

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

ตัวอย่างวาริสเตอร์ที่เตรียมด้วยวิธีทางเซรามิกส์ จากการทดลองในอัตราส่วนผสมของสารเจือ Bi_2O_3 และ CoO ที่มีเปอร์เซ็นต์โดยโมลต่างๆ ตามบทที่ 3 ได้นำมาศึกษาปัจจัยของกระบวนการเตรียมที่เหมาะสม โดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการเผาซินเตอร์ที่ต่างกัน นำมาวิเคราะห์เพื่ออธิบายเหตุผล อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่เหมาะสม เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อความหนาแน่นสารตัวอย่าง โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของสาร ผลของความหนาแน่นสารตัวอย่างที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสาร รวมถึงอิทธิพลของปริมาณสารเจือ Bi_2O_3 และ CoO ที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์ โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ศึกษาอิทธิพลของการกลบตัวอย่างด้วยผง $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CoO}$ ระหว่างการเผาซินเตอร์ที่มีต่อความหนาแน่น

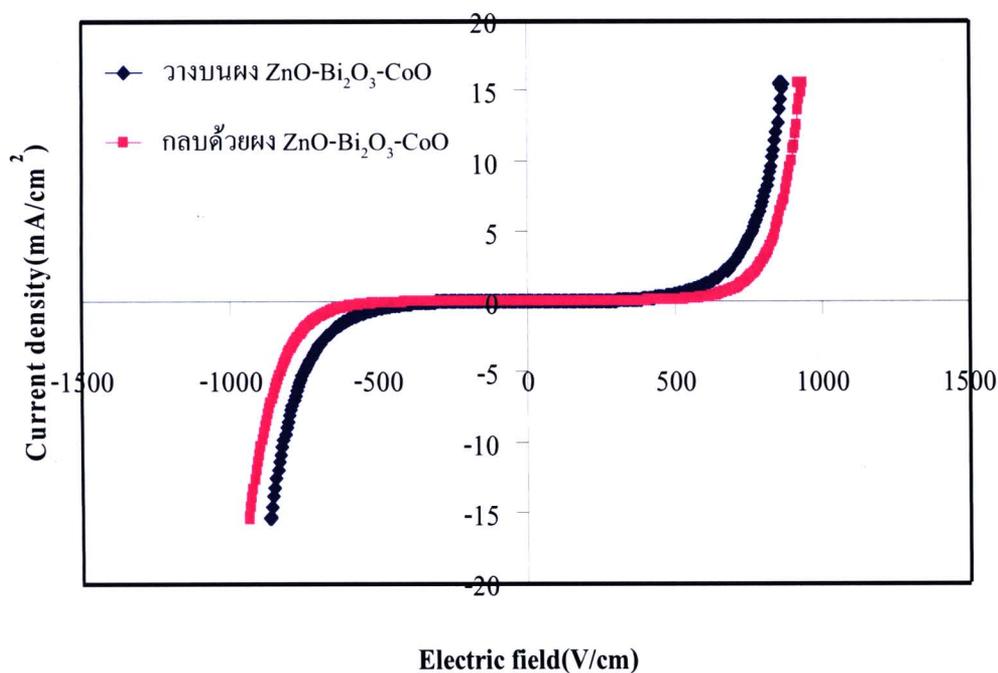
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการเตรียมวาริสเตอร์ก่อนการเผาซินเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมามีกระบวนการเตรียม หรือรูปแบบการวางเม็ดสารเพื่อเข้าเตาเผาที่เหมาะสมมีผลต่อสมบัติความเป็นวาริสเตอร์ที่ดีได้ และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [5,14] จะใช้วิธีการกลบตัวอย่างด้วยผง $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CoO}$ ระหว่างการเผาซินเตอร์ ซึ่งจากการใช้วิธีการดังกล่าวเปรียบเทียบกับ การไม่กลบผง $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CoO}$ ระหว่างการเผาซินเตอร์นั้น พบว่าจากการทดลองทั้งสองวิธีได้สารตัวอย่างที่มีความหนาแน่นต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นของวาริสเตอร์สังกะสีออกไซด์ที่มีส่วนผสม Bi_2O_3 และ CoO เป็น 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมลตามลำดับ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1100°C ที่บรรยากาศการเผาต่างกัน

บรรยากาศการเผา	ความหนาแน่น (g/cm^3)
วางบนผง $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CoO}$	5.42
กลบด้วยผง $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CoO}$	5.47

จากตารางที่ 4.1 ตัวอย่างวาริสเตอร์สังกะสีที่มีส่วนผสม Bi_2O_3 และ CoO เป็น 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมลตามลำดับ ภายหลังการอัดเม็ดขึ้นรูปแล้วแบ่งสารตามส่วนผสมดังกล่าว 2 ส่วน โดยส่วนหนึ่งมีการวางบนผง $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CoO}$ และกลบด้วยผง $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CoO}$ และส่วนที่ 2 ก็วาง

บนผง ZnO-Bi₂O₃-CoO เช่นกันแต่ไม่กลบด้วยผง ZnO-Bi₂O₃-CoO แล้วนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [5,17,18] ในอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C/นาที และลดอุณหภูมิ 10 °C/นาที จากนั้นนำสารทั้งสองเงื่อนไขไปหาค่าความหนาแน่น พบว่ากรณีการวางเม็ดสารที่มีการกลบผง ZnO-Bi₂O₃-CoO สารตัวอย่างมีความหนาแน่น 5.47 g/cm³ ส่วนในกรณีที่ไม่กลบผง ZnO-Bi₂O₃-CoO มีความหนาแน่น 5.42 g/cm³ และจากข้อมูลดังกล่าวที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงๆ จะทำให้บิสมีทซึ่งเป็นสารเจือสำคัญที่ทำให้สารดังกล่าวแสดงสมบัติความเป็นวาริสเตอร์ที่ดี มีการระเหยในระหว่างการเผาได้ และเป็นสาเหตุให้วาริสเตอร์มีความพรุนเกิดขึ้น ดังนั้นการกลบด้วยผง ZnO-Bi₂O₃-CoO มีส่วนช่วยยับยั้งการระเหยของบิสมีทได้ และเมื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของทั้งสองเงื่อนไขในความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จะได้ผลของกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะเฉพาะ J-E ของวาริสเตอร์สังกะสีออกไซด์ที่มีส่วนผสม Bi₂O₃ และ CoO เป็น 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมลตามลำดับ เมื่อวางบนผง ZnO-Bi₂O₃-CoO และกลบตัวอย่าง ZnO-Bi₂O₃-CoO ในระหว่างการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 °C

จากรูปที่ 4.1 เป็นความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของวาริสเตอร์สังกะสีออกไซด์ที่มีส่วนผสม Bi₂O₃ และ CoO เป็น 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมลตามลำดับ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1100 °C แล้วนำเม็ดสารขนาดบริเวณพื้นผิวจนเรียบด้วยกระดาษทราย ที่ความหนาเม็ดสาร 2 มิลลิเมตร แล้วทำขั้วไฟฟ้า จากนั้นไปวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J-E) ซึ่ง

พบว่าตัวอย่างที่เคลือบด้วยผง ZnO-Bi₂O₃-CoO มีค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์มากกว่าตัวอย่างที่วางไว้บนผง ZnO-Bi₂O₃-CoO ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวาริสเตอร์ นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของวาริสเตอร์ ได้จากการคำนวณจากสมการ

$$\alpha = \frac{\log J_2 - \log J_1}{\log E_2 - \log E_1}$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น

J_1 = ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 mA/cm²

J_2 = ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm²

E_1 = ค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (E_b) ที่ค่า J_1

E_2 = ค่าสนามไฟฟ้า ที่ค่า J_2

เมื่อกำหนดให้ $E_1 = E_b$ แทนค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ได้จากการค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ต่อความหนาแน่นกระแสตัวอย่าง และได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO-Bi₂O₃-CoO วาริสเตอร์ ที่สัดส่วนของ Bi₂O₃ : CoO เป็น 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C และมีบรรยากาศการเผาตัวอย่างโดยวางบนผง ZnO-Bi₂O₃-CoO และเคลือบด้วยผง ZnO-Bi₂O₃-CoO

บรรยากาศการเผา	สนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ E_b (V/cm)	ความต่างศักย์เบรกดาวน์ V_b (V)	สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α)
วางบนผง ZnO-Bi ₂ O ₃ -CoO	584	116	6.5
เคลือบด้วยผง ZnO-Bi ₂ O ₃ -CoO	635	127	13.2

จากตารางที่ 4.2 เป็นการแสดงค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ และสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของวาริสเตอร์สังกะสีออกไซด์ที่มีส่วนผสม Bi₂O₃ และ CoO เป็น 1 และ 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) ตามลำดับ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1100 °C ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่เคลือบด้วยผง ZnO-Bi₂O₃-CoO มีค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นมากกว่าตัวอย่างที่วางไว้บนผง ZnO-Bi₂O₃-CoO ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวาริสเตอร์

ดังนั้นจากการศึกษากรณีใช้ผงเคลือบ ZnO-Bi₂O₃-CoO พบว่าวาริสเตอร์ที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงด้วยเช่นกันและการทดลองเพื่อยืนยันจากงานวิจัยที่ผ่านมา

[5,17,19] แล้วนั้น ทำให้สามารถที่จะใช้วิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมวาริสเตอร์ที่ดี คือการใช้วิธีการกลบด้วยผง ZnO-Bi₂O₃-CoO ตลอดการทดลองต่อไปนี้

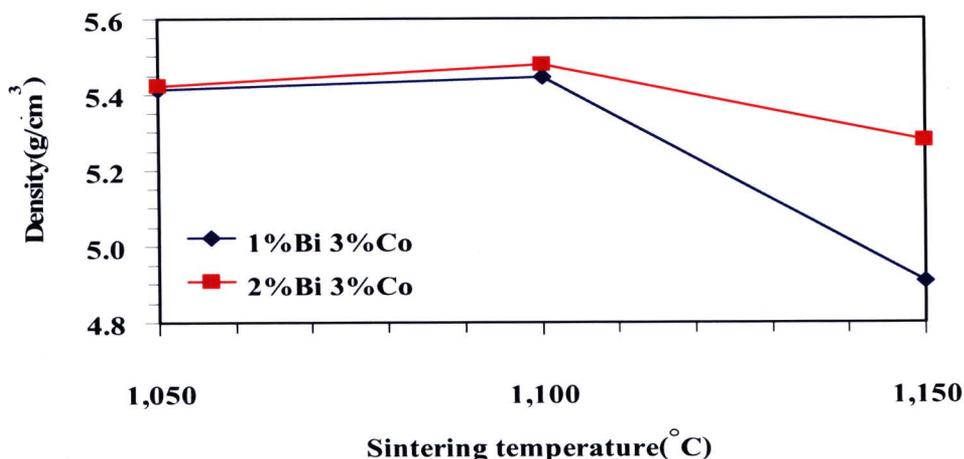
4.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อความหนาแน่น

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้สมบัติการเป็นวาริสเตอร์ที่ดี เมื่อศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา [17-19] พบว่าเมื่อดสารตัวอย่างจะผืนกรวมเป็นวาริสเตอร์ที่มีสมบัติที่ดีนั้น จะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากกว่า 1,000 °C และงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1,050 °C 1,100 °C และ 1,150 °C โดยใช้สารตัวอย่างที่สัดส่วนการผสม Bi₂O₃ : CoO เท่ากับ 1 : 3 และ 2 : 3 เปอร์เซนต์โดยโมล มาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์กับความหนาแน่นของสารตัวอย่าง และค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์กับความหนาแน่นของสารตัวอย่างและสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นที่สัดส่วน Bi₂O₃ : CoO เท่ากับ 1 : 3 และ 2 : 3 (เปอร์เซนต์โดยโมล)

