บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

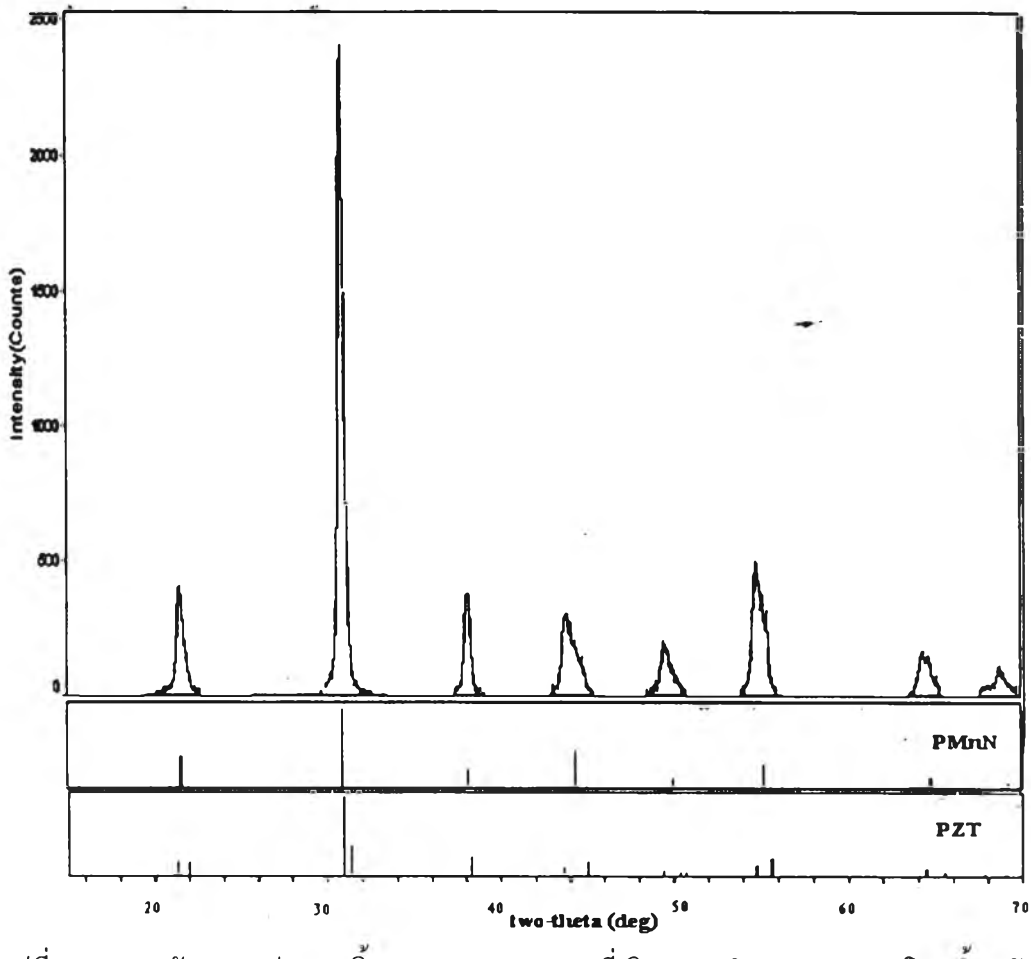
สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1 ผลการวิเคราะห์เฟส

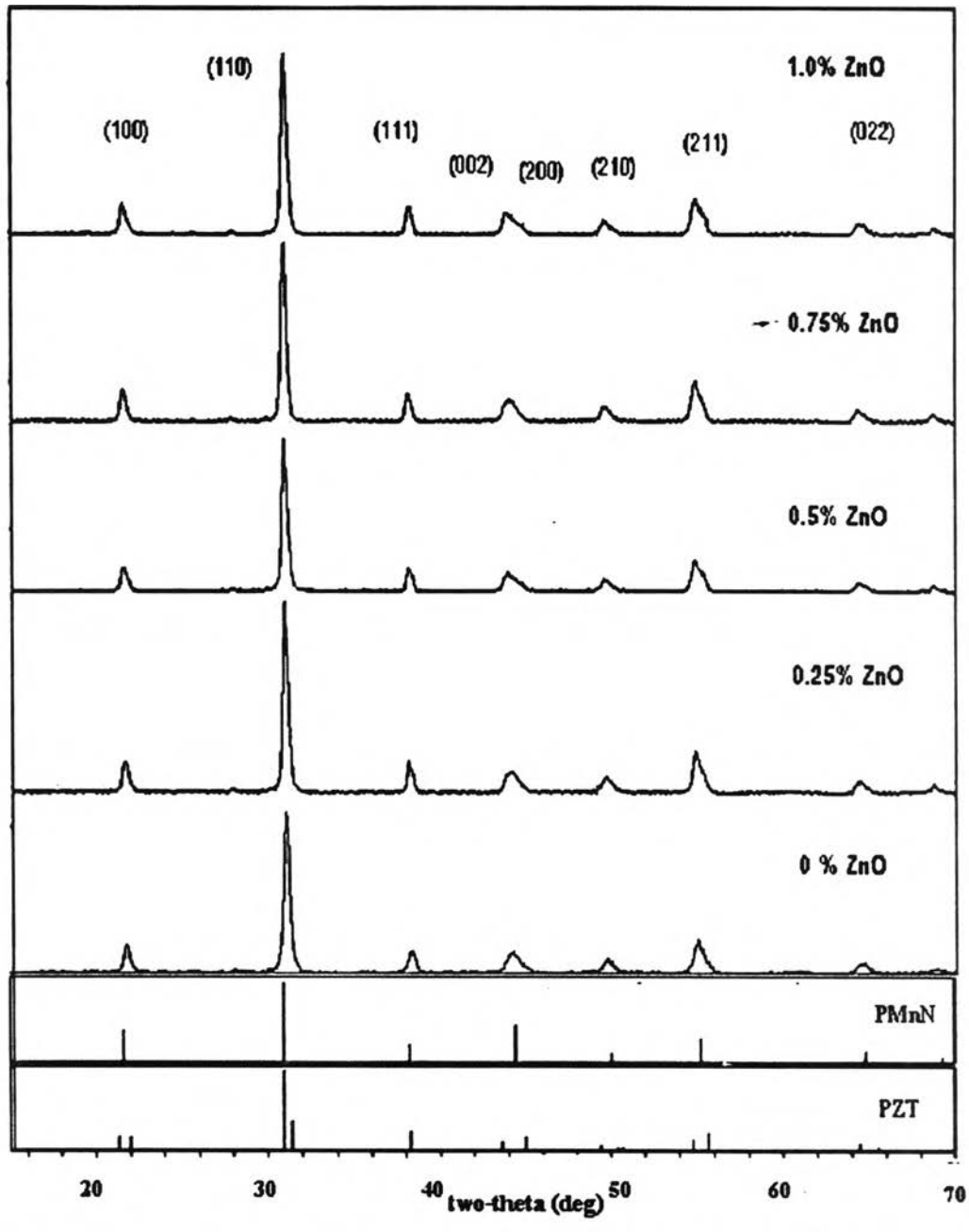
จากผลของการวิเคราะห์ลักษณะเฟสของชิ้นงานโดยพิจารณาจากพีคของสารประกอบที่สังเคราะห์ได้และผ่านการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบว่าพีคที่ได้จะเป็นลักษณะที่เป็นเฟสของโครงสร้างแบบเตตระโกนอลซึ่งเป็นลักษณะของเฟสพอรอพไกท์แสดงดังรูปที่ 4.1

