

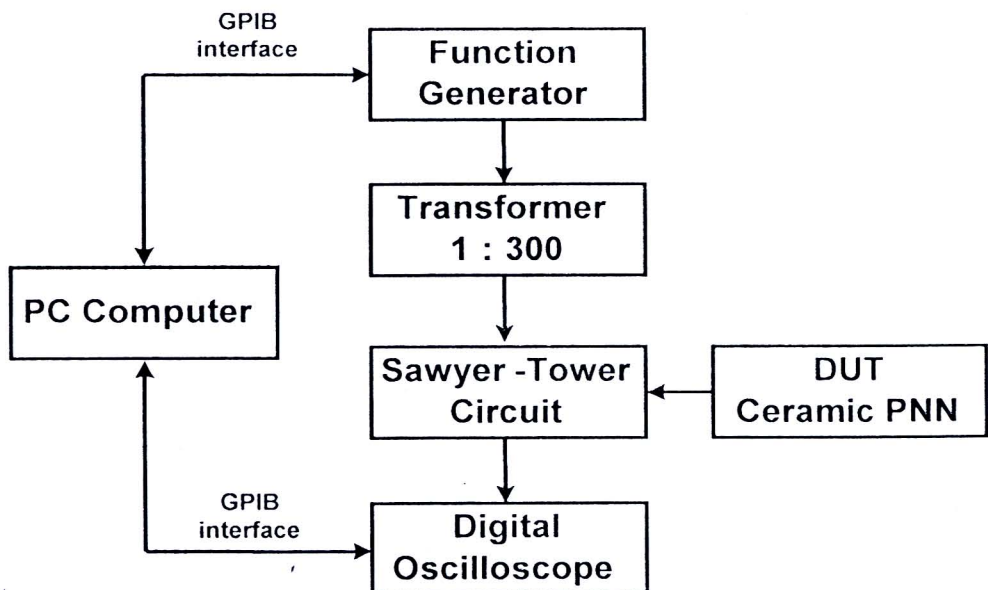
บทที่ 5

ผลการทดลอง

การวัดวงวนฮีสเทอรีซิสในบทนี้ เครื่องมือวัดจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) รุ่น 8.5 จะช่วยให้การวัดสะดวกและง่ายขึ้น นอกจากนี้โปรแกรมยังช่วยคำนวณและตรวจสอบความถูกต้องของผลการวัดที่ได้ด้วยอย่างไรก็ตามการวัดวงวนฮีสเทอรีซิสในเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก $(1-x)\text{PZ-(x)PNN}$ ในรายงานนี้ได้ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงมากกว่า 1,000 V ดังนั้นจึงต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษทั้งอุปกรณ์ที่ใช้งานและผู้นำการทดลองวัดด้วย หลังจากทำการวัดแล้วข้อมูลจะถูกเก็บในไฟล์ข้อมูลของ Microsoft Excel จากนั้นจะนำไปหาคำนวณหาค่าโพลาริเซชัน และค่าสนามไฟฟ้าของเฟอร์โรอิเล็กทริกสารเซรามิก $(1-x)\text{PZ-(x)PNN}$ ต่อไป

5.1 ระบบเครื่องมือวัด

ระบบเครื่องมือวัดที่ใช้วัดวงวนฮีสเทอรีซิส อธิบายได้ดังแผนภาพการทำงานของระบบเครื่องมือวัดที่แสดงในรูปที่ 5.1