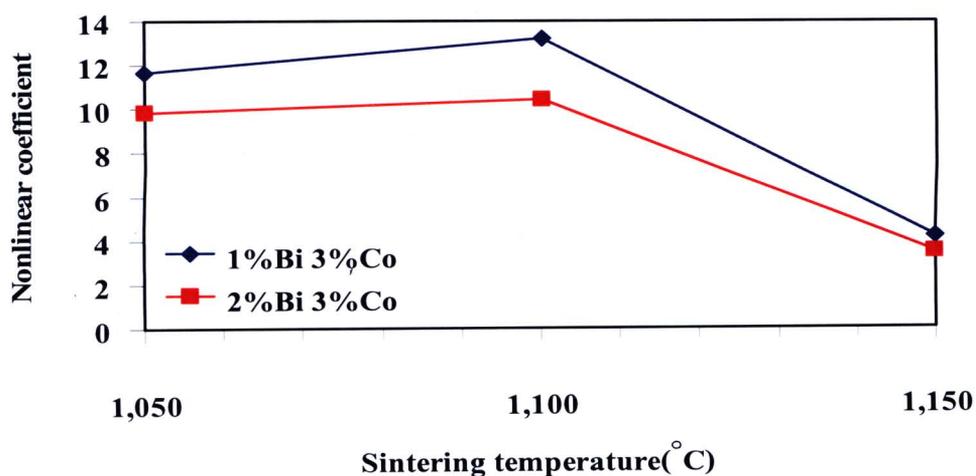
สารส่วนผสม Bi ₂ O ₃ : CoO (% mole)	อุณหภูมิซินเตอร์ (°C)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α)
1 : 3	1,050	5.41	11.7
	1,100	5.47	13.2
	1,150	4.91	4.2
2 : 3	1,050	5.42	9.8
	1,100	5.48	10.5
	1,150	5.28	3.5

จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ต่างกันต่อความหนาแน่นสารตัวอย่างที่สัดส่วน Bi₂O₃ : CoO เท่ากับ 1 : 3 และ 2 : 3 (เปอร์เซนต์โดยโมล) พบว่าอุณหภูมิการเผาซินเตอร์มีผลต่อความหนาแน่นสารตัวอย่าง โดยที่อุณหภูมิสูง 1,150 °C ทำให้ความหนาแน่นสารตัวอย่างมีค่าต่ำสุด และความหนาแน่นสารตัวอย่างจะสูงสุดที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการซินเตอร์กับความหนาแน่นสารตัวอย่าง แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.2



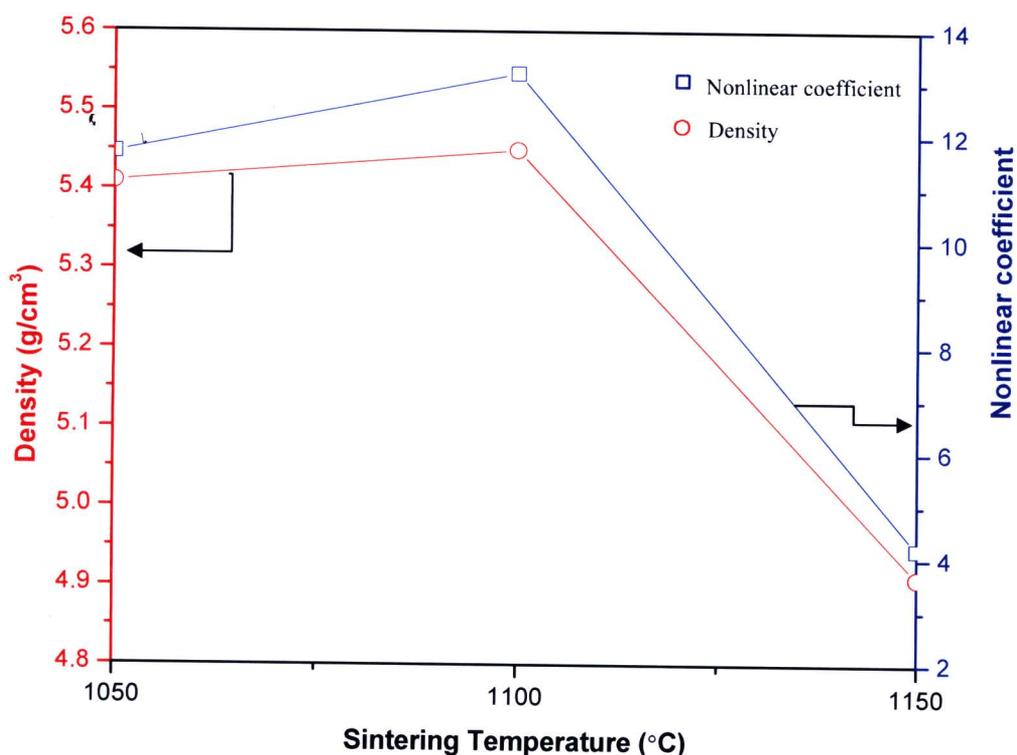
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์กับความหนาแน่นของสารที่ ส่วนผสม $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ เท่ากับ 1 : 3 และ 2 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล)

จากรูปที่ 4.2 เมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้นมีผลต่อความหนาแน่นของสารตัวอย่าง ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 1,100 °C สารตัวอย่างมีความหนาแน่นสูงกว่าอุณหภูมิอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ[19] เช่นกัน และเมื่อพิจารณาแนวโน้มจากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 1,100 °C มีผลทำให้ความหนาแน่นของสารตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,150 °C สารตัวอย่างที่มีส่วนผสม $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ เท่ากับ 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) มีความหนาแน่นลดลงอย่างชัดเจนกว่าสารตัวอย่างที่ส่วนผสม 2 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) จึงไม่เหมาะสมกับการเป็น ZnO- Bi_2O_3 -CoO วาริสเตอร์ที่ดี ณ อุณหภูมิดังกล่าว เนื่องจากความหนาแน่นที่ลดลงบ่งบอกถึงการระเหยตัวของบิสมาทออกไซด์ที่หายไประหว่างการเผาซินเตอร์ ทำให้สารตัวอย่างมีความพรุนเกิดขึ้น ซึ่งจากการพิจารณาคือ บิสมาทออกไซด์เป็นสารเจือสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์ และเป็นเหตุผลเดียวกันกับเงื่อนไขการพิจารณาในหัวข้อ 4.1 เช่นกัน ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปดังกล่าวกับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์กับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นที่ส่วนผสม $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ เท่ากับ 1 : 3 และ 2 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล)

จากรูปที่ 4.3 นำตัวอย่างที่สัดส่วน $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ เท่ากับ 1 : 3 และ 2 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) มาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์กับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,100 °C ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงสุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1,150 °C มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของสารลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของสารที่ทำการเผาซินเตอร์ในสภาวะอุณหภูมิต่างกัน โดยพบว่าความหนาแน่นที่มีค่าสูง มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของวาไรเตอร์ที่ส่วนผสม $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ เป็น 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C

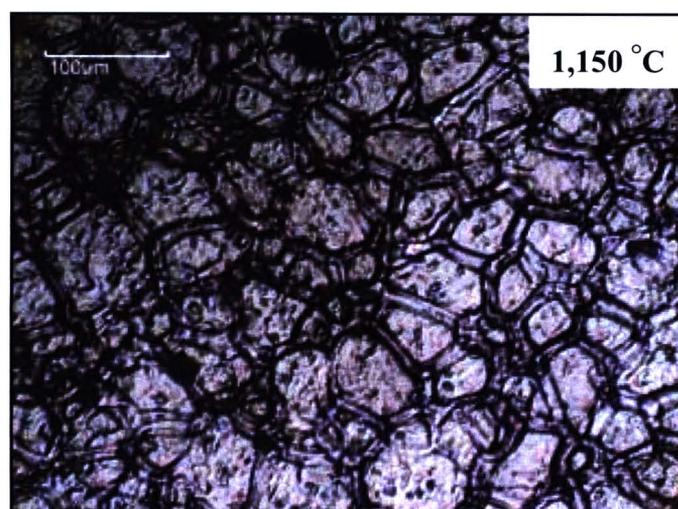
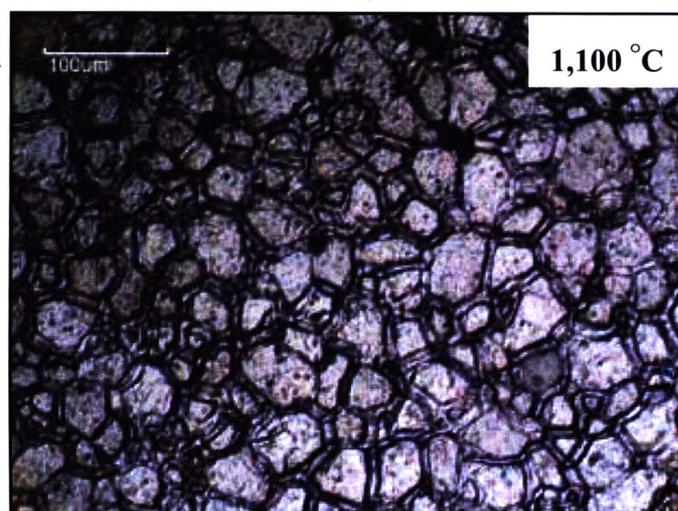
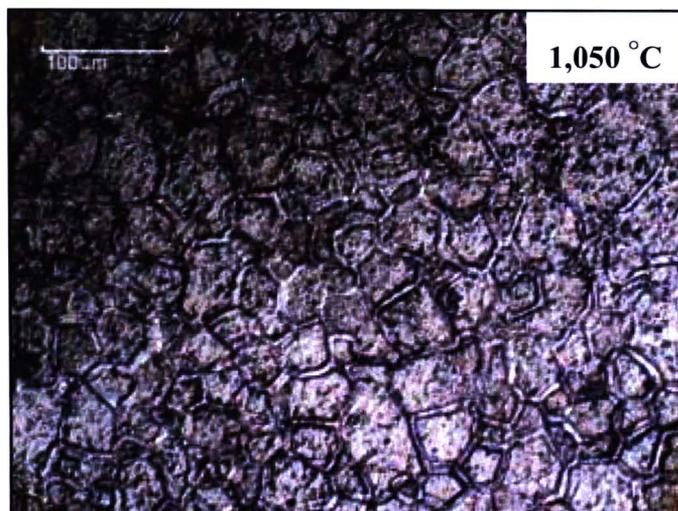
จากรูปที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของวาไรเตอร์ที่ส่วนผสม $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ เป็น 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C ตามลำดับ แล้วพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นอย่างชัดเจน

การเผาซินเตอร์ แม้ที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส Bi_2O_3 จะหลอมเหลว แต่เราต้องเผาให้มีอุณหภูมิสูงถึง 1,100 องศาเซลเซียส เพราะในระหว่างอัดเม็ดอนุภาคเข้าหากันจะเกิดช่องว่างระหว่าง