จากรูปแสดงถึงเฟสหรือลักษณะของโครงสร้างของชิ้นงาน PMnN – PZT ที่ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส และรูปที่ 4.2 ที่แสดงลักษณะเฟสของชิ้นงานที่เติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน และซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาพีคจะพบว่าพีคที่เกิดขึ้นได้แก่ พีค (100), (110), (111), (002), (200),(210), (211),(022) ซึ่งเป็นลักษณะของพีคที่มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอลหรือเป็นลักษณะโครงสร้างเพอรอพสไกท์ที่แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกทั้งหมด และไม่พบว่ามีเฟสที่สอง (second phase) เกิดขึ้น

จากการเปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์กับชิ้นงานที่มีการเติมในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของซิงค์ออกไซด์มากขึ้นจะไม่มีผลต่อเฟสของชิ้นงานที่ยังคงแสดงลักษณะของเฟสที่มีสมบัติที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกเหมือนกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ ดังนั้นแล้วผลที่ได้จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าสารซิงค์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปเพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ชิ้นงาน PMnN-PZT ไม่มีผลต่อลักษณะเฟส หรือโครงสร้างของชิ้นงาน PMnN – PZT ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปมีปริมาณน้อยจึงไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของชิ้นงานหรืออาจเป็นไปได้ว่า Zn^{2+} ที่อยู่ในซิงค์ออกไซด์ ที่มีขนาดของรัศมีไอออน (ionic radius) เท่ากับ 0.74 อังสตรอม ซึ่งใกล้เคียงกับรัศมีไอออนของธาตุที่อยู่ในตำแหน่ง B ของโครงสร้าง ABO_3 คือ Zr^{+4} ที่มีขนาดรัศมีไอออนเท่ากับ 0.72 อังสตอม ทำให้โครงสร้างของชิ้นงานไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะตรงกับงานวิจัยที่เคยศึกษาถึงผลของการลดอุณหภูมิซินเทอร์ของสารเพียโซอิเล็กทริกในกลุ่ม $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$-$PbZrO_3$ (PNN-PZT) โดยการใช้ ZnO เป็นสารช่วยลดอุณหภูมิ [17]



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะเฟสของชิ้นงาน PMnN – PZT ที่เติม ZnO จำนวน 0.25 % โดยน้ำหนัก และผ่านการซินเทอร์ที่ 1000 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะเฟสของสารประกอบ PMnN – PZT ที่มีปริมาณของ ZnO ที่แตกต่างกันและผ่านการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (microstructure)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติม ZnO และอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างต่างกันโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.3 - 4.6 และเมื่อนำขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยมาพิจารณาและพล๊อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนและปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปได้ผลดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

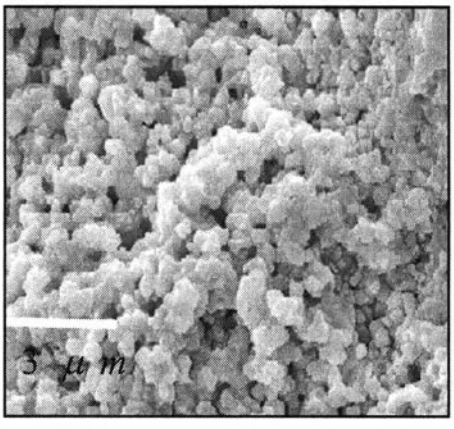
พิจารณาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรนของชิ้นงาน PMnN – PZT ที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์เข้าไปเพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ให้ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ไม่ได้เติมซิงค์ออกไซด์กับชิ้นงานที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณตั้งแต่ 0.25 % - 1 % โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อมีการเติมซิงค์ออกไซด์เข้าไปลักษณะเกรนของชิ้นงานจะมีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมซิงค์ออกไซด์และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดที่โตขึ้นเมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นดังนั้นจากผลการวิเคราะห์จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ชิ้นงาน PMnN – PZT จะทำให้ขนาดของเกรนของชิ้นงานที่มีขนาดที่โตขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิซินเทอร์พบว่าที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่สูงกว่าจะมีแนวโน้มของขนาดเกรนที่โตกว่าการซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่ำ จากผลการวิจัยจะพบว่าเมื่อมีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ซิงค์ออกไซด์เข้าไปในชิ้นงาน PMnN – PZT และซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ถึง 1050 องศาเซลเซียส ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจะเหมือนกับชิ้นงาน PMnN – PZT ที่ไม่ได้เติมสารช่วยลดอุณหภูมิซินเทอร์ และซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิปกติในการซินเทอร์สาร PMnN – PZT ให้มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่ดี

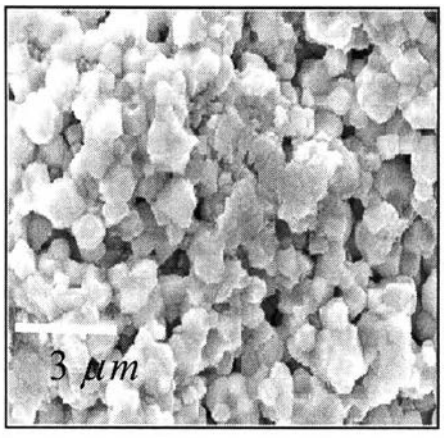
เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและขนาดเกรนของชิ้นงานจากผลที่ได้ อาจจะเป็นไปได้ว่าเมื่อมีการเติมสารช่วยซินเทอร์ซิงค์ออกไซด์เข้าไปในชิ้นงาน PMnN – PZT เนื่องจาก Zn^{2+} ซึ่งมีขนาดของรัศมีไอออนใกล้เคียงกับ Zr^{4+} ที่อยู่ในตำแหน่ง B ของโครงสร้างเพอร์รอพสไกด์ ABO_3 เข้าไปแทนที่ Zr^{4+} ทำให้ให้ประจุหายไป +2 และเกิดช่องว่าง (vacancy defect) ขึ้นดังสมการ

$$ZnO \xrightarrow{ZrO_2} Zn''_{Zr} + V_O^{\bullet\bullet} + O_O^x$$

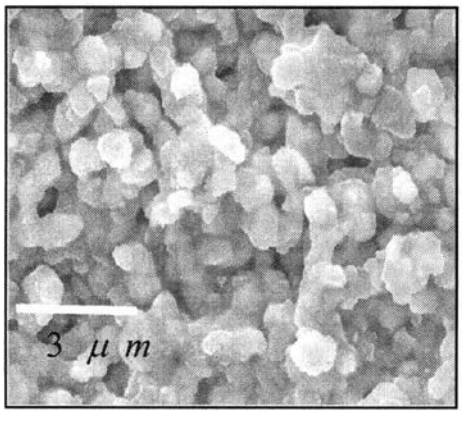
และรูปที่ 4.8 ซึ่งการเกิดช่องว่างนี้เองจะเป็นตัวที่ไปเร่งอัตราการแพร่ (diffusion rate) ของอะตอมในชิ้นงานให้เกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดกระบวนการในการซินเทอร์ที่เร็วขึ้นทำให้ขนาดเกรนของชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นตามมาด้วย