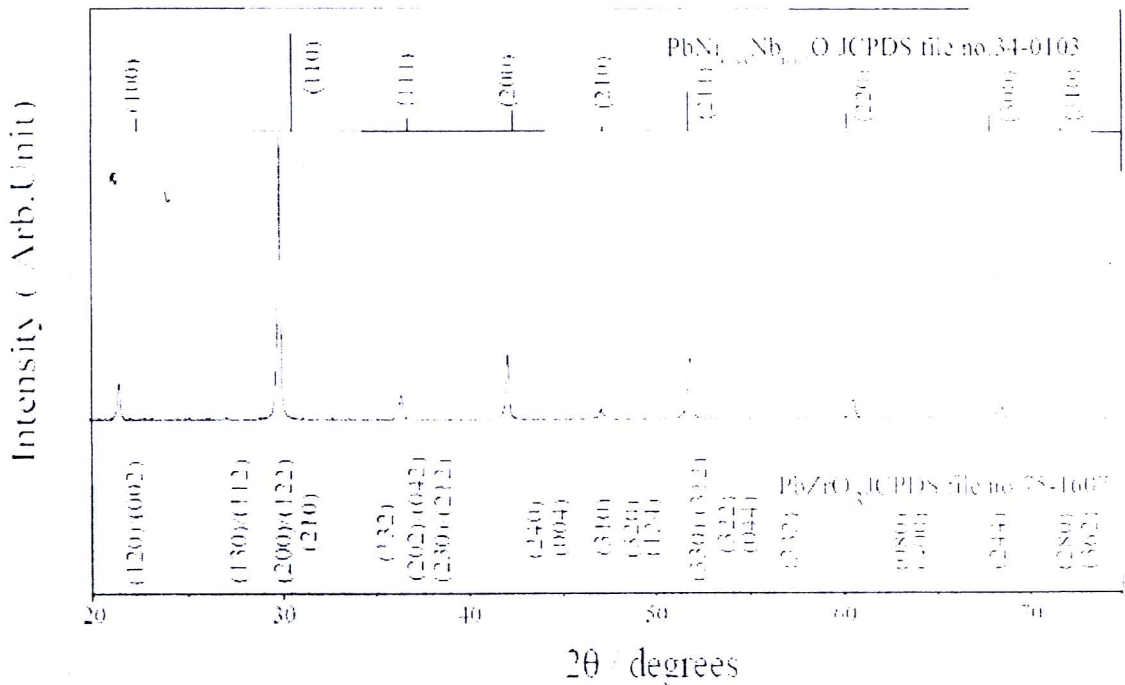


รูปที่ 5.1 แผนภาพการทำงานของระบบเครื่องมือวัดวงวนฮีสเทอรีซิส โดยใช้วงจรซอร์-ทาวเวอร์

DUT คือ device under test หรือตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

5.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของผง PC-ZNN

เมื่อทำการเตรียมเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ ที่ 0.5 นำมาตรวจสอบโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงในระบบ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$

จากรูปที่ 5.2 พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ ที่ $x = 0.5$ นั้นสังเกตว่าพีคที่ระนาบ (111) และ (220) นั้นมีการรวมตัวขึ้นซึ่งได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกจากรอมโบฮีดรอล ไปเป็นคิวบิกเสมือนเรียบร้อยแล้ว (โดยมีค่า a , b และ c เท่ากันระหว่างระหว่างระนาบมีค่าเท่ากันทำให้เมื่อตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะปรากฏเพียงพีคเดียว) สอดคล้องกับข้อมูลของสารประกอบเลดเซอร์โคเนต (PZ) ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น PbZrO_3 ในเพิ่มข้อมูล JCPDS file no. 75 - 1607 ซึ่งมีโครงสร้างแบบออร์โทโรอมบิก

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ (1-x)PZ-xPNN จะใกล้เคียงกับข้อมูลของสารประกอบเลดนิกเกิลไนโอเบต (PNN) ที่มีโมเลกุลเป็น $Pb(Ni_{0.33}Nb_{0.67})O_3$ ในเพิ่มข้อมูล JCPDS file no.34 – 0103 ซึ่งมีโครงสร้างแบบคิวบิกเสมือนเป็นไปตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

5.3 ผลการตรวจสอบหม้อแปลง

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองวัดความสามารถของหม้อแปลงไฟฟ้าอัตราขยาย 1 : 300 เท่า ในการขยายแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ โดยทำการทดลองวัดที่ความถี่ 5 , 10 , 20 , 30 , 40 และ 50 Hz

วิธีการทดลอง

1. ต่อกำหนดความต้านทาน R_1 และ R_2 ที่ฝั่งขาออกของหม้อแปลงเพื่อแบ่งแรงดันไม่ให้เกินความสามารถที่เครื่องออสซิลโลสโคปจะวัดได้ โดยในที่นี้เราใช้ค่า $R_1 = 6.65 \text{ M}\Omega$ และ $R_2 = 9.97 \text{ k}\Omega$

2. ต่อกำหนดเครื่องกำเนิดสัญญาณเข้าที่ฝั่งขาเข้าของหม้อแปลง และ นำสายโพรบจากช่องสัญญาณที่ 1 ของเครื่องออสซิลโลสโคป วัดสัญญาณที่ฝั่งขาเข้าของหม้อแปลง และ นำสายโพรบจากช่องสัญญาณที่ 2 ไปวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_2

3. ป้อนสัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยกำหนดความถี่ไว้ที่ 5 Hz และใช้แรงดันค่าต่างๆตั้งแต่ 1 – 10 โวลต์