อนุภาคจำนวนมากพอสมควร ทำให้ผิว ZnO และกับ ZnO และ Bi_2O_3 ก็แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของ ZnO แต่ไม่เปียกผิวทั้งหมด เมื่อเผาจนอุณหภูมิเกิน 820 องศาเซลเซียส Bi_2O_3 จะหลอมเหลว แต่การเปียกผิวจะไม่ทั่วถึง เพราะระหว่างเกรนมีช่องว่างใหญ่กว่าปริมาณ Bi_2O_3 จะเข้าแทรกได้เต็ม และ 820 องศาเซลเซียส ไม่สูงพอจะทำให้กระบวนการเผาซินเตอร์เกิดขึ้นเร็วพอ จึงต้องเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ เป็น 1,100 องศาเซลเซียส (=1,373 K) ขณะที่จุดหลอมเหลวของ ZnO และ CoO ประมาณ 1,970 องศาเซลเซียส (~ 2243 K) ดังนั้น เมื่อ $1,373 \text{ K} > \frac{1}{2}(2,243\text{K})$ กระบวนการเผาซินเตอร์จะเริ่มเกิดได้ แต่ไม่คืบคาน (การเผาซินเตอร์จะดีถ้า $T_s = \frac{2}{3}T_m$) จึงต้องใช้เวลาเผาซินเตอร์ประมาณ 4 ชั่วโมง ระหว่างนี้ ZnO และ CoO จะละลายตัวจากเกรนเล็กลงในของเหลว Bi_2O_3 และเติมบนผิวเกรนใหญ่ ด้วยกระบวนการ liquid diffusion ทำให้รอยต่อระหว่างเกรนเรียบ และแคบขึ้นจน Bi_2O_3 หลอมเหลว เริ่มเคลือบผิวเต็มพื้นที่ผิวเกรน ช่องว่างระหว่างเกรนที่ลดลง ทำให้ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุสูงขึ้น โดยค่าสูงสุดที่แสดงสมบัติความเป็นวาไรเตอร์ที่ดีอยู่ที่การเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิเท่ากับ 1,100 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลองทุกเงื่อนไขในงานวิจัยนี้ต่อไป

4.3 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า

จากหัวข้อ 4.1 และ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C โดยการพิจารณาภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน เพื่ออธิบายผลในรูปแบบของโครงสร้างทางจุลภาค โดยคุณลักษณะของเกรนของสารตัวอย่างส่วนผสม $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ เท่ากับ 1 : 3 เปรอร์เซ็นต์โดยโมล ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน ส่วนผสม Bi_2O_3 : CoO เท่ากับ 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน ที่ได้จากสารตัวอย่างส่วนผสม $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ เท่ากับ 1 : 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C ตามลำดับ แสดงให้เห็นขนาดของเกรน และขอบเกรน รวมถึงความเป็นระเบียบของเกรน ด้วย ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิสูงๆ จะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น และขอบเกรนหนาขึ้น ซึ่งเป็นผลให้กลไกการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยจากภาพดังกล่าวได้ทำการวัดขนาดของเกรน และหาค่าเฉลี่ย คำนวณค่าความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรน และจำนวนเกรนจากสมการที่ 2.1 – 2.4 ในบทที่ 2 และได้ผลการคำนวณตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ขนาดเกรนเฉลี่ย จำนวนเกรน และความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรนของ $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CoO}$ วาริสเตอร์ที่สัดส่วนผสม $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ เท่ากับ 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C ตามลำดับ

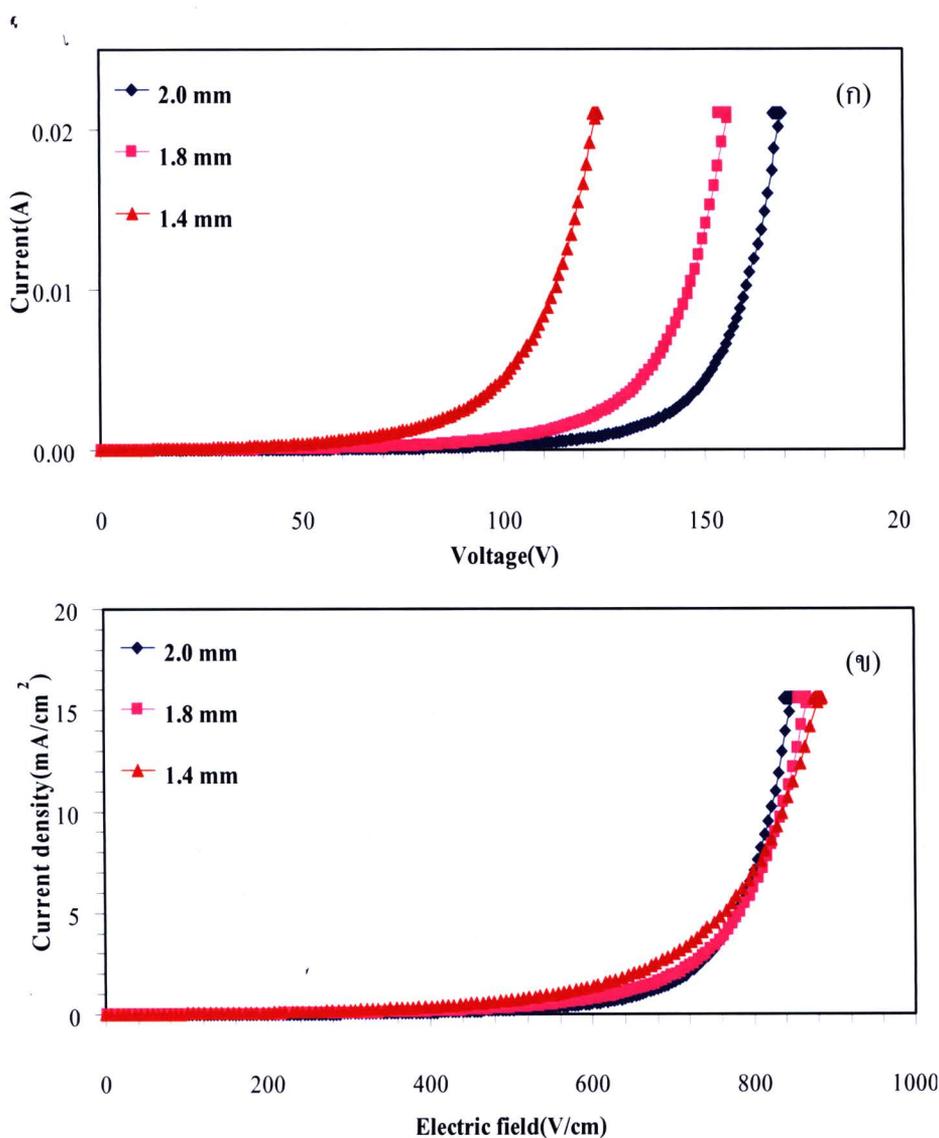
อุณหภูมิ เผาซินเตอร์ (°C)	ขนาดเกรน เฉลี่ย (μm)	สนามไฟฟ้า เบรกดาวน์ E_b (V/cm)	ความต่างศักย์ เบรกดาวน์ต่อเกรน V_g (V)	จำนวน เกรน	ความต่างศักย์ เบรกดาวน์ V_b (V)
1,050	41	684.8	2.84	48	137.0
1,100	45	635.3	2.88	44	127.1
1,150	61	330.0	2.00	33	66.0

จากตารางที่ 4.4 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นทำให้ขนาดของเกรนเฉลี่ยมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้จำนวนเกรนต่อความหนาเม็ดสารลดลง และทำให้ค่าความต่างศักย์เบรกดาวน์ลดลงด้วย และจากค่าความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรนที่ได้มีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [20-23] ซึ่งกล่าวว่าค่าความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรนมีค่าประมาณ 1–3 โวลต์ และเป็นสมบัติที่ดีของวาริสเตอร์ และพบว่าที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C ค่าความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรนมีค่าสูงสุด เท่ากับ 2.88 โวลต์

จากการพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเป็นวาริสเตอร์ที่ดีนั้น จากผลการทดลองหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,100 °C มีเหตุผลในเงื่อนไขต่างๆ ที่สอดคล้องกัน และสนับสนุนงานวิจัยที่ผ่านมาเช่นกัน ดังนั้นจึงให้อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม และใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ต่อไป

4.4 ศึกษาผลของความหนาของเม็ดสารตัวอย่างที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความหนาของเม็ดสารตัวอย่างที่ต่างกันคือ 2.0 มิลลิเมตร, 1.8 มิลลิเมตร และ 1.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมที่เหมือนกัน และนำมาทำขั้วไฟฟ้า จากนั้นจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าและตรวจสอบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวาริสเตอร์ พบว่าวาริสเตอร์ที่มีความหนาที่ต่างกันจะให้ลักษณะกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า (I-V) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) แต่เมื่อเขียนกราฟลักษณะเฉพาะความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า (J-E) จะได้เส้นกราฟที่ใกล้เคียงกัน หรือทับกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข)

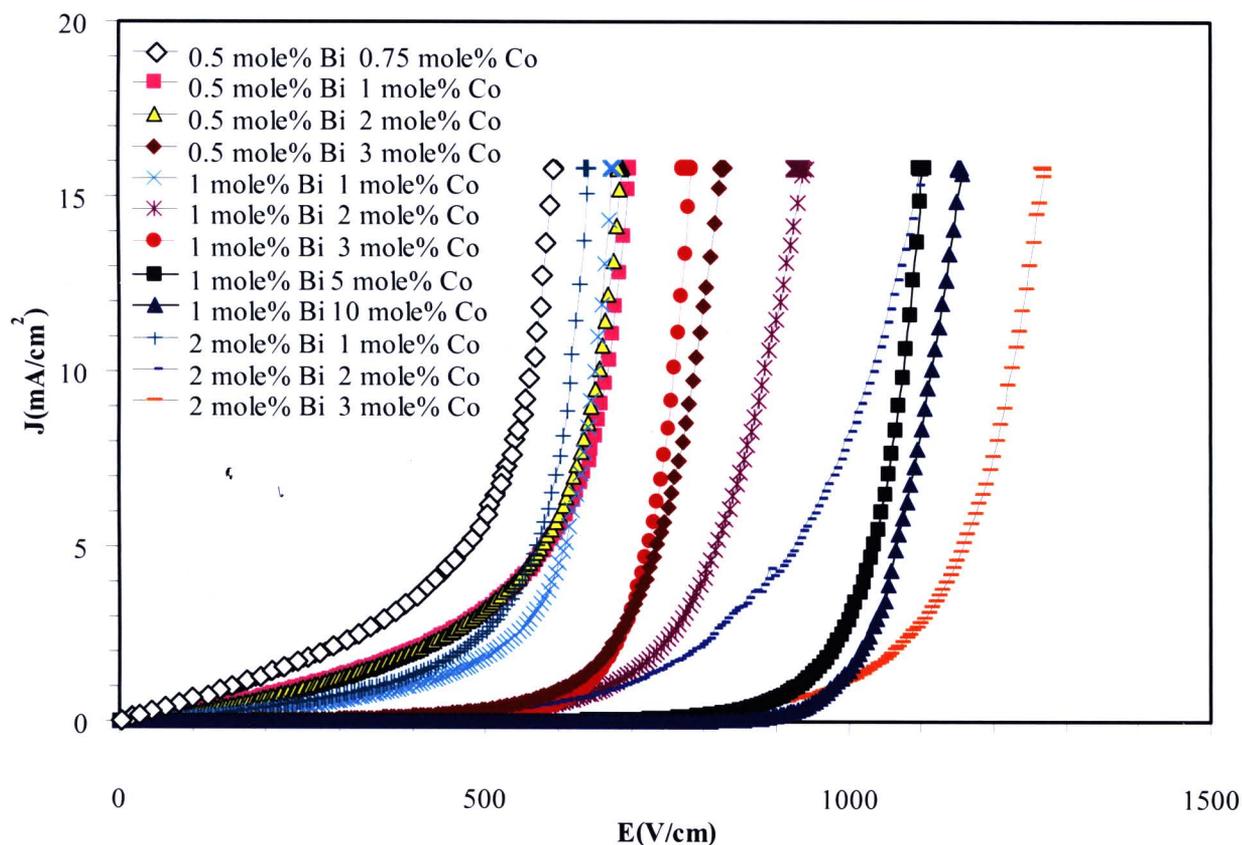


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบปริมาณทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์สังกะสีออกไซด์ที่ส่วนผสม Bi_2O_3 และ CoO เป็น 1 และ 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เฝ้าหินเตอร์ที่ $1,100^\circ\text{C}$ ที่ความหนาเม็ดสารต่างกัน