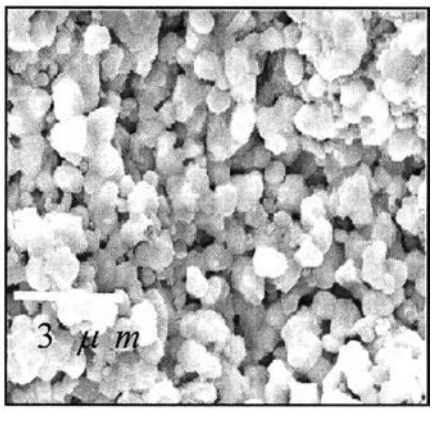
(a) 0 Wt % ZnO



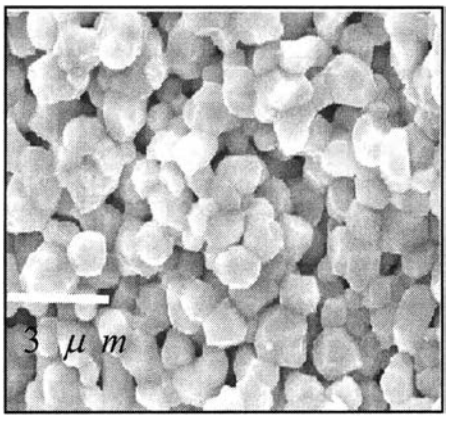
(b) 0.25 Wt % ZnO



(c) 0.50 Wt % ZnO

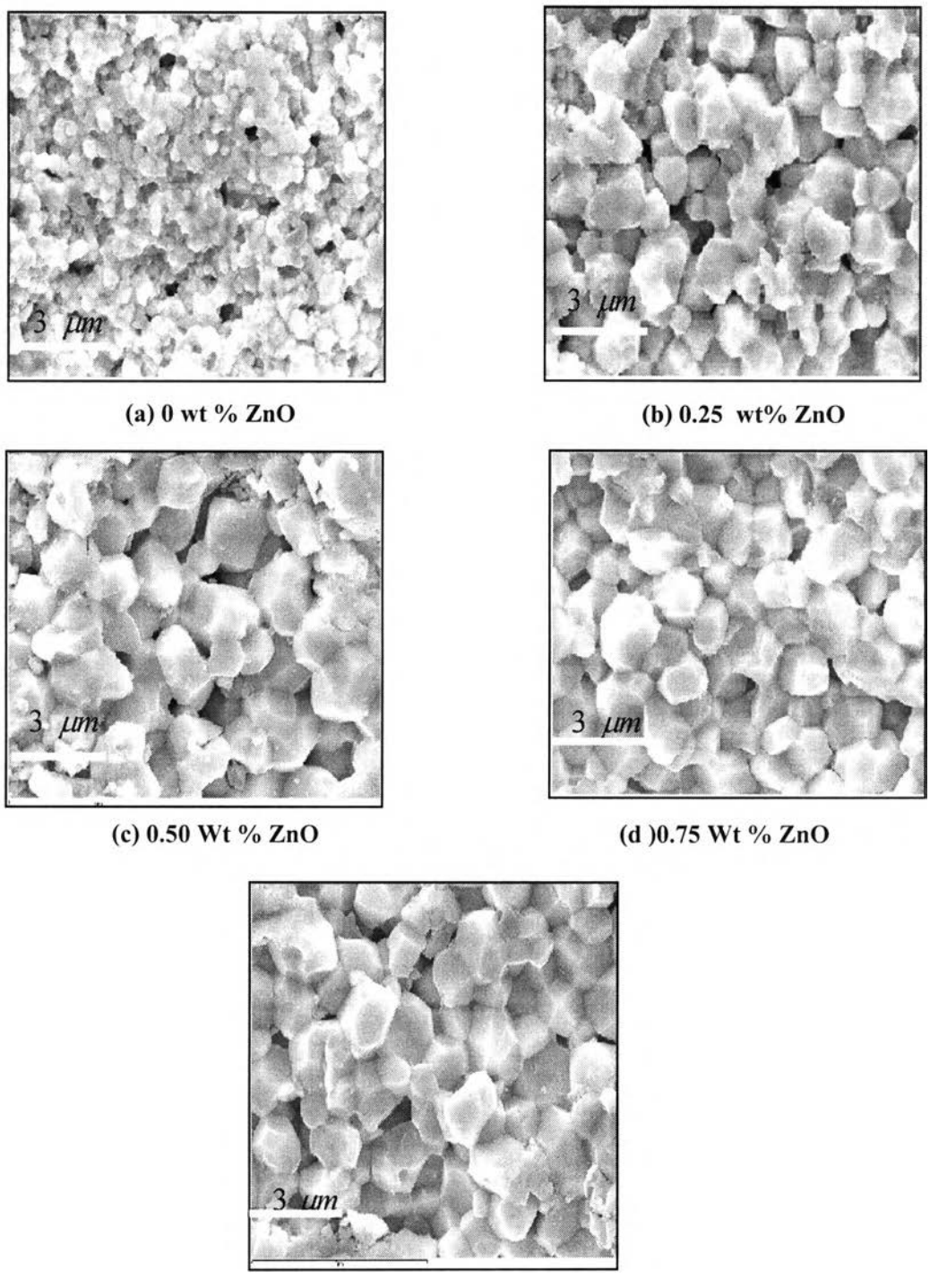


(d) 0.75 Wt % ZnO



(e) 1 **Wt % ZnO**

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกันเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

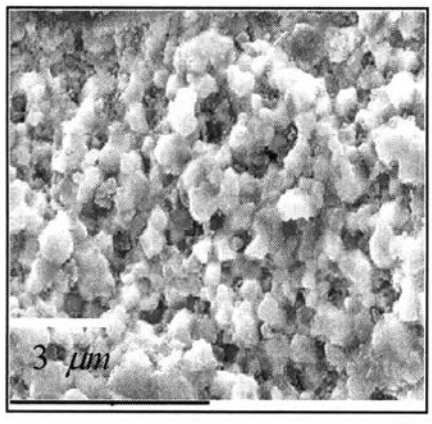


(a) 0 wt % ZnO **(b) 0.25 wt% ZnO**

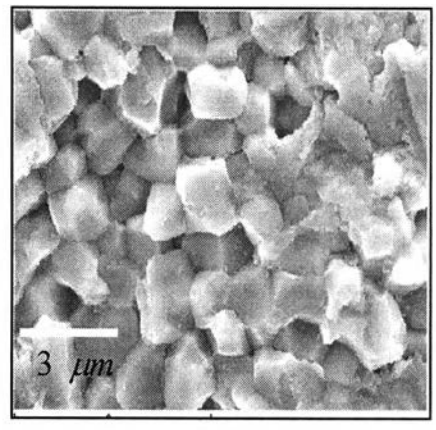
(c) 0.50 Wt % ZnO **(d)0.75 Wt % ZnO**

(e) 1 wt% ZnO

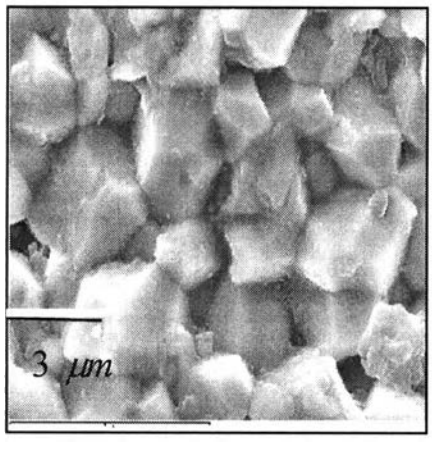
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกันเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