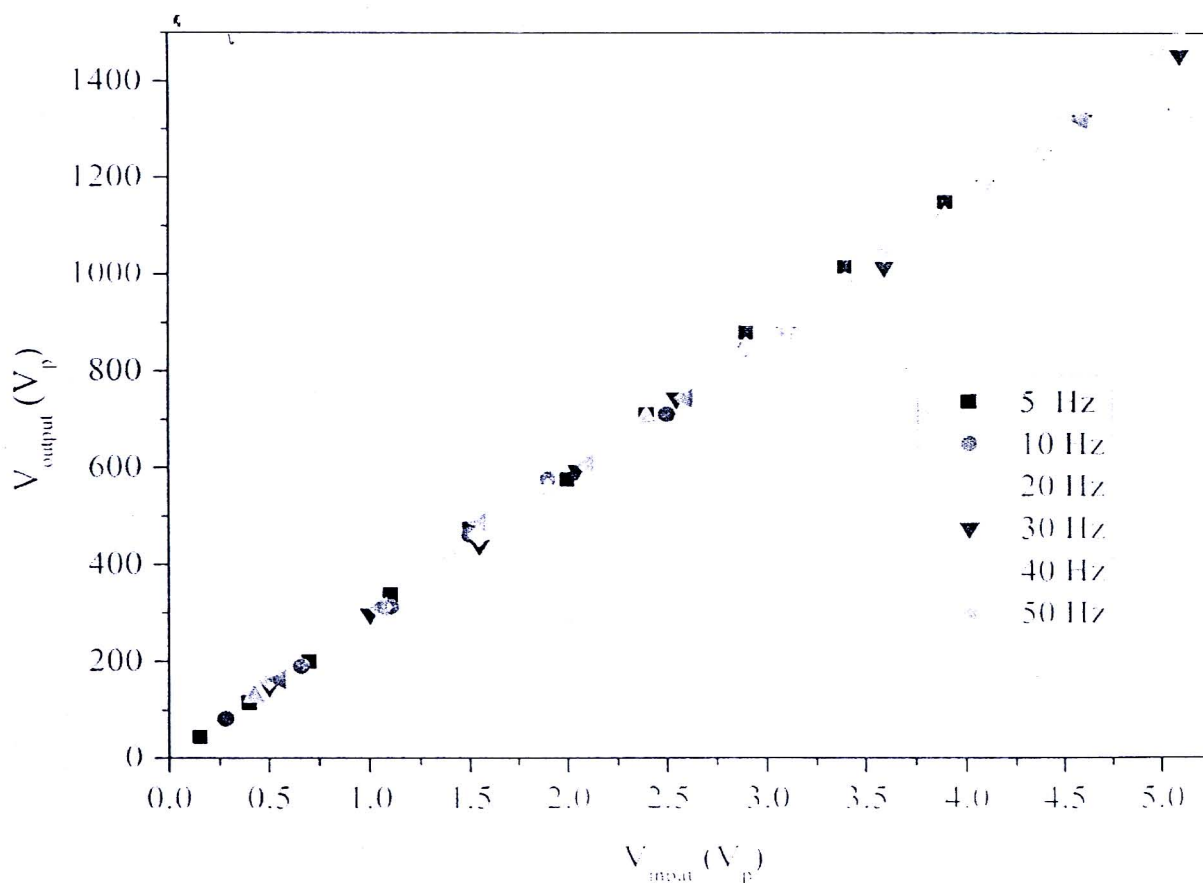
4. บันทึกค่าแรงดันที่ฝั่งขาเข้าและขาออกของหม้อแปลง โดยแรงดันที่ฝั่งขาออกเราจะวัดแรงดันที่ตกคร่อม R_2 แทน และนำมาคำนวณหาแรงดันที่ฝั่งขาออก โดยใช้สมการที่ (5.1)

$$\begin{aligned}
 V_{\text{output}} &= I \times R_{\text{in}} \\
 &= I \times (R_1 + R_2) \\
 &= \frac{V_2}{R_2} \times (R_1 + R_2) \\
 &= \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} \times V_2 \\
 &= \frac{(6.65 \text{ M}\Omega + 9.97 \text{ k}\Omega)}{9.97 \text{ k}\Omega} \times V_2 \\
 &= 677.031 \times V_2
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

5. ทำการทดลองเหมือนตอนแรก แต่เปลี่ยนความถี่เป็นค่าต่างๆ ได้แก่ 10 , 20 , 30 , 40 และ 50 Hz และบันทึกผลการทดลอง

6. นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้า และ แรงดันขาออกของหม้อแปลง เพื่อสังเกตความแตกต่างจากกราฟ ของแต่ละความถี่ และเพื่อจะได้หาค่าอัตราขยายของหม้อแปลง จากสมการที่ (5.2)

$$\text{อัตราขยาย} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (5.2)$$



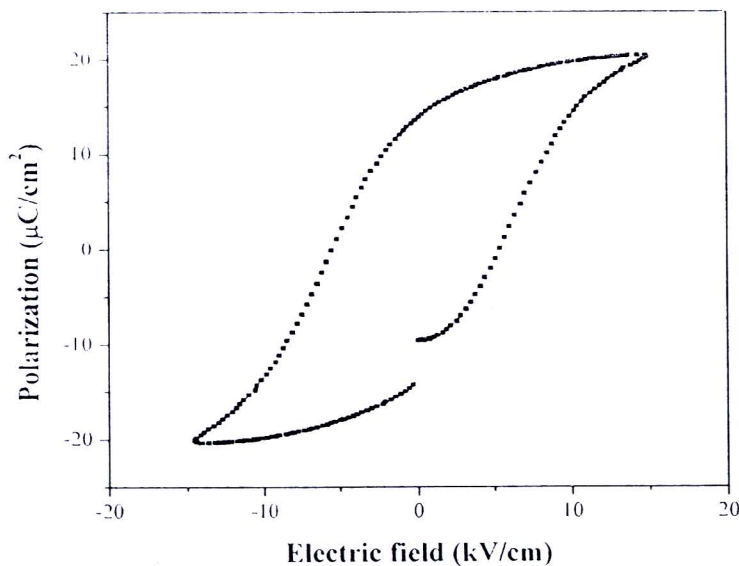
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลง

ในรูปที่ 5.3 เป็นการนำแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงที่ความถี่ค่าต่างๆมาพล็อตลงในกราฟ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เห็นได้ว่าแม้จะทดลองเปลี่ยนความถี่ค่าต่างๆแต่

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงจะค่อนข้างคงที่ ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงได้ประมาณ 290 เท่า ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าเราสามารถใช่ม้อแปลงนี้ขยายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ได้จริง จึงนำมาใช้ร่วมกับวงจรซอว์เฮอร์-ทาวเวอร์

5.4 ผลการทดสอบวงวนฮิสเทอรีซิสจากเครื่อง Trek 609E-6

การวัดค่าฮิสเทอรีซิสในการทดลองนี้เป็นการวัดจากเครื่องที่ได้มาตรฐาน โดยใช้ชุดวัดสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยประกอบไปด้วยเครื่อง High Voltage Amplifier, RT 66 B, Computer

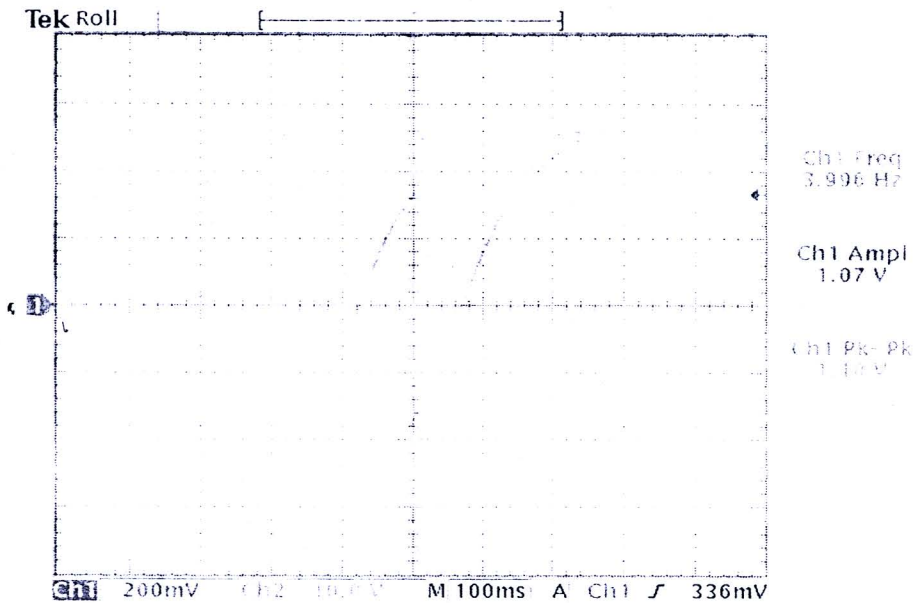


รูปที่ 5.4 วงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จากเครื่อง Trek 609E-6

จากรูปที่ 5.4 เป็นรูปวงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จากชุดวัดสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยวัดที่ค่าแรงดัน 360 Volt หรือ ใช้สนามไฟฟ้าที่ 15 KV/cm โดยวัดค่า P_r ได้ที่ $20.23 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่า P_r ได้ที่ $13.76 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่า E_r ได้ที่ $536.92 \text{ V}/\text{cm}$ โดยในรายงานนี้จะใช้ข้อมูลนี้ในการเปรียบเทียบเครื่องต่อไป



โดยก่อนการทดลองได้มีการทดสอบระบบการวัดที่ได้จัดทำขึ้นมา โดยการวัดค่า สนามไฟฟ้า และค่าโพลาริเซชัน โดยให้สนามไฟฟ้าค่าๆหนึ่ง