จากรูปที่ 4.6 (ก) เป็นกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเม็ดสารตัวอย่างที่ความหนา 1.4 1.8 และ 2.0 มิลลิเมตร พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาว์นจะเพิ่มสูงขึ้นตามความหนาของเม็ดสารตัวอย่างที่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากจำนวนเกรนที่มากกว่า และจากรูปที่ 4.6 (ข) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสนามไฟฟ้า และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เพื่อไม่ให้ความหนามีผลต่อศักย์ไฟฟ้าและพื้นที่หน้าตัดที่มีต่อปริมาณกระแสไฟฟ้า โดยแสดงเป็น J-E พบว่าจะทำให้เส้นกราฟมีแนวโน้มเดียวกัน หรือทำให้ค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาว์นเป็นค่าเดียวกัน ซึ่งทำให้ได้ลักษณะเฉพาะของเนื้อวัสดุนั้นๆ โดยไม่ขึ้นกับรูปร่างของตัวอย่าง ในการเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้า งานวิจัยนี้จะแสดงกราฟลักษณะเฉพาะในรูปแบบ J-E

4.5 ศึกษาอิทธิพลปริมาณการเติม CoO และ Bi₂O₃ ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์

วาริสเตอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นจากงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเติมสองชนิด คือ CoO และ Bi₂O₃ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติมสารทั้งสองที่สัดส่วนต่างๆ ที่ได้นำมาวัดค่าทางไฟฟ้า และนำผลที่ได้มาเขียนกราฟในลักษณะกราฟ J-E ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ผลทางไฟฟ้าที่ได้ของตัวอย่างสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.7 ลักษณะเฉพาะกราฟ J-E ของ ZnO-Bi₂O₃-CoO วาริสเตอร์ ที่ปริมาณการเติม CoO และ Bi₂O₃ ต่างกัน เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C

จากรูปที่ 4.7 ได้ลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามสมบัติที่สำคัญของวาริสเตอร์คือ ช่วงแรกของเส้นกราฟจะมีสภาพความต้านทานสูง นำกระแสไฟฟ้าได้ต่ำ และในช่วงที่สองหลังการเบรกคาวนจะมีสภาพต้านทานต่ำ นำกระแสไฟฟ้าได้สูงทันที โดยเมื่อพิจารณาเส้นกราฟตามเงื่อนไข สภาพต้านทาน และการนำกระแสไฟฟ้าในสองช่วงดังกล่าว รวมถึงพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าเบรกคาวนด้วยแล้วนั้น พบว่าเส้นกราฟที่สัดส่วนการเติม Bi₂O₃ : CoO เป็น 1 : 3, 1 : 5 และ 1 : 10 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) มีลักษณะกราฟเป็นไปตามสมบัติที่ดีของวาริสเตอร์ดังกล่าว ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_1 (1 mA/cm²) ถึง J_2 (10 mA/cm²) ในช่วงสนามไฟฟ้าเบรกคาวน E_1 และ E_2 เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้ได้ค่าที่สามารถระบุได้ชัดเจนยิ่งขึ้นว่าสัดส่วนผสมใดดีที่สุดจากการทดลอง โดยแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นจากกราฟลักษณะเฉพาะ J-E ของ ZnO-Bi₂O₃-CoO วาริสเตอร์ ที่ปริมาณการเติม CoO และ Bi₂O₃ ต่างกัน เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C

สารส่วนผสม Bi ₂ O ₃ : CoO (% mole)	สนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V/cm)	สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α)
0.5 : 0.75	165	1.6
0.5 : 1.0	255	2.1
0.5 : 2.0	260	2.2
0.5 : 3.0	610	8.5
1.0 : 1.0	396	4.6
1.0 : 2.0	670	8.2
1.0 : 3.0	635	13.2
1.0 : 5.0	930	16.2
1.0 : 10.0	980	17.6
2.0 : 1.0	350	3.3
2.0 : 2.0	685	5.5
2.0 : 3.0	980	10.5

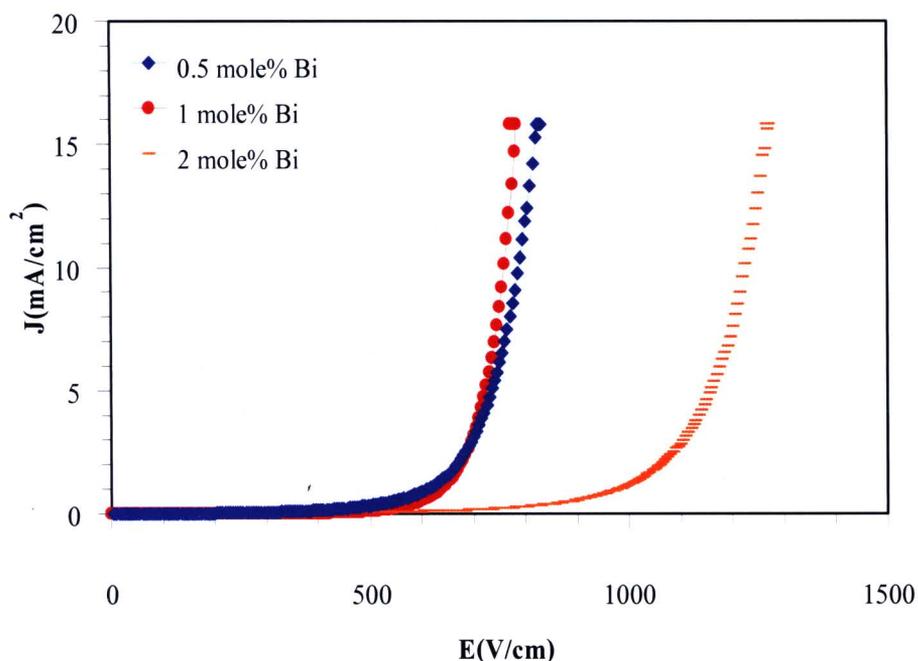
จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์และค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของ ZnO-Bi₂O₃-CoO วาริสเตอร์ที่สัดส่วนการเติม CoO และ Bi₂O₃ ทั้งหมดจากการทดลอง โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าสูงสุด 17.6 และค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ เท่ากับ 980 V/cm ที่สัดส่วนการเติม Bi₂O₃ : CoO เท่ากับ 1 : 10 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นแปรเปลี่ยนกับค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ และความชันของเส้นกราฟในช่วงเบรกดาวน์ และค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่สูงขึ้นนั้น เป็นผลมาจากปริมาณบิสมีทออกไซด์ที่ไปแทรกกระหว่างเกรนของสังกะสีออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของขอบเกรนโตขึ้น ทำให้มีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงขึ้น

จากการทดลองข้างต้น เมื่อทำการแยกพิจารณาเพื่อวิเคราะห์เงื่อนไขการเพิ่มปริมาณสารเติมบิสมีทออกไซด์ที่สูงขึ้น พบว่ามีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ขนาดเกรนเฉลี่ย จำนวนเกรน และความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรนของ ZnO-Bi₂O₃-CoO วาริสเตอร์ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C ที่สัดส่วนของบิสมาทออกไซด์ต่างกัน

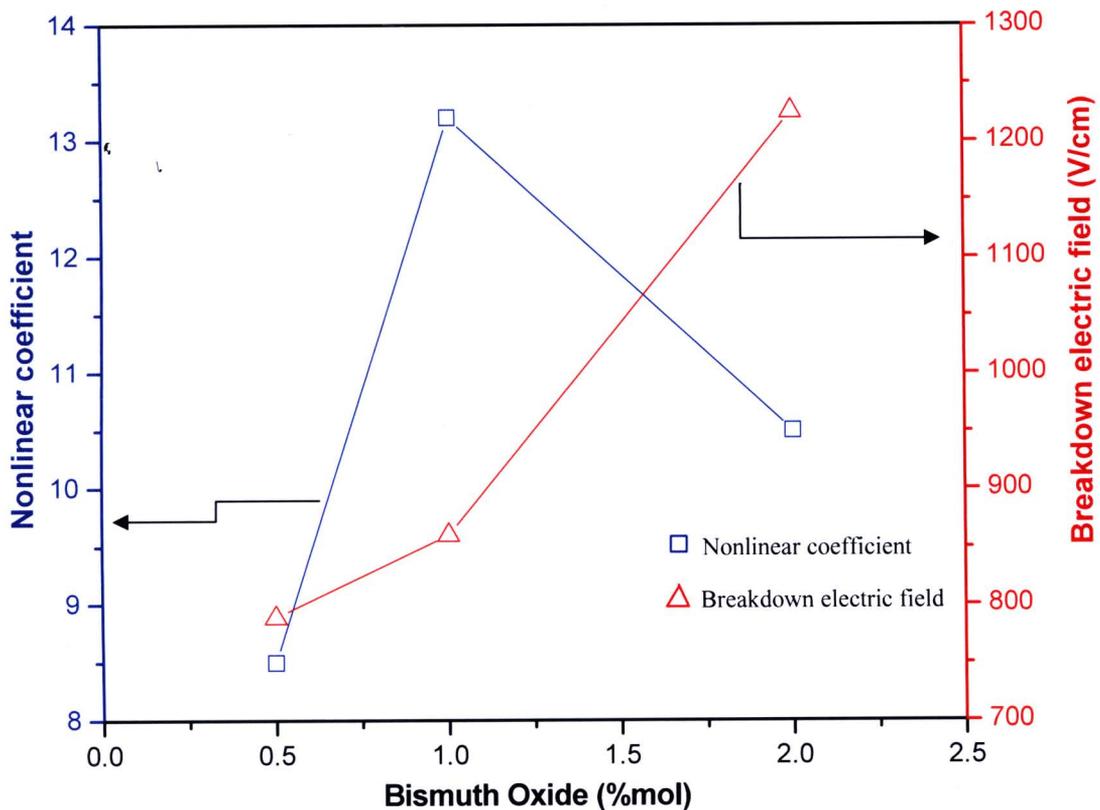
สัดส่วนผสม Bi ₂ O ₃ : CoO (% mole)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	สนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ E_b (V/cm)	ความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรน V_g (V)	จำนวนเกรน	ความต่างศักย์เบรกดาวน์ V_b (V)	สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α)
0.5 : 3	44	610	2.68	46	122.0	8.5
1 : 3	45	635	2.86	45	127.1	13.2
2 : 3	36	980	3.53	56	196.1	10.5

จากตารางที่ 4.6 การเพิ่มปริมาณบิสมาทออกไซด์ที่สูงขึ้น โดยมีปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์เท่าเดิม มีผลทำให้ขนาดของเกรนเฉลี่ยลดลง จำนวนเกรนเพิ่มมากขึ้น และความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวาริสเตอร์ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรนได้ค่าอยู่ในช่วง 2.7-3.5 โวลต์ และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ J-E จากผลของการเพิ่มปริมาณบิสมาทออกไซด์ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วาริสเตอร์ตัวอย่างที่การเติม CoO 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และเพิ่มปริมาณ Bi₂O₃ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 °C