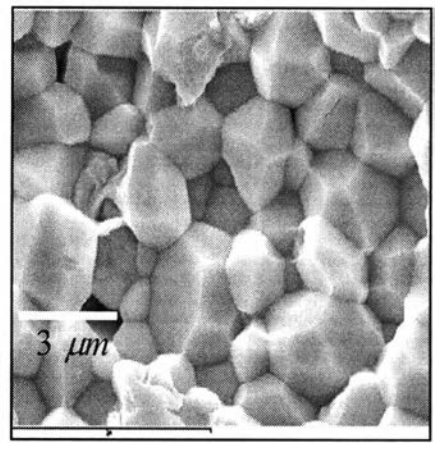
(a) 0 wt% ZnO



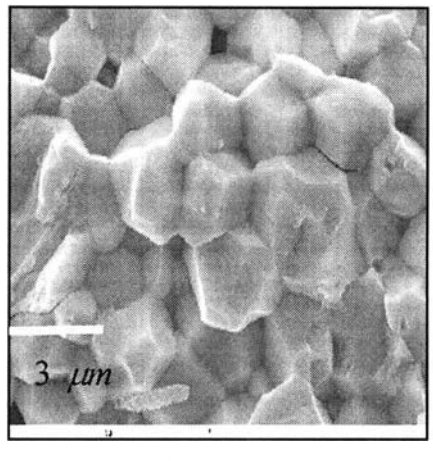
(b) 0.25 wt% ZnO



(c)0.5 wt% ZnO

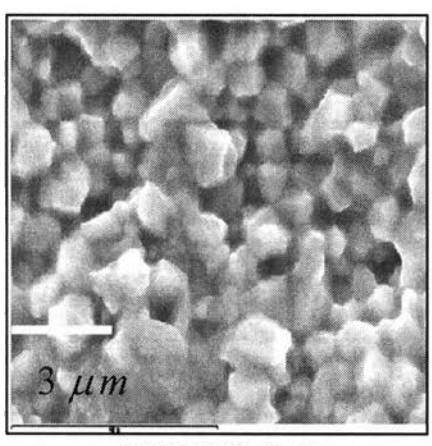


(d) 0.75 wt% ZnO

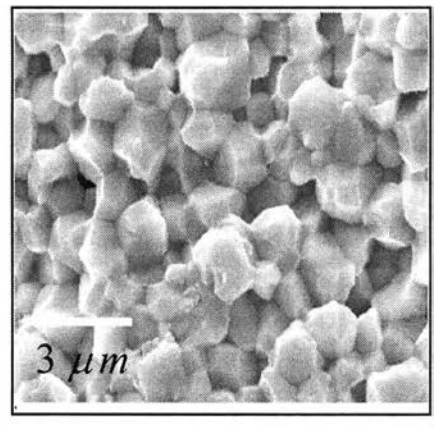


(e) 1 wt% ZnO

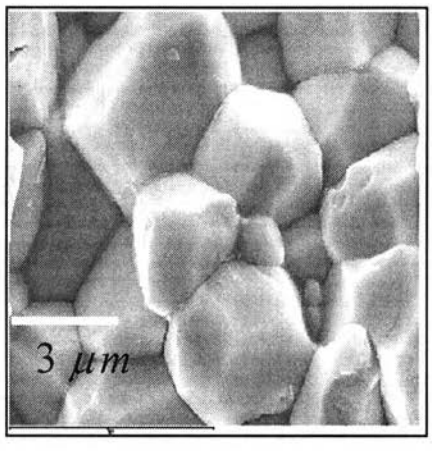
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการ ซินเทอร์ ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกันเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส



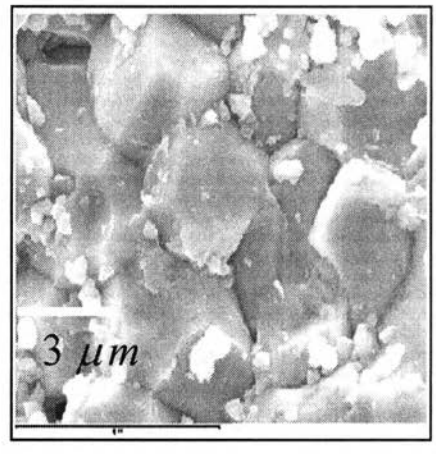
(a) 0 Wt % ZnO



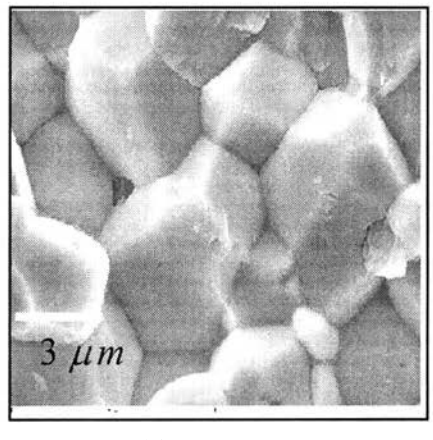
(b)0.25 Wt % ZnO



(c)0.50 Wt % ZnO



(d)0.75 Wt % ZnO

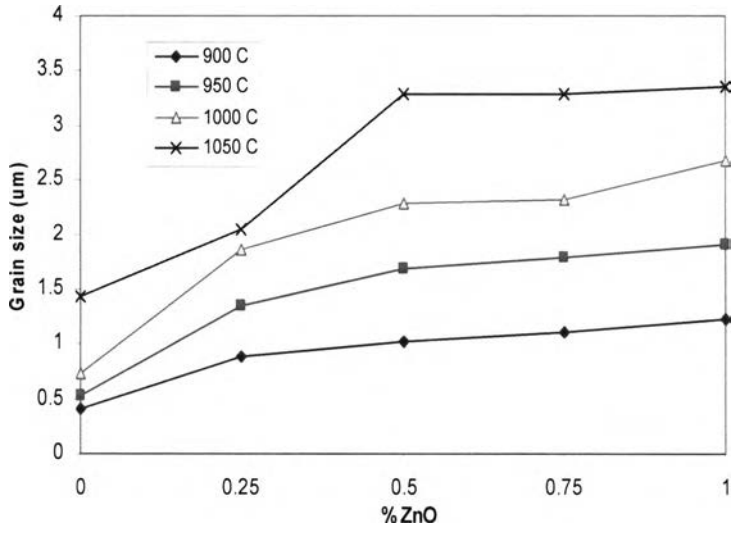


(e)1 Wt % ZnO

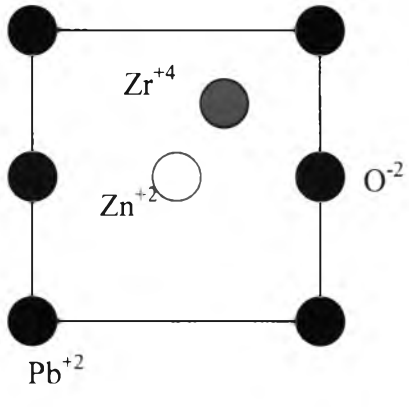
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกันเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเกรนของชิ้นงาน PMnN – PZT ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ และอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