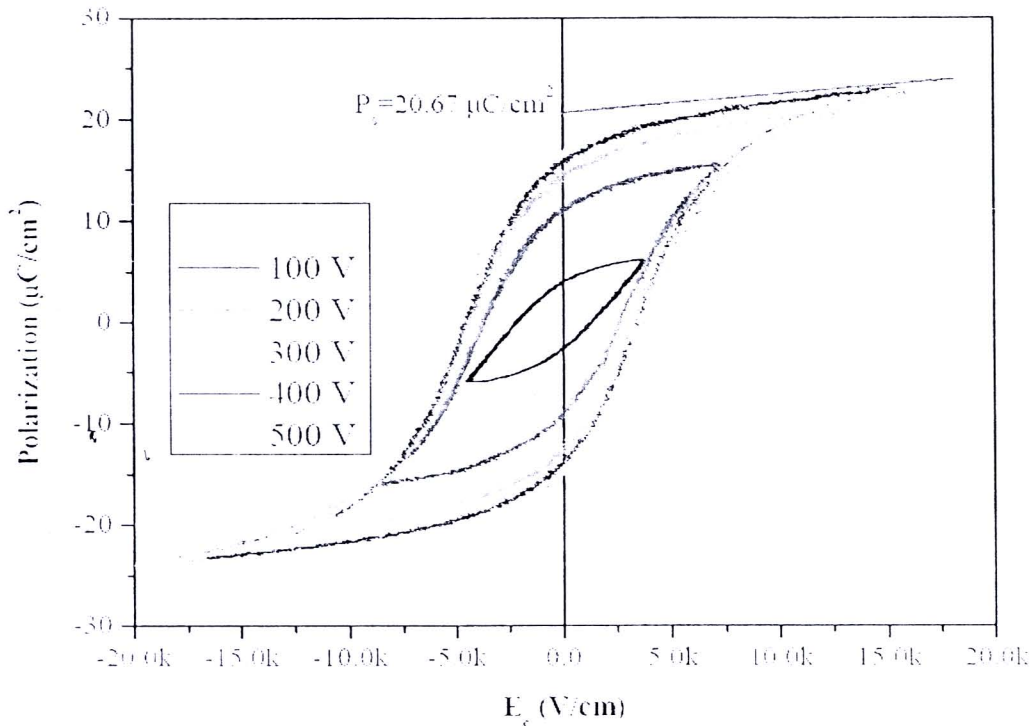
17 Feb 2010
06:36:48

รูปที่ 5.5 กราฟวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จาก Oscilloscope

จากรูปที่ 5. 5 เป็นรูปที่ได้จากการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จาก Oscilloscope โดยใช้วงจร ซอร์เบอร์-ทาวเวอร์ ซึ่งลักษณะวงวนที่ได้นั้น เป็นที่น่าพอใจและตรงตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น โดยหลังจากนั้นจะทำการวัดโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์เข้ามามีส่วนร่วมด้วย เพื่อความสะดวกและรวดเร็ว ซึ่งการทดลองต่างๆที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์เข้าไปช่วยนั้น จะมีลักษณะและการทดลองดังต่อไปนี้

5.5 ผลการทดสอบแรงดันต่อวงวนฮิสเทอรีซิส

การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาในส่วนของแรงดันที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิส โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ $0.1 \mu\text{F}$ และที่ความถี่ 4 Hz โดยใช้แรงดันตั้งแต่ 100 V ถึง 500 V ซึ่งเป็นแรงดันที่ทำให้ได้วงวนฮิสเทอรีซิสที่อ้อมตัวแล้ว จากนั้นดูการเปลี่ยนแปลงของลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 5.6 กราฟลักษณะวงวนที่เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

จากการทดลองจะพบว่าเมื่อป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นทำสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้า และค่าโพลาริเซชันมีค่าเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ทั้งค่าสนามไฟฟ้า และค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกันเมื่อลดค่าสนามไฟฟ้าลง ก็ จะส่งผลให้ ค่าสนามไฟฟ้าและ ค่าโพลาริเซชันนั้นมีค่าลดลงตามด้วย

หลังจากที่ได้รูป วงวนฮิสเทอรีซิสเบื้องต้นแล้วนั้น ได้ทำการวัดที่แรงดันต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตซ้อนกัน โดยเป็นการพล็อตที่ค่า โพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวข้างต้น จึง ผลที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.6