จากรูปที่ 4.8 พบว่าการเพิ่มปริมาณบิสมัทออกไซด์เป็น 2 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน คือ 196.1 โวลต์ ในขณะที่เส้นกราฟที่ปริมาณบิสมัทออกไซด์ 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ใกล้เคียงกันเท่ากับ 122.0 โวลต์ และ 127.1 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์กับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เบรกดาวน์กับสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของ ZnO-Bi₂O₃-CoO วาริสเตอร์ ที่ปริมาณ CoO คงที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีปริมาณสารเติม บิสมัทออกไซด์ 0.5, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตามลำดับ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 °C

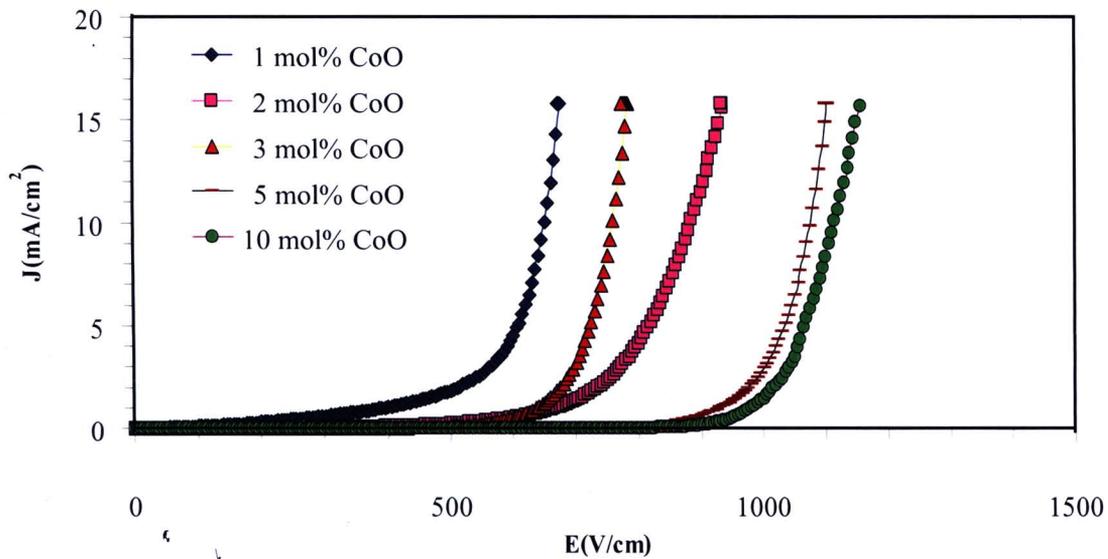
จากรูปที่ 4.9 เมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมบิสมัทออกไซด์มากขึ้น ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์เพิ่มสูงขึ้น แต่ไม่สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นได้ โดยปริมาณบิสมัทออกไซด์ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงสุดอยู่ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล แต่เมื่อพิจารณา

เงื่อนไขการเพิ่มปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ที่สูงขึ้น มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.7

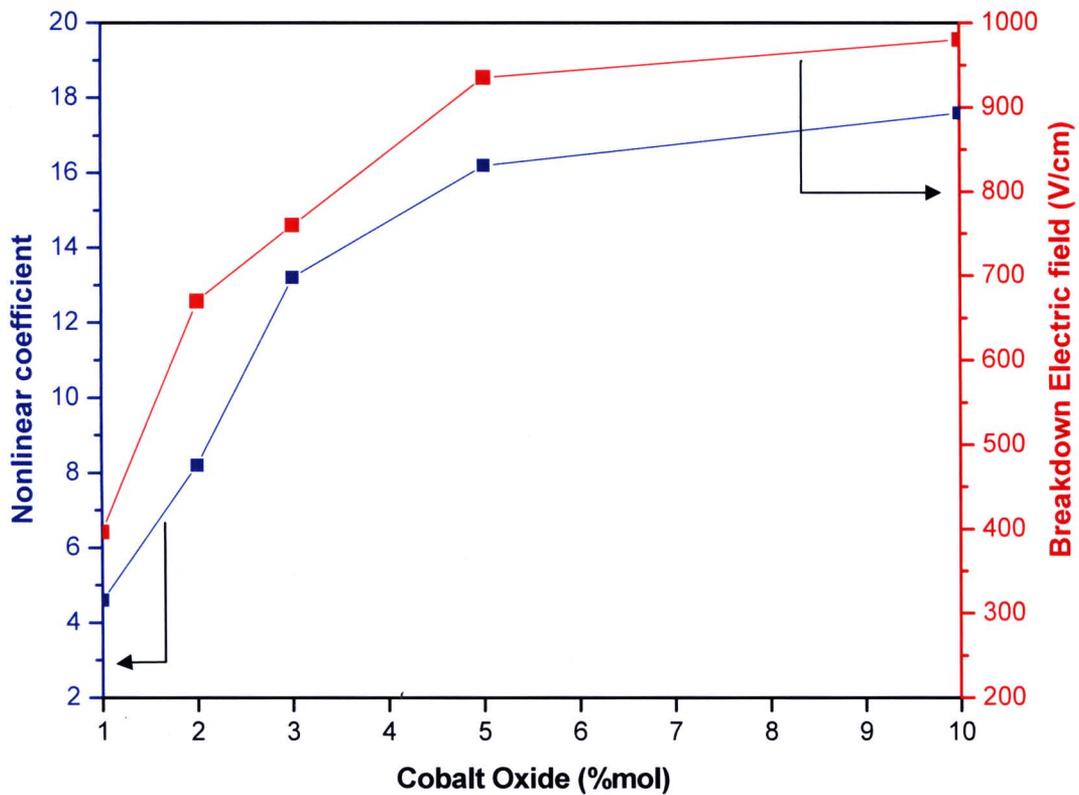
ตารางที่ 4.7 ขนาดเกรนเฉลี่ย จำนวนเกรน และความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวนต่อเกรนของ ZnO-Bi₂O₃-CoO วาริสเตอร์ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C ที่สัดส่วนของโคบอลต์ออกไซด์ต่างกัน 1 – 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

สัดส่วนผสม $\text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{CoO}$ (% mole)	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	สนามไฟฟ้าเบรกดาวน, E_b (V/cm)	ความต่างศักย์เบรกดาวนต่อเกรน V_g (V)	จำนวนเกรน	ความต่างศักย์เบรกดาวน V_b (V)	สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α)
1 : 1	47	396	1.86	42	79.2	4.6
1 : 2	46	670	3.08	43	134	8.2
1 : 3	45	635	2.86	45	127.1	13.2
1 : 5	38	930	3.55	53	186	16.2
1 : 10	21	980	2.07	95	196	17.6

จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการเพิ่มปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ที่สูงขึ้นมีผลทำให้ขนาดของเกรนเฉลี่ยเล็กลงอย่างชัดเจน ความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวนจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวาริสเตอร์ และค่าความต่างศักย์เบรกดาวนต่อเกรนสูงสุดที่ 3.55 โวลต์ ในเงื่อนไขที่ปริมาณ Bi₂O₃ และ CoO เท่ากับ 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตามลำดับ และกราฟความสัมพันธ์ J-E จากผลของการเพิ่มปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ ได้กราฟดังรูปที่ 4.10 และ 4.11

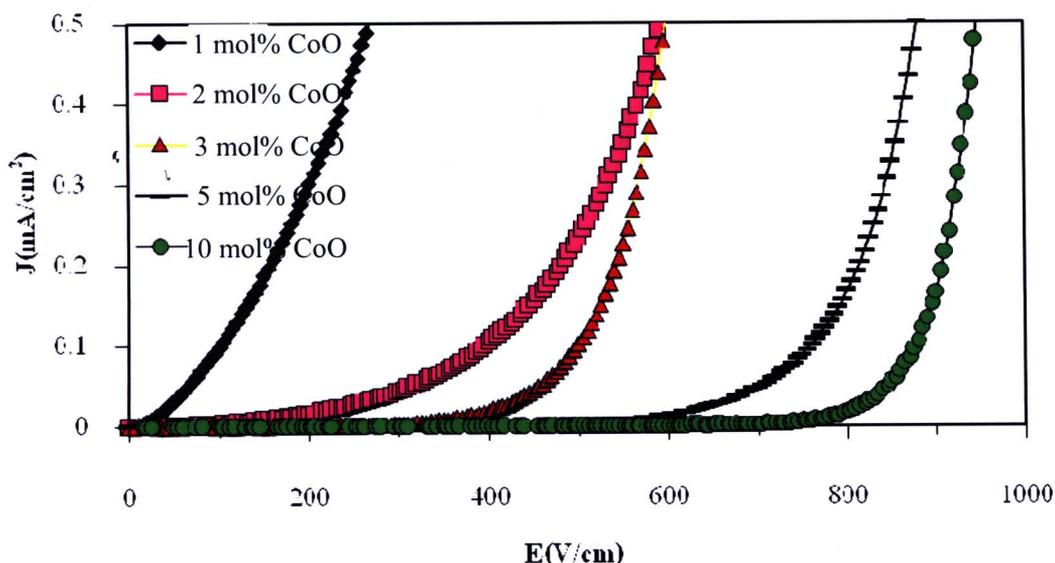


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของวาริสเตอร์ที่ส่วนผสม Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่การเติม CoO ต่างกัน เมื่อเผาซินเตอร์ที่ $1,100^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์กับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของวาริสเตอร์ที่ปริมาณ Bi_2O_3 คงที่ 2 เปอร์เซ็นต์โดยโมลและเพิ่มปริมาณสารเติมโคบอลต์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ $1,100^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อเพิ่มปริมาณ CoO พบว่าวาริสเตอร์ตัวอย่างที่ได้มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน นั่นคือการที่ปริมาณ โคบอลต์ออกไซด์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้วาริสเตอร์แสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาช่วงของกราฟที่น่ากระแสน้อยๆ หรือช่วงที่มีสภาพต้านทานสูงในกราฟรูปที่ 4.10 โดยทำการขยายสเกลของกราฟ ได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟขยายสเกลความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของวาริสเตอร์ที่ส่วนผสม Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่การเติม CoO ต่างกัน