ปริมาณ ZnO	อุณหภูมิซินเทอร์ (^{0}C)			
(Wt %)	900	950	1000	1050
0	0.41 μm	0.53 μm	0.73 μm	1.43 μm
0.25	0.89 μm	1.35 μm	1.85 μm	2.05 μm
0.5	1.02 μm	1.68 μm	2.28 μm	3.28 μm
0.75	1.11 μm	1.78 μm	2.32 μm	3.29 μm
1	1.23 μm	1.90 μm	2.68 μm	3.35 μm



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนของชิ้นงานกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิซินเทอร์แตกต่างกัน



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการแทนที่ในตำแหน่ง B ของโครงสร้าง ABO_3

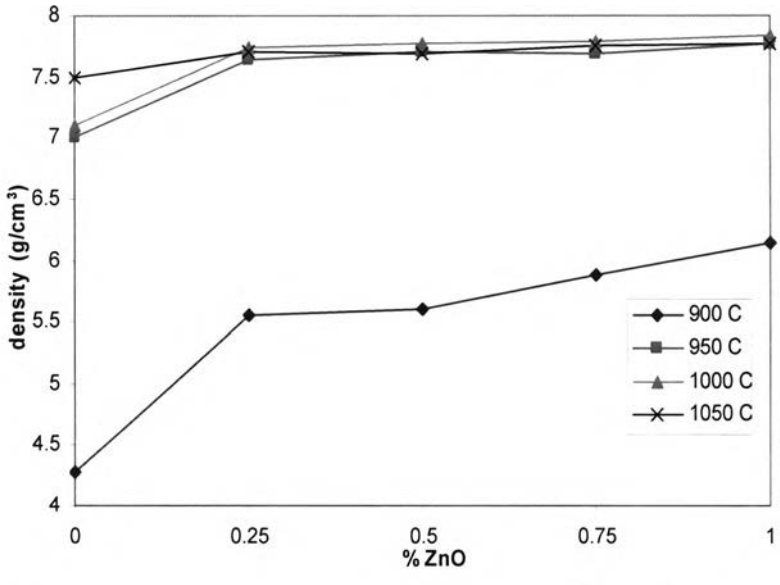
4.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น (density)

ผลของการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นชิ้นงาน โดยใช้วิธีอะคีมีดิส และคำนวณความหนาแน่นทางทฤษฎีโดยใช้พีคที่ได้จาก XRD เพื่อหาร้อยละของความหนาแน่นสัมพัทธ์ได้ผลดังตารางที่ 4.2

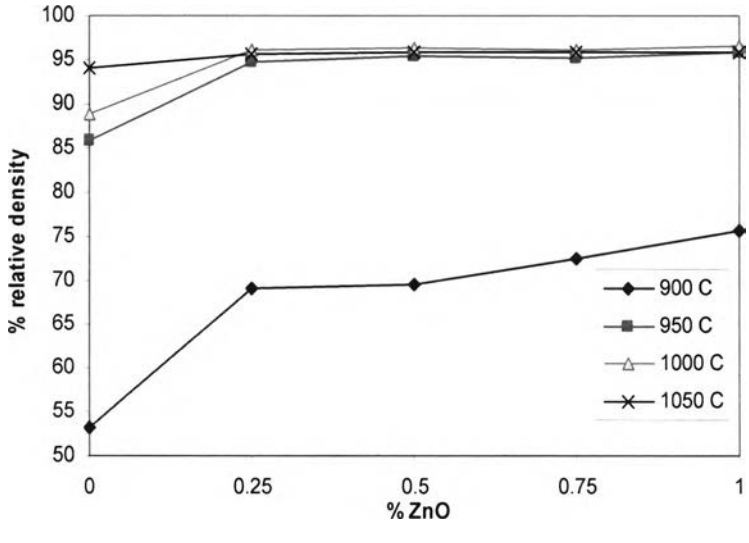
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าปริมาณที่ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานที่ส่วนผสมของ ZnO และอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

% ZnO	อุณหภูมิซินเทอร์ ^{0}C	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความหนาแน่นตามทฤษฎี (g/cm^3)	% ความหนาแน่นสัมพัทธ์
0	900	4.2764	8.0297	53.26
	950	6.8968	8.0297	85.89
	1000	7.1300	8.0297	88.80
	1050	7.5510	8.0297	94.04
0.25	900	5.5586	8.0498	69.05
	950	7.6373	8.0498	94.88
	1000	7.7440	8.0498	96.20
	1050	7.7043	8.0498	95.71
0.5	900	5.6052	8.0191	69.45
	950	7.7077	8.0191	95.51
	1000	7.7699	8.0191	96.28
	1050	7.6949	8.0191	95.83
0.75	900	5.8736	8.0134	72.61
	950	7.6976	8.0134	95.15
	1000	7.7836	8.0134	96.21
	1050	7.7521	8.0134	98.83
1	900	6.1413	8.0087	75.73
	950	7.7776	8.0087	95.90
	1000	7.8307	8.0087	96.56
	1050	7.7723	8.0087	95.84

จากตารางที่ 4.2 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นและร้อยละของความหนาแน่นสัมพัทธ์โดยเปรียบเทียบกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปได้ผลดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงานกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปและอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปและอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาข้อมูลความหนาแน่นของชิ้นงาน PMnN – PZT ที่ได้พบว่าที่อุณหภูมิซินเทอร์เดียวกันชิ้นงานที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์เข้าไปจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมมาก และเมื่อมีการเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากซิงค์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปไปช่วยเร่งอัตราการแพร่ของอะตอมทำให้ความหนาแน่นสูงตามไปด้วย

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เท่ากันแต่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกันจะพบว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะมีความหนาแน่นน้อยที่สุดและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการซินเทอร์ให้มากขึ้นคือ 950 องศาเซลเซียส และ 1000 องศาเซลเซียส ตามลำดับชิ้นงานจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นโดยจะมีความหนาแน่นมากที่สุดเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แต่ในทุกกรณีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการซินเทอร์สูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิซินเทอร์ 1000 องศาเซลเซียส จากผลการวิจัยที่ได้พบว่าชิ้นงานมีความหนาแน่นมากที่สุดเท่ากับ 7.8307 g/cm^3 เมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ลงไปจำนวน 1 % โดยน้ำหนักและซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

ผลที่ได้สามารถที่จะวิเคราะห์ได้ว่าชิ้นงาน PMnN – PZT ที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ไม่สามารถที่จะซินเทอร์ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 950 องศาเซลเซียสได้เนื่องจากเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 950 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของชิ้นงานจะมีค่าน้อยมาก สาเหตุอาจเป็นไปได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 950 องศาเซลเซียส ซิงค์ออกไซด์ที่เติมไปจะไม่เกิดปฏิกิริยาในการเข้าไปแทนที่ตำแหน่ง B เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปทำให้การเกิดกระบวนการซินเทอร์เกิดไม่สมบูรณ์ แต่จะช่วยทำให้เริ่มเกิดปฏิกิริยาการเข้าไปแทนที่ในตำแหน่ง B ที่ทำให้อัตราการแพร่ของอะตอมเกิดได้เร็วขึ้น เมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสขึ้นไป และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการซินเทอร์มากกว่า 1000 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของชิ้นงานจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิซินเทอร์ 1000 องศาเซลเซียส อาจมีสาเหตุมาจากการที่อุณหภูมิ ซินเทอร์สูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการระเหยของตะกั่ว (PbO) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำจึงส่งผลทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงตามไปด้วย