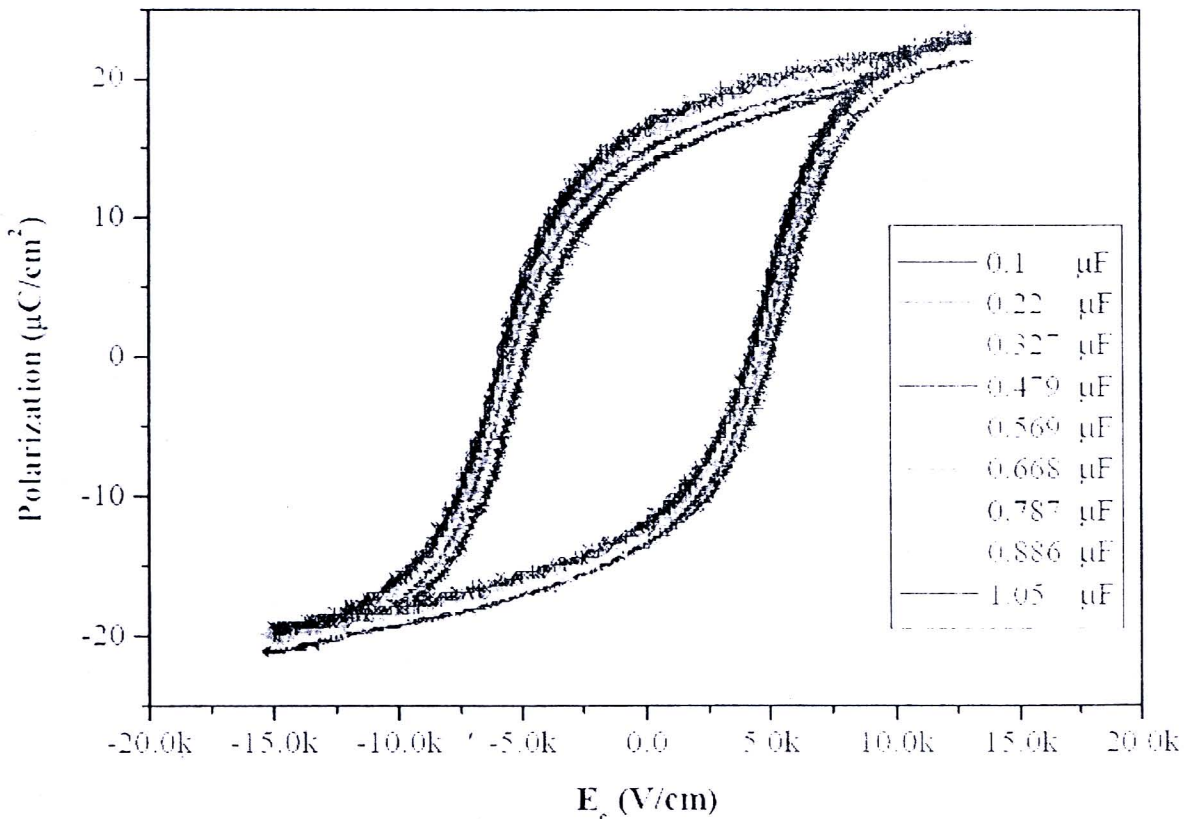
โดยค่าโพลาริเซชันสามารถคำนวณได้จาก $P = \frac{QV}{A}$ และสนามไฟฟ้าหาได้จาก $E = \frac{V}{D}$

จากกราฟในรูปที่ 5.6 พบว่าค่าโพลาริเซชันมีค่าเท่ากับ $20.67 \mu\text{C}/\text{cm}^2$

5.6 ผลการทดสอบค่าตัวเก็บประจุต่อวงวนฮิสเทอรีซิส

การศึกษาในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อดูผลกระทบของค่าตัวเก็บประจุต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส และคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้ได้วงวนฮิสเทอรีซิสที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่นำมาเปรียบเทียบ

จากรูป 5.7 เป็นการวัดค่าตัวเก็บประจุในค่าต่างๆเพื่อดูถึงผลกระทบของลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่จะได้จากการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุ โดยการทดลองจะเป็นวัดที่ค่าความถี่ 4 Hz และใช้สนามไฟฟ้าที่ 15 kV/cm โดยที่ใช้ค่านี้เพราะจะนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ใช้ในการเปรียบเทียบ และจะใช้ค่าตัวเก็บประจุในการทดลองเช่นที่ 0.1, 0.22, 0.327, 0.479, 0.569, 0.668, 0.787, 0.886, และ 1.05 μF ตามลำดับ โดยผลที่ได้จะเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 5.7 ซึ่งจากการทดลองพบว่า ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกันแต่จะไม่เท่ากัน ซึ่งกราฟนั้นจะมีลักษณะที่เลื่อนขึ้นทำให้ค่าโพลาริเซชันเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าค่าตัวเก็บประจุนั้นมีผลต่อ ค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าด้วย



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าตัวเก็บประจุต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส

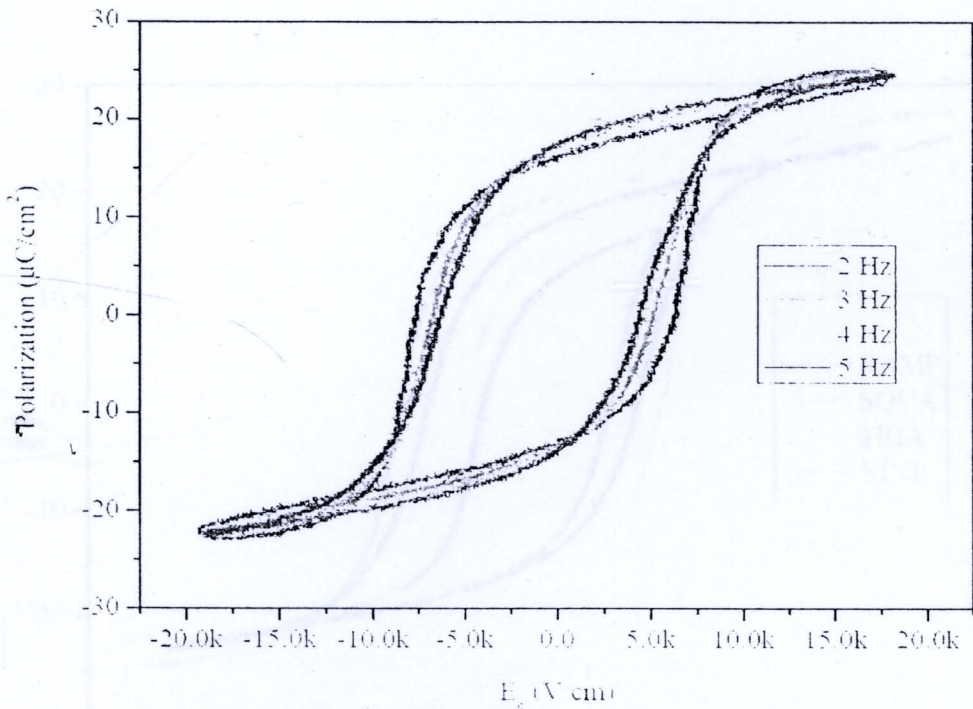
โดยได้มีการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง เพื่อจะทำการหาค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้ได้ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่ใกล้เคียงกับกราฟที่วัดได้จากชุดทดลอง Trek 609E - 6 ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 5.4 และให้มีเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยที่สุดที่ 0.668 μF โดยได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโพลาริเซชันอยู่ที่ 2.32 % จึงได้ใช้ค่าตัวเก็บประจุนี้เป็นค่ามาตรฐานในการทดลองอื่นๆต่อไป