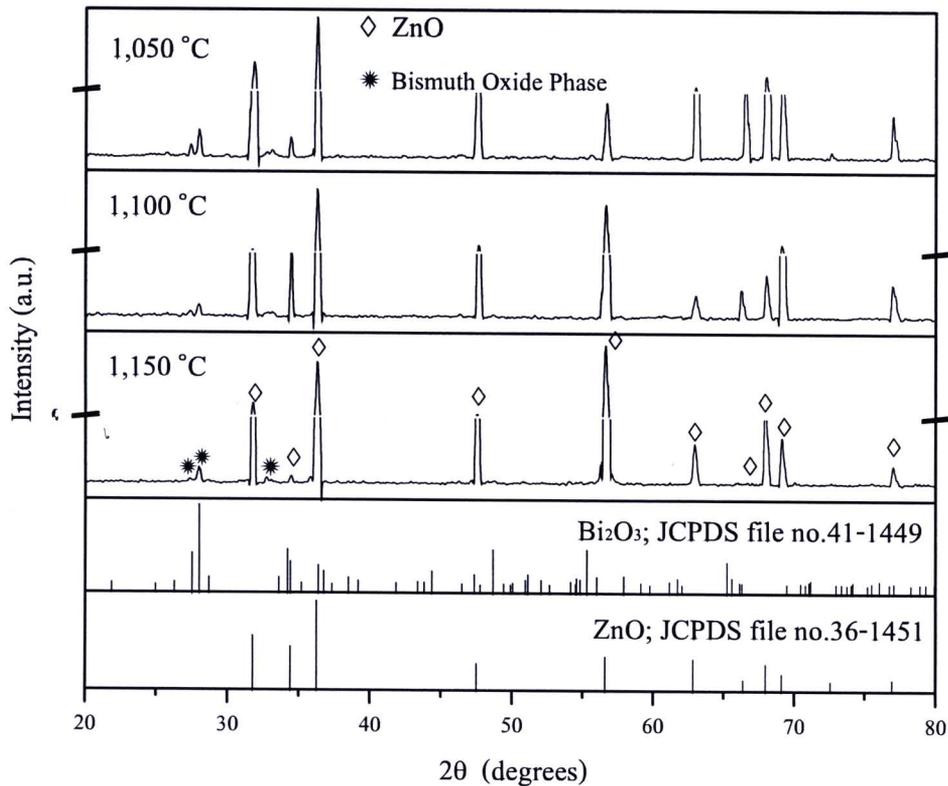
จากรูปที่ 4.12 เมื่อทำการขยายสเกลของกราฟในช่วง J ตั้งแต่ $0 - 0.5 \text{ mA/cm}^2$ ที่มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูงๆ พบว่าวาริสเตอร์ตัวอย่างที่ได้มีสภาพความต้านทานสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารเติมโคบอลต์ออกไซด์มากขึ้น หากพิจารณาถึงกระแสรั่วไหลในช่วงที่ความต่างศักย์ต่ำกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ แสดงให้เห็นว่าการเติมโคบอลต์เป็นผลทำให้ค่าความต้านทานในเกรนของสังกะสีออกไซด์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24,25] เมื่อศึกษาอิทธิพลของการเติม CoO ที่มีต่อสมบัติของสังกะสีออกไซด์ ซึ่งพบว่าอะตอมของโคบอลต์แทนที่ในตำแหน่งของสังกะสีและทำให้เซรามิกส์ที่ได้มีสภาพความต้านทานสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงขึ้นเช่นกัน โดยชัดเจนที่ปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคจากเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

จากการวิเคราะห์สมบัติของวาริสเตอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นในงานวิจัยนี้กับอิทธิพลที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความเป็นวาริสเตอร์ที่ดีแล้วนั้น ในงานวิจัยนี้ได้หาเหตุผลในเชิงโครงสร้างทางจุลภาค เพื่ออธิบายรายละเอียดที่มีผลทำให้วาริสเตอร์แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหล่านั้นออกมาได้ จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างดังกล่าวด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อดูความเป็นโครงสร้างผลึกของสารผสมและเฟสต่างๆ ของสารประกอบเพื่อการอธิบายที่สอดคล้องและยืนยันผลการทดลองที่เกิดขึ้น โดยจะพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างผลึก ผลของปริมาณการเติมบิสมัทออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ที่มีต่อโครงสร้างผลึก

4.6.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างผลึก

เมื่อนำเม็ดสารตัวอย่างที่ได้จากการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคโดยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แล้วนำกราฟที่ได้มาเปรียบเทียบกับลักษณะของเฟสต่างๆ กับกราฟมาตรฐาน (JCPDS; Joint Committee on Power Diffraction Standard) เพื่อหาตำแหน่งของสารประกอบต่างๆ ในวาริสเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

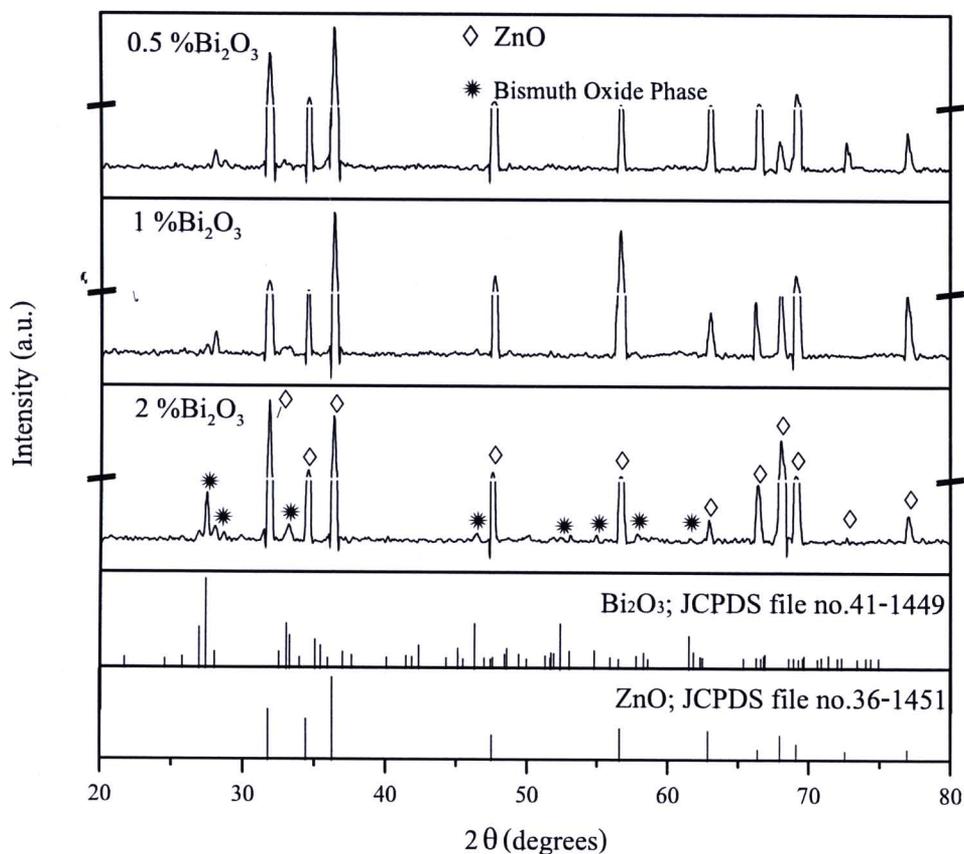


รูปที่ 4.13 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO-Bi₂O₃-CoO วาริสเตอร์ที่สัดส่วน Bi₂O₃ : CoO เท่ากับ 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C

จากรูปที่ 4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงถึงโครงสร้างผลึกของวาริสเตอร์ที่พบในวาริสเตอร์จากการสังเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ กัน ซึ่งพบเฟสของ ZnO ที่เป็นเฟสหลักได้อย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณที่มากกว่า ส่วนตำแหน่งของ Bi₂O₃ จะพบเฟสในปริมาณเล็กน้อย เมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่อุณหภูมิต่างกันเฟสของบิสมัทออกไซด์จะชัดเจนที่อุณหภูมิต่ำ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [19,20,26-27] เพราะบิสมัทออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำจะหายไปจากการระเหย ซึ่งบิสมัทออกไซด์นั้นเป็นสารเจือหลักที่ทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนไฟฟ้า ทำให้แสดงความเป็นวาริสเตอร์ที่ดีได้

4.6.2 ผลของปริมาณการเติมสาร Bi_2O_3 ที่มีต่อโครงสร้างผลึก

สารตัวอย่างที่ปริมาณการเติมบิสมัทออกไซด์มากขึ้น และวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14

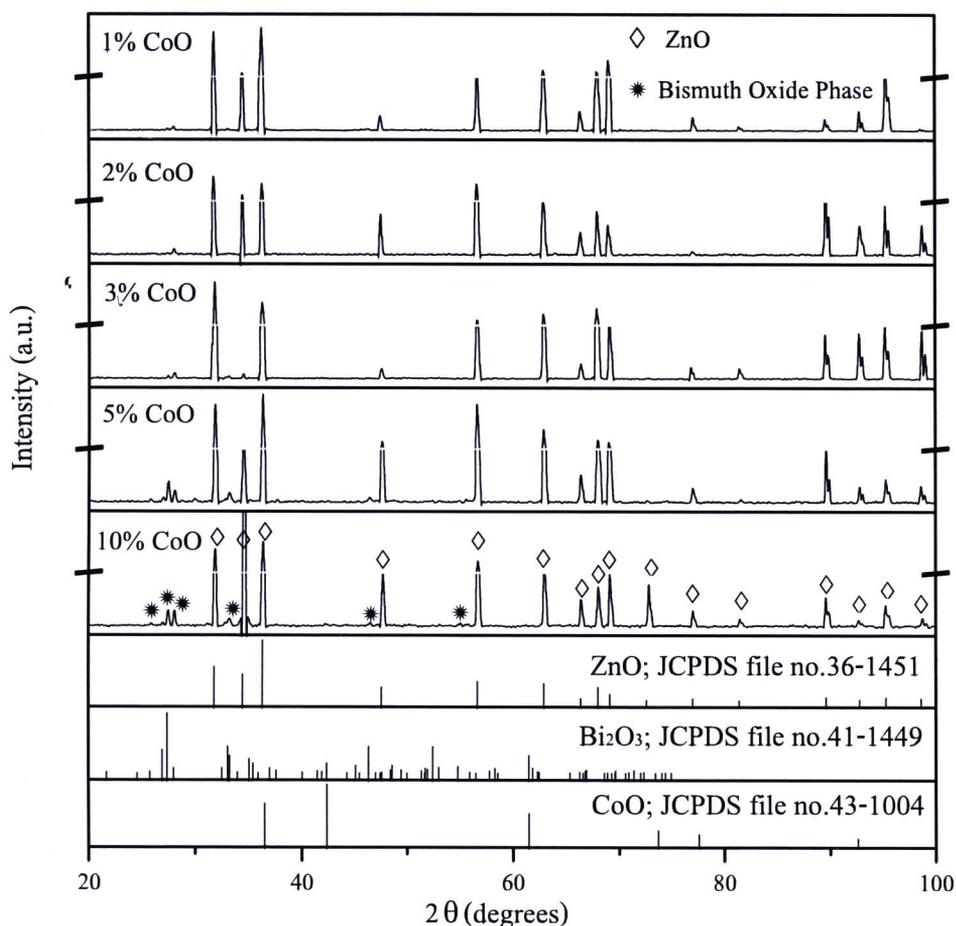


รูปที่ 4.14 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO- Bi_2O_3 -CoO วาริสเตอร์เฟอซิโนเตอร์ที่อุณหภูมิ $1,100\text{ }^\circ\text{C}$ ที่ปริมาณการเติม CoO 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ Bi_2O_3 ต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 เมื่อเพิ่มปริมาณของ Bi_2O_3 มากขึ้น ทำให้เฟสของบิสมัทออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าเฟสของบิสมัทออกไซด์จะชัดเจนที่สุดที่ปริมาณ Bi_2O_3 2 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

4.6.3 ผลของปริมาณการเติมสาร CoO ที่มีต่อโครงสร้างผลึก

สารตัวอย่างที่ปริมาณการเติมโคบอลต์ออกไซด์มากขึ้น และวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO-Bi₂O₃-CoO วาริสเตอร์ ที่ Bi₂O₃ 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ปริมาณการเติม CoO ต่างกัน เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C