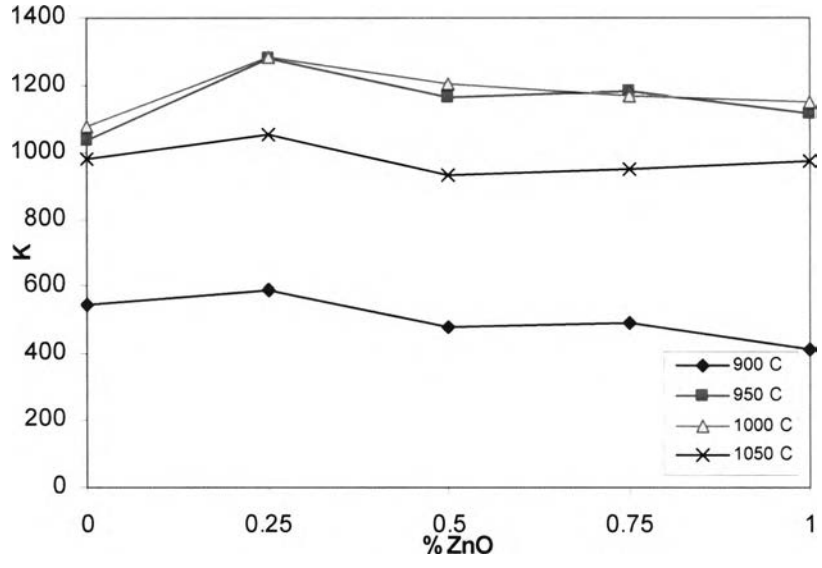
4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, K)

จากผลของการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกโดยการใช้ความถี่ 1 kHz ได้ผลดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน PMnN –PZT ที่ส่วนผสมของ ZnO และอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

% ZnO	อุณหภูมิซินเทอร์ (^{0}C)	r (mm)	t (mm)	C (pF)	K
0	900	5.5300	1.10	423.940	548.0126
	950	5.3950	1.20	700.410	1037.7540
	1000	5.3500	1.20	714.300	1076.2130
	1050	5.3000	1.10	650.140	979.5448
0.25	900	5.5300	1.10	392.140	506.9059
	950	5.5000	1.20	905.729	1291.4690
	1000	5.3950	1.10	935.410	1270.0000
	1050	5.4000	1.15	390.120	552.9072
0.5	900	5.5300	1.10	303.382	392.1714
	950	5.4750	1.10	950.120	1252.9870
	1000	5.5950	1.20	875.021	1205.4700
	1050	5.3000	1.15	675.126	993.2868
0.75	900	5.5300	1.10	328.950	425.2230
	950	5.4250	1.20	850.125	1246.6850
	1000	5.3400	1.15	806.657	1169.0900
	1050	5.3000	1.15	643.662	946.9951
1	900	5.5300	1.10	331.336	428.9400
	950	5.3450	1.30	679.778	111.6260
	1000	5.4050	1.10	850.120	1150.3370
	1050	5.3000	1.15	662.153	974.2000

จากข้อมูลของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ในตารางที่ 4.2 เมื่อนำค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ได้มาทำการพล๊อตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปได้ผลดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงานกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไป และอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ซิงค์ออกไซด์ลงไปจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงานมีค่ามากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มซิงค์ออกไซด์ลงไปมากกว่า 0.25 % โดยน้ำหนักค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเทอร์พบว่าชิ้นงานจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงเมื่อใช้อุณหภูมิในการซินเทอร์ที่ 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

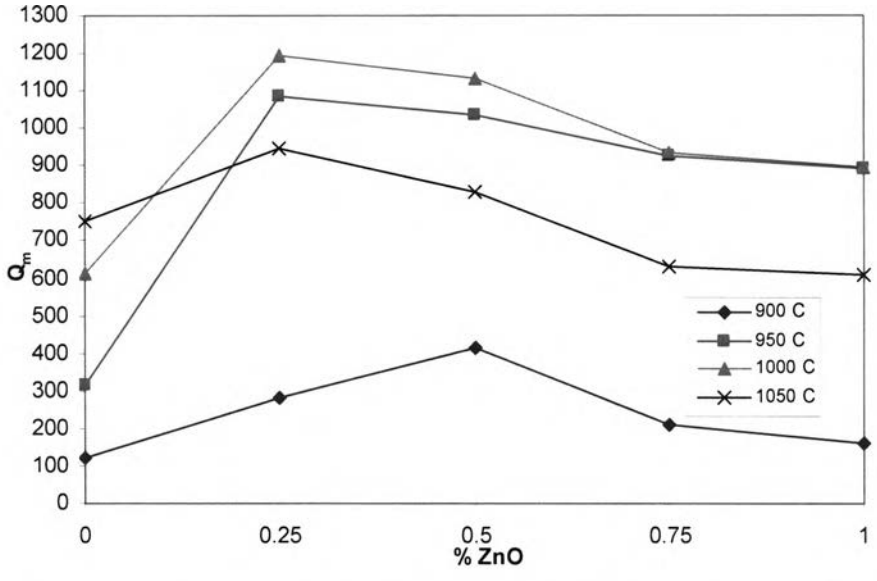
4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor, Q_m)

จากการวิเคราะห์หาค่าปริมาณที่ใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (Q_m) ได้ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าของข้อมูลที่ในใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (Q_m) ของชิ้นงานที่มีปริมาณของ ZnO และอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

% ZnO	อุณหภูมิซินเทอร์ (C)	f_r (kHz)	f_a (kHz)	C (nF)	R (Ω)	Q_m
0	900	164.00	165.50	0.451	1000.000	119.1997
	950	205.00	208.00	0.502	171.038	315.6106
	1000	224.50	248.00	0.245	15.020	614.9000
	1050	222.50	252.00	0.412	10.500	749.8470
0.25	900	166.00	170.00	0.459	160.250	280.1792
	950	213.50	239.00	0.371	9.150	1086.6520
	1000	218.50	248.50	0.352	7.630	1194.9300
	1050	220.50	251.00	0.37	9.010	948.1502
0.5	900	152.25	158.25	0.371	91.760	412.6067
	950	206.00	229.50	0.345	11.120	1036.0120
	1000	220.00	252.50	0.335	7.900	1134.4600
	1050	221.50	252.50	0.335	11.210	829.8602
0.75	900	149.50	154.00	0.381	231.300	209.6886
	950	211.50	238.00	0.334	11.581	924.7446
	1000	222.00	254.50	0.347	9.251	933.6970
	1050	221.00	251.50	0.326	15.380	630.1653
1	900	180.50	1870	0.321	253.000	158.8752
	950	221.00	253.50	0.328	10.249	892.3497
	1000	211.00	237.00	0.403	10.050	496.4796
	1050	220.00	251.50	0.367	13.851	605.8432