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโพลาริเซชันเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่วัดได้จากชุดทดลอง Trek 609E-6 ที่สนามไฟฟ้า 15 kV/cm

ตัวเก็บประจุ (μF)	P_s (ที่ $E = 15\text{kV}$)	% ความแตกต่างจากกราฟที่วัดได้จากเครื่อง Trek609E-6
0.1	19.63	2.97
0.22	21.13	4.48
0.327	21.10	4.30
0.479	20.91	3.25
0.569	20.95	3.56
0.668	20.70	2.32
0.787	20.75	2.57
0.886	21.10	4.3
1.05	21.10	4.3

5.7 ผลการทดสอบค่าความดีที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิส

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากความดีที่มีผลต่อค่าสนามไฟฟ้า (E_c) และค่าโพลาริเซชัน (P_s) และลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิส

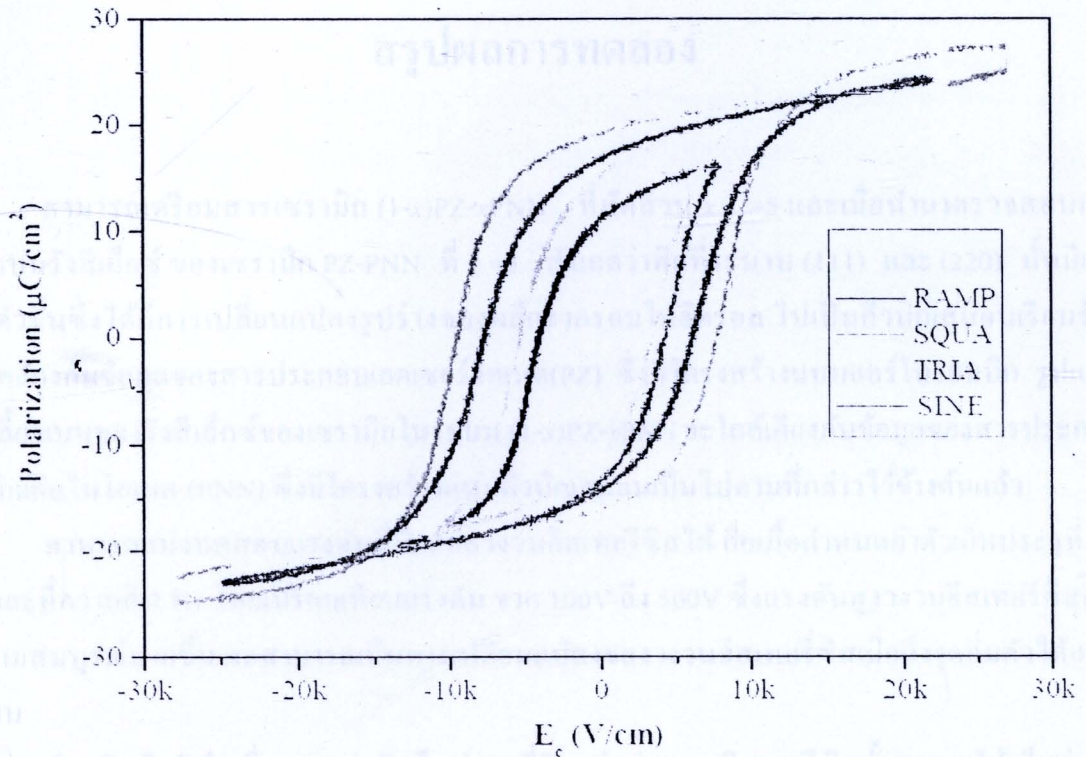


รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบผลของความถี่ต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส

จากรูป 5.8 เป็นการวัดค่าความถี่ (f) เพื่อศึกษาผลของความถี่ที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิส โดยเป็นการใช้แรงดันคงที่ และใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ $0.668 \mu\text{F}$ จากนั้นปรับค่าความถี่จาก 2 Hz เพิ่มขึ้นถึง 5 Hz เนื่องจากเกิดปัญหาที่หม้อแปลงทำให้สามารถใช้ความถี่ได้แค่ 5 Hz ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ค่าสนามไฟฟ้า (E_c) ค่าโพลาริเซชัน (P) จะมีค่าลดลง และเกิดข้อสังเกตขึ้นเนื่องจากเมื่อทำการทดลองลดความถี่ที่ป้อนเข้าสู่สาร จะสังเกตเห็นได้ว่าวงวนฮิสเทอรีซิส มีการขยายตัวมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารเกิดการกลับขั้วของโดเมนได้ดีขึ้น

5.8 ผลการทดสอบลักษณะของสัญญาณที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิส

ในส่วนสุดท้ายนี้ จะเป็นการทดลองเพื่อดูว่าลักษณะสัญญาณของแหล่งจ่ายนั้นจะมีผลอย่างไรต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสบ้าง โดยในการทดลองจะเป็นการเปลี่ยนสัญญาณอินพุตจากคลื่นรูปไซน์ (sine wave) เป็นลักษณะอื่นๆ เช่น คลื่นรูปแรมป์ (ramp wave), คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (square wave) เป็นต้น โดยเป็นการใช้ค่าแรงดันคงที่ และใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ $0.668 \mu\text{F}$ และใช้ความถี่ที่ 4 Hz



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบผลของลักษณะสัญญาณต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส

จากการทดลองพบว่า เมื่อเปลี่ยนสัญญาณจากคลื่นรูปไซน์ เป็นคลื่นสัญญาณรูปอื่นานั้น ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้ นั้น มีความแตกต่างกันออกไปมาก โดยค่าโพลาริเซชัน และค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ นั้น มีค่าแตกต่างกันมาก จึงอาจกล่าวได้ว่า ไม่สามารถที่จะใช้สัญญาณอินพุตเป็นอะไรก็ได้ เนื่องจากค่าที่ได้ นั้น ไม่ใกล้เคียงกันเลย ซึ่งโดยทั่วไป จะใช้เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

สามารถเตรียมสารเซรามิก $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ ที่สัดส่วน $x = 5$ และเมื่อนำมาตรวจสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ของเซรามิก PZ-PNN ที่ $x = 5$ สังเกตว่าพีคที่ระนาบ (111) และ (220) นั้นมีการรวมตัวขึ้นซึ่งได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกจากระบบออร์โธโรอมโบอิดรอล ไปเป็นคิวบิกเหมือนรีเพอร์รอย สอดคล้องกับข้อมูลของสารประกอบเลดเซอร์โคเนต (PZ) ซึ่งมีโครงสร้างแบบออร์โธโรอมโบอิดรอล รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ จะใกล้เคียงกับข้อมูลของสารประกอบเลดนิกเกิลไนโอเบต (PNN) ซึ่งมีโครงสร้างแบบคิวบิกเหมือนขึ้นไปตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

สามารถแบ่งทดสอบแรงดันที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิสได้ คือเมื่อกำหนดค่าตัวเก็บประจุที่ $0.1 \mu\text{F}$ และที่ความถี่ 4 Hz โดยเปรียบเทียบแรงดัน จาก 100V ถึง 500V ซึ่งแรงดันสูงวงวนฮิสเทอรีซิสก็ยิ่งมีความสมบูรณ์มากขึ้น จะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสเมื่อถึงจุดอิ่มตัวได้อย่างชัดเจน

สำหรับปัจจัยในเรื่องของค่าตัวเก็บประจุที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิสนั้น แสดงให้เห็นว่า รูปวงวนฮิสเทอรีซิสมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยค่าตัวเก็บประจุมีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิส ซึ่งจะเกิดการเลื่อนขึ้นทำให้ค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อเลือกค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมและมีความใกล้เคียงกับกราฟที่ทำการเปรียบเทียบ ซึ่งมีค่าตัวเก็บประจุที่ค่า $0.668 \mu\text{F}$ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 2.32%

สำหรับความถี่ที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิสเมื่อทำการป้อนแรงดันที่มีค่าคงที่ และตัวเก็บประจุ $0.668 \mu\text{F}$ โดยปรับความถี่ 2Hz ถึง 5Hz จะเห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นวงวนฮิสเทอรีซิสนั้นจะมีลักษณะที่แคบ และใกล้เคียงกับ Trek 609E-6 ที่สุด

สำหรับการทดสอบลักษณะของสัญญาณที่มีผลต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส ซึ่งได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตลักษณะ สัญญาณรูปไซน์, สัญญาณรูปแรมป์, สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม, โดยกำหนดแรงดันให้มีค่าคงที่ ตัวเก็บประจุที่ $0.668 \mu\text{F}$ และความถี่ 4Hz จะเห็นว่าสัญญาณที่ป้อนเข้าไปก็มีผลทำให้ค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าบังคับเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมคือ สัญญาณรูปไซน์