จากรูปที่ 4.15 แสดงตำแหน่งเฟสของ ZnO, Bi₂O₃ และ CoO ที่พบในวาริสเตอร์ภายใต้ส่วนผสมของ CoO ต่างๆ กัน เมื่อพิจารณาเงื่อนไขดังกล่าว พบว่าเฟสของบิสมาทออกไซด์จะชัดเจนมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CoO มากขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อพิจารณาตามตารางที่ 4.6 เช่นกัน ทำให้สารแสดงความเป็นวาริสเตอร์ที่ดีได้ที่ปริมาณ CoO มากขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่า การเติม CoO ลงใน ZnO ช่วยลดการสูญเสียของ Bi₂O₃ เพราะ CoO จะลดอัตราการโตของผลึก ZnO ทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนของ ZnO มีพื้นที่ผิวจำนวนมากให้ Bi₂O₃ อยู่ และความสามารถในการเปียกผิวของเกรน ZnO จะยึด Bi₂O₃ ไว้ระหว่างเกรน จากผลของการบอนด์

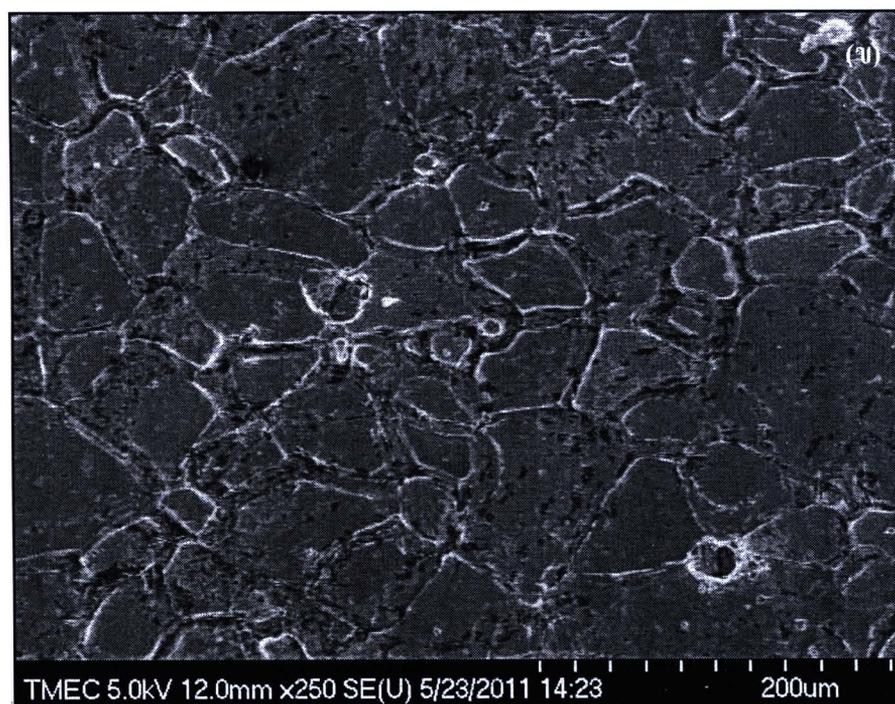
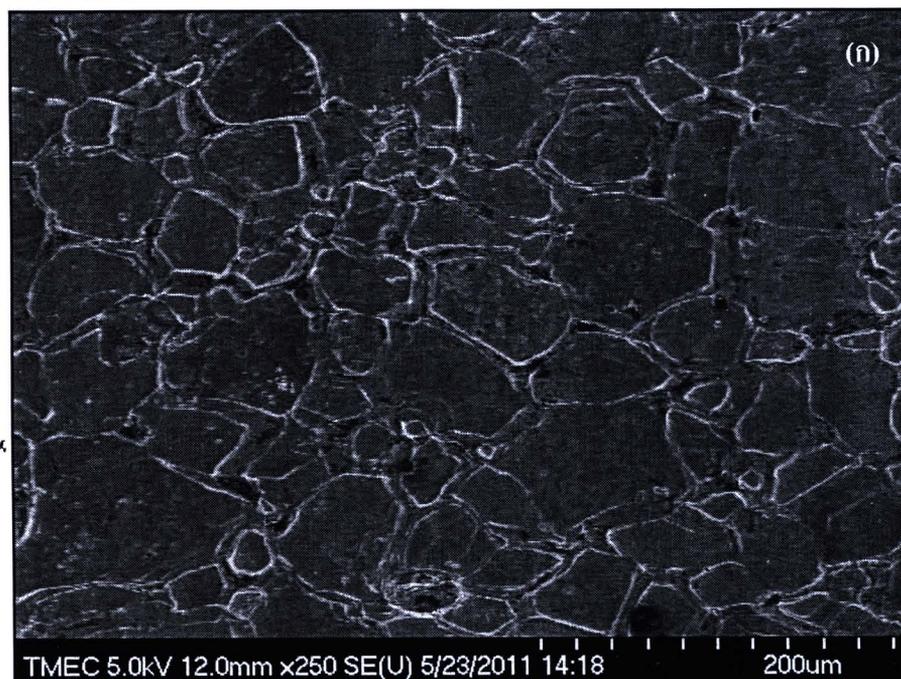
(bonding) ที่สูง เพราะ Bi_2O_3 เปียกผิว ZnO ได้ดี ทำให้การสูญเสีย Bi_2O_3 จากการระเหยออกเกิดขึ้น น้อยลง เพราะพลังงานพื้นผิว (surface energy) ระหว่างเกรนเป็นตัวยึดไว้ทำให้ตัวอย่างมีความพรุน น้อยลง และส่งผลทำให้ตัวอย่างมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น

4.7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมโคบอลต์ออกไซด์

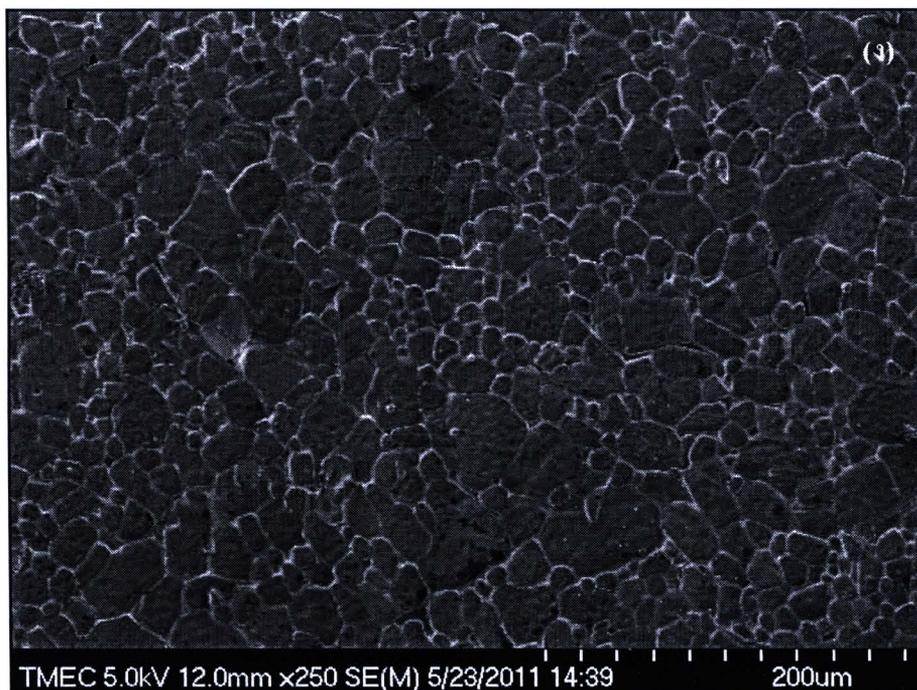
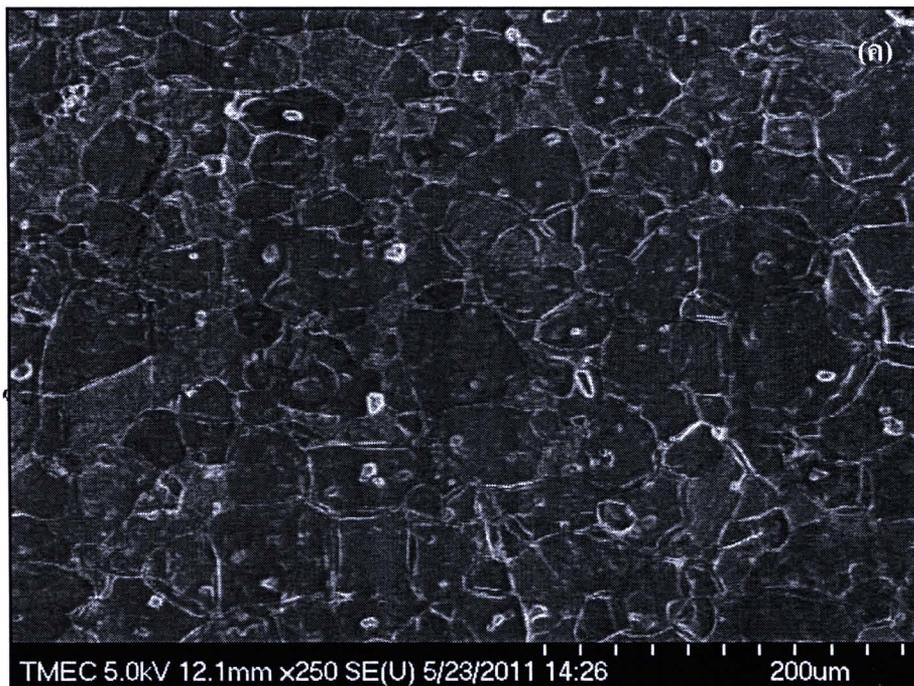
ในงานวิจัยได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคทางภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยศึกษาลักษณะของเกรน ขนาดของเกรน และขนาดของขอบเกรนที่มีสารเจือผสมอยู่ เพื่ออธิบายสมบัติทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์ได้ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สนใจผลของการเติมสารโคบอลต์ออกไซด์ที่มากขึ้นมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงขึ้น โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองบริเวณ คือ บริเวณพื้นผิว และบริเวณภายในเม็ดสารตัวอย่าง

4.7.1 วิเคราะห์ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมโคบอลต์ออกไซด์

จากเม็ดสารตัวอย่างที่ได้นำไปวิเคราะห์ภาพโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณพื้นผิว โดยใช้หลักการ Secondary Electron ทำให้ได้ภาพ Secondary Electron Image (SEI) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะของเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ภาพบริเวณพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์ $1,100^{\circ}\text{C}$ สัดส่วน Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีสัดส่วน CoO (ก) 1 (ข) 3 (ค) 5 และ (ง) 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล



รูปที่ 4.16 (ต่อ) ภาพบริเวณพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่อุณหภูมิ
 เคาซินเตอร์ 1,100 °C สัดส่วน Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีสัดส่วน CoO
 (ก) 1 (ข) 3 (ค) 5 และ (ง) 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