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงข้อมูลที่ได้จากการวิจัยเพื่อที่จะนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (Q_m) และเมื่อนำข้อมูลที่ได้ที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_m กับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปได้ผลดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล ของชิ้นงานกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปและอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

จากผลของการวิจัยค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลพบว่าเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานของ PMnN – PZT ที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิซินเทอร์เดียวกันชิ้นงานที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0.25 %โดยน้ำหนักจะมีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลที่สูงที่สุดและเมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์มากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลก็จะมีแนวโน้มที่จะลดลงจากข้อมูลที่ได้สามารถที่จะวิเคราะห์ได้ว่า อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ซิงค์ออกไซด์เข้าไปจำนวน 0.25 – 0.5 % โดยน้ำหนัก ซิงค์ออกไซด์จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโดเมนของชิ้นงานในขณะที่ทำการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนตี้เรโซแนนซ์ ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลที่มากที่สุด และเมื่อมีการเติมซิงค์ออกไซด์มากกว่า 0.5% โดยน้ำหนักจะไม่มีผลต่อการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโดเมนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับรายงานผลการวิจัยที่มีการศึกษาผลที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลมีค่าสูงขึ้น [8]

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกันพบที่อุณหภูมิซินเทอร์ 900 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะมีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลต่ำที่สุด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปที่ 950 องศาเซลเซียส และ 1000 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการซินเทอร์มากกว่า 1000 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลจะมีค่าลดลง

จากข้อมูลสามารถที่จะวิเคราะห์ได้ว่าเนื่องจากว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 950 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าน้อยมากทำให้ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลมีค่าน้อย และเมื่ออุณหภูมิในการซินเทอร์มากกว่า 1000 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธ์คุณภาพเชิงกลก็จะลดลงเพราะเกิดการระเหยของตะกั่ว (PbO) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยที่ผ่านมา ที่ได้ศึกษาถึงการลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [12-20] ที่พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส การระเหยของตะกั่วจะโดดเด่นมากกว่าขนาดของเกรนที่โตขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง

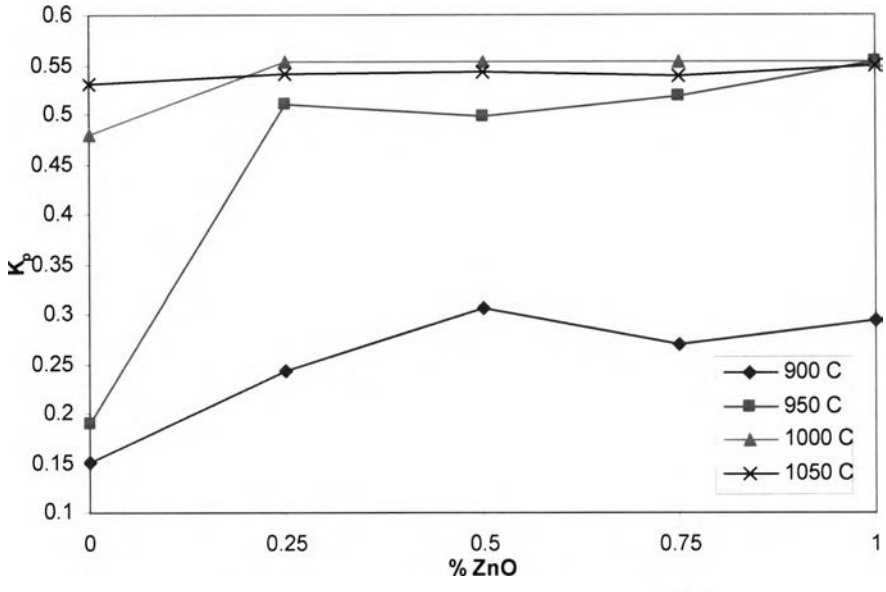
4.6 ผลการวิเคราะห์ค่า สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้า (electromechanical coupling factor, k_p)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงพลังงานกล – ไฟฟ้า (k_p) ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า ของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงพลังงานกลไฟฟ้า (k_p) ของชิ้นงาน PMnN – PZT

% ZnO	อุณหภูมิซินเทอร์ (C)	f_r (kHz)	f_a (kHz)	k_p
0	900	164.00	165.50	0.1512
	950	205.00	208.00	0.1905
	1000	224.50	248.00	0.4796
	1050	222.50	252.00	0.5305
0.25	900	166.00	170.00	0.2428
	950	213.00	238.50	0.5081
	1000	217.50	249.50	0.5540
	1050	220.50	251.00	0.5400
0.5	900	152.25	158.25	0.3072
	950	206.00	229.50	0.4977
	1000	220.00	252.50	0.5549
	1050	221.50	252.50	0.5426
0.75	900	149.50	154.00	0.2702
	950	211.50	238.00	0.5180
	1000	222.00	254.50	0.5528
	1050	221.00	251.50	0.5395
1	900	180.50	187.00	0.2943
	950	221.00	253.50	0.5538
	1000	222.00	254.50	0.5528
	1050	220.00	251.50	0.5478

จากตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงค่าข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล – ไฟฟ้า เมื่อนำค่าที่ได้มาพล๊อตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไป จะได้ผลดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้าของชิ้นงานกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ ที่เติมลงไป และอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ซิงค์ออกไซด์ในชิ้นงาน PMnN – PZT จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล – ไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมซิงค์ออกไซด์ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณของซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์มากขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล – ไฟฟ้ามากนัก โดยค่าที่ได้จะใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกันพบว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิซินเทอร์ต่ำกว่า 950 องศาเซลเซียส จะให้ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล – ไฟฟ้าน้อยที่สุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิซินเทอร์ขึ้นไปที่ 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ค่าที่ได้จะเพิ่มขึ้นแต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซินเทอร์มากกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่ 1000 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลที่ได้สามารถที่จะวิเคราะห์ได้ว่าสารซิงค์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปจะไปช่วยทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่ามากขึ้น โดยที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่ต่ำกว่า 950 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าน้อยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้าต่ำ

และที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการระเหยของตะกั่วออกไซด์ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงพลังงานกล – ไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย

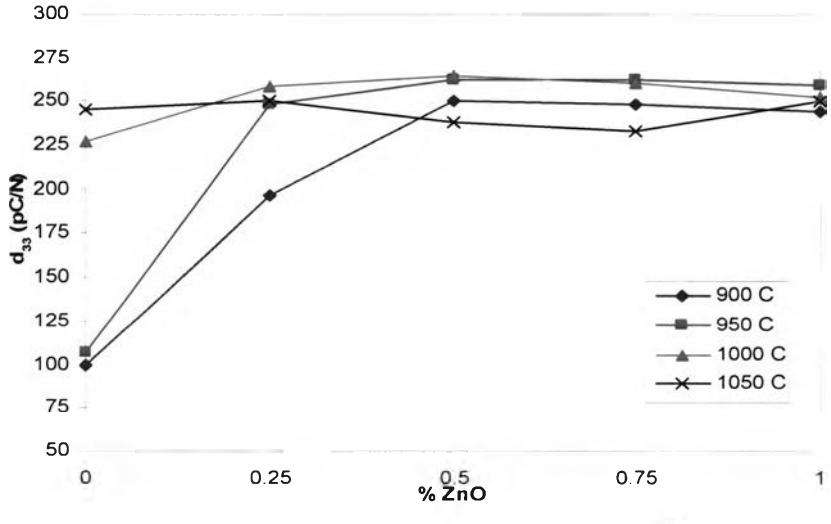
4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric charge constant, d_{33})

