงต้านนี้จะกระทำอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ดังสมการที่ (4.10)

$$S = \frac{F}{A} \quad (4.10)$$

เมื่อ S คือ ความเค้น (stress)

F คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อวัสดุ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

ความเค้นมีหน่วยเป็น นิวตัน/เมตร² (N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pascal, Pa) และขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงภายนอกที่กระทำ เช่น วัสดุเมื่ออยู่ในสภาพถูกดึง (tension) จะเกิดความเค้นดึง (tensile stress) ถ้าวัสดุถูกกดหรืออัด (compression) จะเกิดความเค้นกด (compressive stress) หรือวัสดุได้รับแรงที่ทำให้ผิวด้านหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านผิวด้านตรงข้ามในลักษณะที่ถูกเฉือน (shear stress) ในขณะที่ความเค้นแบบแกนเดียว (uniaxial Stress) เป็นแรงที่กระทำต่อวัสดุในทิศทางเดียวเท่านั้น จะไม่มีแรงจากแกนอื่นมากระทำเพราะจะทำให้เกิดความเค้นเฉือน

4.5.2 สมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียว

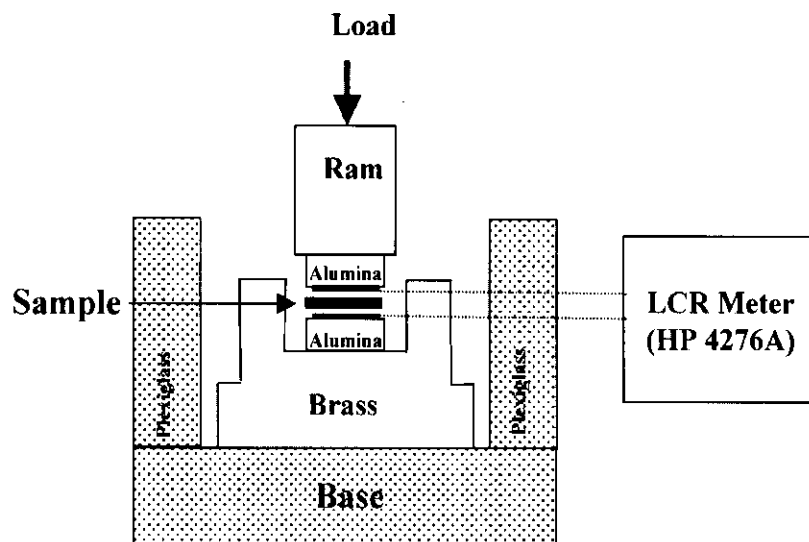
การศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 และ วัสดุเซรามิก $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยใช้เครื่องมือที่ออกแบบขึ้นโดย ผศ.ดร.รัตติกร ยิ้มนิริญ (ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) โดยได้ออกแบบและสร้างเครื่องมืออัดแรงเค้นแบบแกนเดียว (uniaxial compressometer) ที่เชื่อมต่อกับระบบวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริก และสมบัติทาง

ไดอิเล็กทริกถูกวัดจากหัววัด (spring-loaded pin) ซึ่งถูกต่อกับมิเตอร์แบบ LCZ (LCZ-meter, HP 4276A) ดังภาพที่ 4.9

ซึ่งสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่สภาวะความเค้นต่าง ๆ ทั้งในช่วงของการเพิ่มและลดความเค้น ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้สามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้ดังสมการที่ (4.11)

$$\varepsilon' = \frac{C_p d}{\varepsilon_0 A} \quad (4.11)$$

เมื่อ C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้า, d คือ ความหนาของวัสดุตัวอย่าง และ A พื้นที่ของอิเล็กโทรดซึ่งในการทดลองภายใต้สภาวะความเค้นนี้ ได้ใช้เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก (Riken Seeiki Co., Ltd.137609) ซึ่งให้ความเค้นกับวัสดุตัวอย่างในช่วง 0-13 เมกะปาสกาล (MPa)



ภาพที่ 4.9 ภาพระบบการวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่สภาวะความเค้นต่าง ๆ (Yimnirun et al., 2006)