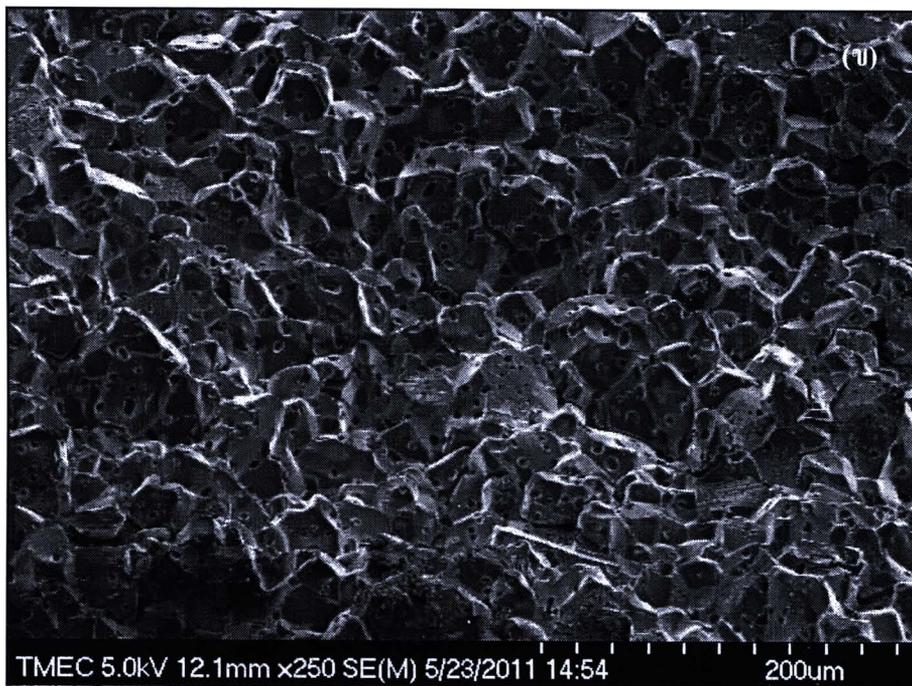
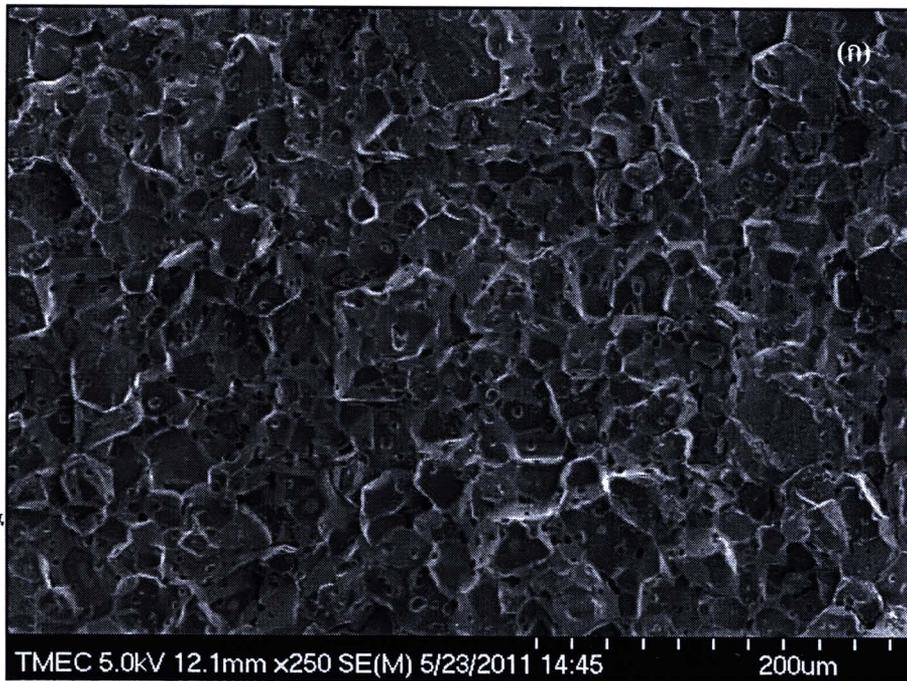
จากรูปที่ 4.16 แสดงภาพบริเวณพื้นผิวของเม็ดสารตัวอย่างที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์ $1,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ สัดส่วนผสม Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และสัดส่วนผสมของ CoO ที่แตกต่างกัน จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของ CoO เพิ่มมากขึ้น มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค ทั้งขนาดของเกรน ขนาดขอบเกรน จำนวนเกรนต่อพื้นที่ และความเป็นระเบียบของเกรนที่เปลี่ยนไป คือ เมื่อพิจารณาขนาดของเกรนเฉลี่ย และขนาดขอบเกรนจะสังเกตว่ามีขนาดที่เล็กลงเมื่อปริมาณ CoO เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งความเป็นระเบียบของเกรนจากภาพก็เพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ CoO โดยที่ปริมาณ CoO เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ให้ภาพที่มีความเป็นระเบียบของเกรนมากที่สุด จำนวนเกรนต่อหน่วยพื้นที่มากที่สุด และมีขนาดเกรนเฉลี่ยเล็กที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นเหตุผลสอดคล้องกับการอธิบายเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีของวาริสเตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

CoO ที่ใส่ใน ZnO จะละลายตัวในโครงสร้างของ ZnO ซึ่งเป็นเฮกซะโกนอล (Hexagonal) แม้ CoO จะมีโครงสร้างปกติเป็นคิวบิก (Cubic) แต่เมื่อละลายใน ZnO จะเป็นโครงสร้างเฮกซะโกนอล และขนาดอะตอมของโคบอลต์เล็กกว่าซิงค์ ประมาณ 10 % ทำให้เมื่อละลายตัวจะเกิดสเตรส (stress) ในโครงสร้างผลึก และทำให้เกรนเกิดการขยายตัวได้ยาก จึงทำให้เมื่อเติม CoO 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เกรนของ ZnO จะมีขนาดเล็กมากทำให้ Bi_2O_3 มีพื้นที่ระหว่างเกรนอยู่ได้มาก และไม่ระเหยออกมากในกระบวนการเผาซินเตอร์

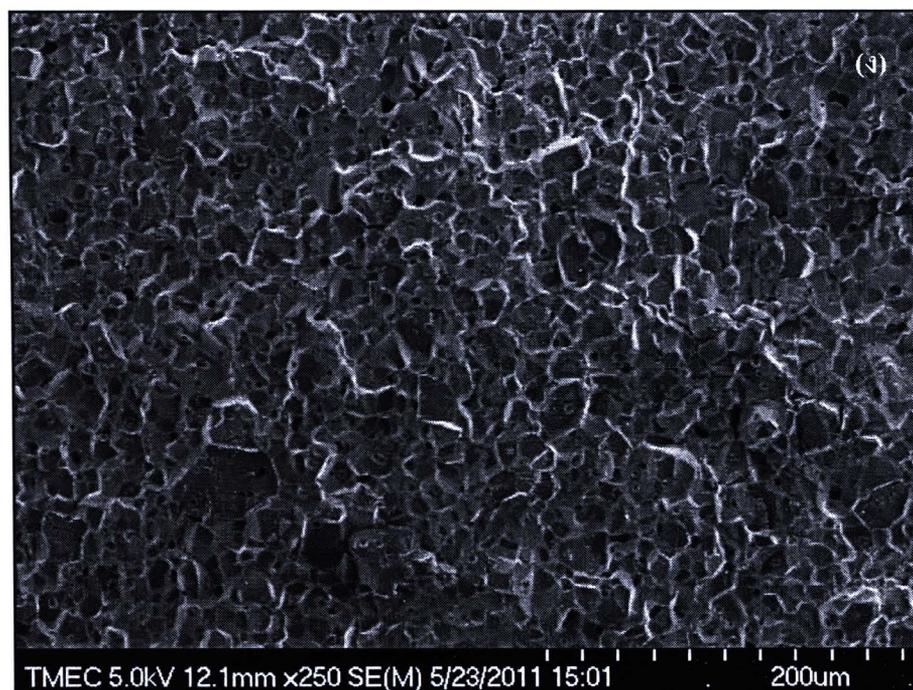
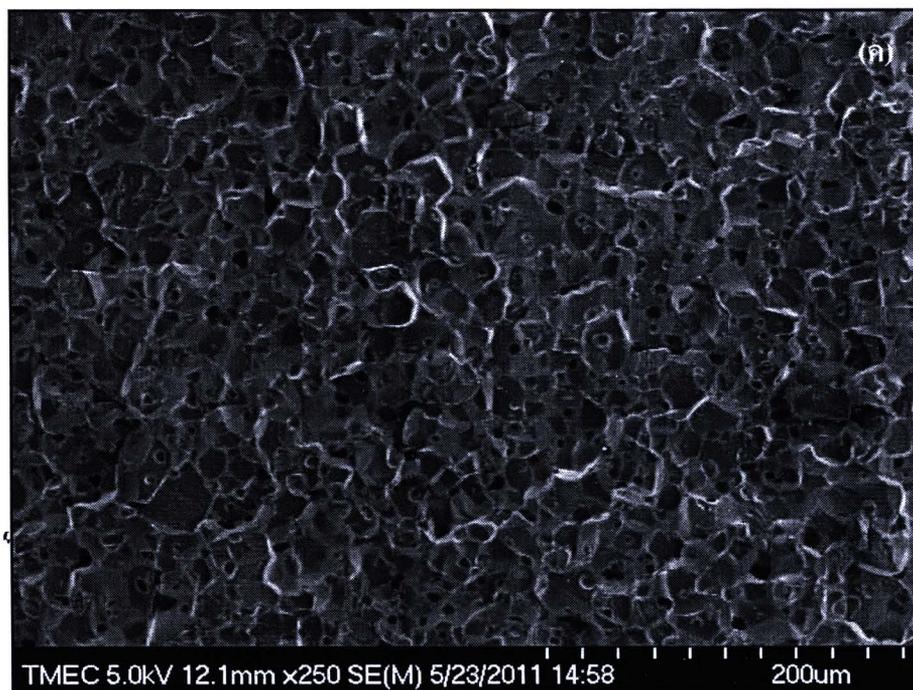
4.7.2 วิเคราะห์รูพรุนภายในเม็ดสารจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมโคบอลต์ออกไซด์

จากเม็ดสารตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง เมื่อพิจารณาภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในลักษณะของรูพรุนภายในเม็ดสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ภาพโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณภายในชิ้นงานจากการหักเม็ดสาร โดยใช้หลักการ Secondary Electron ทำให้ได้ภาพ Secondary Electron Image (SEI) ที่กำลังขยาย 250 เท่าเช่นกัน เพื่อศึกษาลักษณะของความพรุนภายในเม็ดสาร ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ภาพแสดงรูพรุนภายในเม็ดสารจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่อุณหภูมิ
 ซินเตอร์ 1,100 °C สัดส่วน Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีสัดส่วน CoO (ก) 1 (ข) 3
 (ค) 5 และ (ง) 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล



รูปที่ 4.17 (ต่อ) ภาพแสดงรูพรุนภายในเม็ดสารจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C สัดส่วน Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีสัดส่วน CoO (ก) 1 (ข) 3 (ค) 5 และ (ง) 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

จากรูปที่ 4.17 เป็นภาพแสดงลักษณะความพรุนภายในของเม็ดสารตัวอย่างที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์ $1,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ สัดส่วนผสม Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และสัดส่วนผสมของ CoO ที่แตกต่างกันจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของ CoO ที่เพิ่มมากขึ้นมีผลต่อความพรุน ขนาดรูพรุน และความเป็นระเบียบของเนื้อสาร ซึ่งบ่งบอกถึงความหนาแน่นของสารตัวอย่างได้ คือ จากการพิจารณาขนาดและจำนวนของรูพรุน พบว่ามีปริมาณที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ CoO มากขึ้น นั่นหมายถึงค่าความหนาแน่นของสารที่มีมากขึ้นนั่นเอง อีกทั้งความเป็นระเบียบของเนื้อสารก็มีมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CoO มากขึ้น โดยที่ปริมาณ CoO เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลให้ภาพที่มีความเป็นระเบียบของเนื้อสารมากที่สุด และมีความพรุนของเนื้อสารน้อยที่สุด ซึ่งเป็นเหตุผลยืนยันเกี่ยวกับความหนาแน่นสารที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีของวาริสเตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเช่นกัน