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ได้ผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงาน PMnN – PZT ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์และอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

% ZnO	d_{33} (pC/N)			
	900 °C	950 °C	1000 °C	1050 °C
0	100	107	227	245
0.25	197	249	260	251
0.5	251	264	265	238
0.75	249	260	260	233
1.0	244	261	252	250

เมื่อนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ d_{33} เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลโดยเปรียบเทียบกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปได้ผลดังรูปที่ 4.14



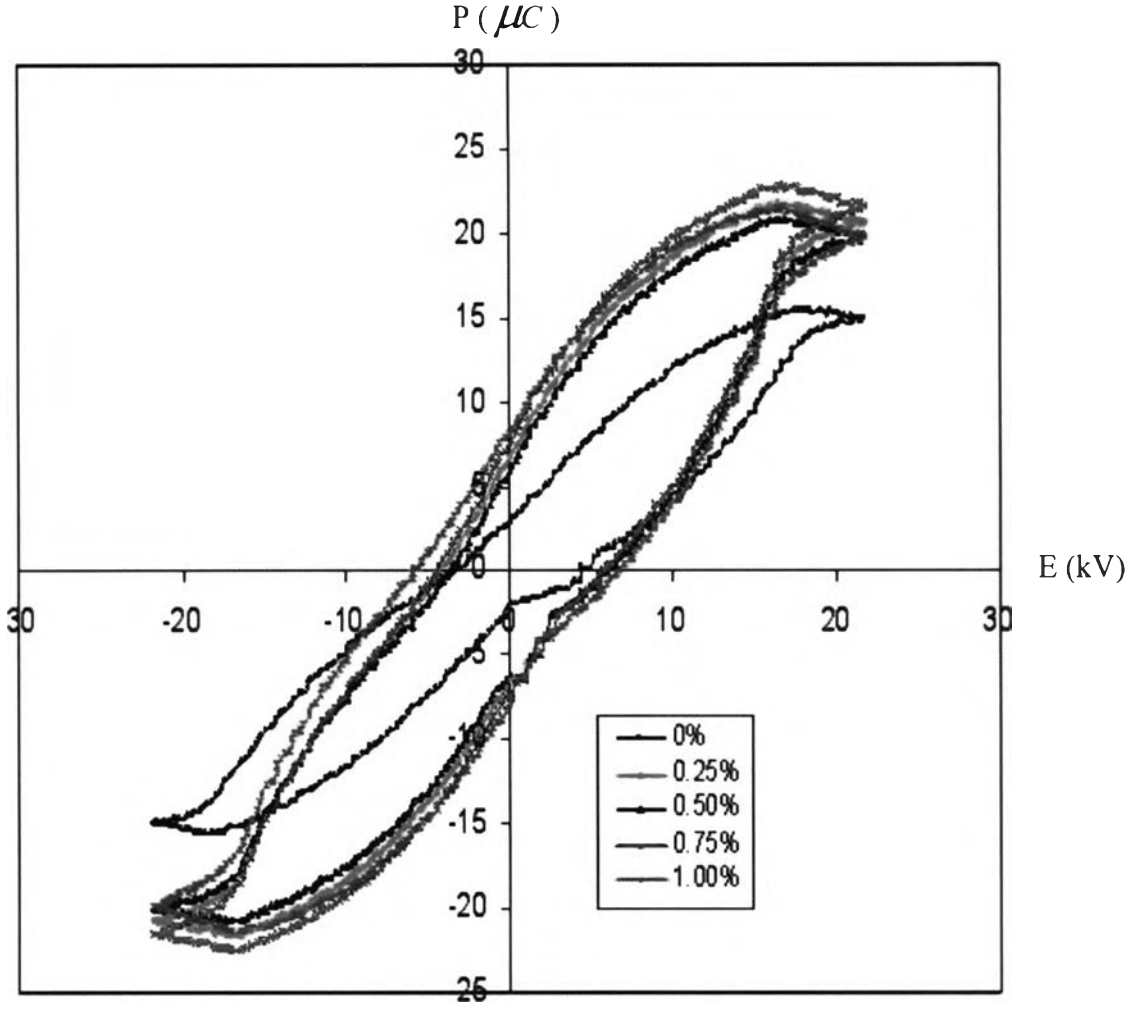
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงานกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงาน PMnN – PZT พบว่าชิ้นงานที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ซิงค์ออกไซด์จะมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมซิงค์ออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างจำนวนปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปพบว่าแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกจะไม่เปลี่ยนแปลงคือค่อนข้างที่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากลักษณะเฟสของชิ้นงานไม่เปลี่ยนไปนั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเทอร์จะพบว่าที่อุณหภูมิซินเทอร์ 900 และ 1050 องศาเซลเซียสชิ้นงานจะมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่ต่ำที่สุด และจะมีค่ามากขึ้นสูงเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 และ 1000 องศาเซลเซียส สาเหตุที่ชิ้นงานมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่ต่ำเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900 และ 1050 องศาเซลเซียส เนื่องจากว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำและมีขนาดเกรนที่เล็กกว่าอุณหภูมิซินเทอร์ที่ 1000 องศาเซลเซียสเพราะซิงค์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปไม่ได้ไปเร่งให้อัตราการแพร่ของอะตอมเร็วขึ้น และที่อุณหภูมิซินเทอร์ 1050 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะมีค่าความหนาแน่นลดลงเนื่องจากเกิดการระเหยของตะกั่วออกไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงานมีค่าลดลงตามไปด้วย

4.8 ผลการวิเคราะห์วงจรฮีสเทอร์รีซีส (hysteresis loop)

จากการวิเคราะห์วงจรฮีสเทอร์รีซีสได้ผลดังรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงถึงวงจรฮีสเทอร์รีซีสของชิ้นงาน PMnN – PZT ที่มีการเติมสารซิงค์ออกไซด์ช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน พิจารณาจากรูปเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์กับชิ้นงานที่ไม่ได้เติม พบว่าชิ้นงานที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์จะมีค่า P_s, P_r, และ E_c ที่สูงขึ้นกว่าชิ้นงานทีไม่ได้เติมซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากชิ้นงานที่เติมซิงค์ออกไซด์มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมซึ่งอาจเป็นผลมาจากซิงค์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปไปช่วยทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นมากขึ้น จึงส่งผลทำให้สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกดีตามไปด้วยนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่ามีค่าวงจรฮีสเทอร์รีซีสที่ใกล้เคียงกันซึ่งเป็นผลมาจากการเติม ZnO ในปริมาณที่น้อย และ Zn^{+2} ที่เติมเข้าไปแทนที่ไอออนของ Zr^{+4} ของโครงสร้างเพอรอพสไกท์ทำให้ลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานไม่เปลี่ยนไป ซึ่งพิจารณาได้จากพีคของ XRD



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงวงจรฮีสเทอร์รีซีสของชิ้นงาน PMnN – PZT ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน