

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลที่ได้จากการตรวจสอบเซรามิกที่ผ่านการเตรียมในบทที่ 3 ซึ่งจะประกอบไปด้วย ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร (%shrinkage) ความหนาแน่น (density) และผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า ประกอบด้วย สมบัติเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric properties) สมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) และสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric properties) โดยจะแบ่งผลการตรวจสอบออกเป็นสองส่วนคือ

1. ผลการตรวจสอบเซรามิก PSZT-ZN เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสตรอนเทียม (Sr) และความเข้มข้นของสารเจือร่วมซิงค์-ไนโอเบต (Zn-Nb)
2. ผลการศึกษาการเตรียมแผ่นฐานรอง (substrate) ของซิลิกอน การศึกษาการเตรียมสารละลายโซล PSZT และการปลูกฟิล์ม PSZT บนแผ่นฐานรอง Ti/SiO₂/Si

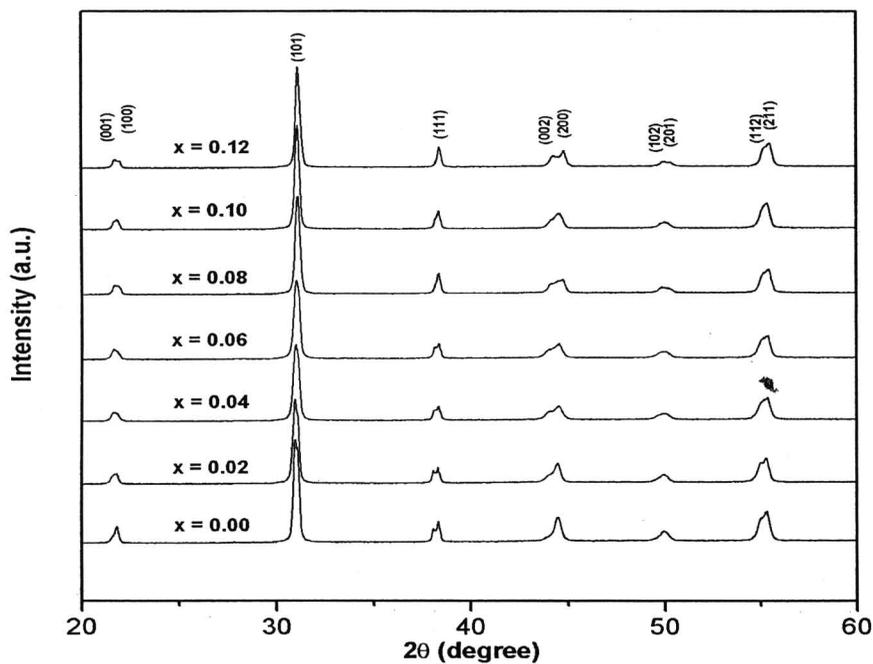
โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการตรวจสอบเซรามิก PSZT-ZN เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสตรอนเทียม (Sr) และความเข้มข้นของสารเจือร่วมระหว่างซิงค์-ไนโอเบต (Zn-Nb)

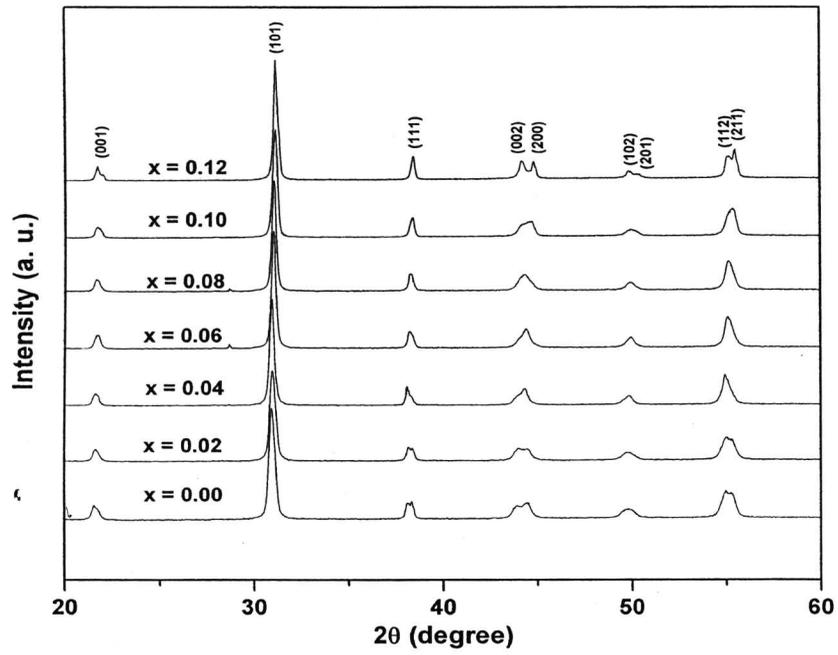
จากการเตรียมสารเซรามิกในระบบ $Pb_{(1-x)}Sr_x(Zr_{0.54}Ti_{0.44}Sb_{0.02})_{(1-y)} - (Zn_{1/3}Nb_{2/3})_yO_3$ เมื่อค่า y (ZN) เปลี่ยนตั้งแต่ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18 และ 0.20 โดยในแต่ละเงื่อนไข y จะเปลี่ยนค่า x (Sr) เท่ากับ 0.00, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 ในทุกเงื่อนไข y ทำการเตรียมผงโดยวิธีการผสมแบบออกไซด์ชั้นตอนเดียว (mixed oxide) เเผาเคลที่อุณหภูมิ 900 °ซ ด้วยอัตราการขึ้นและลงของอุณหภูมิเท่ากับ 10 °ซ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นก็จะนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้างดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 การตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD

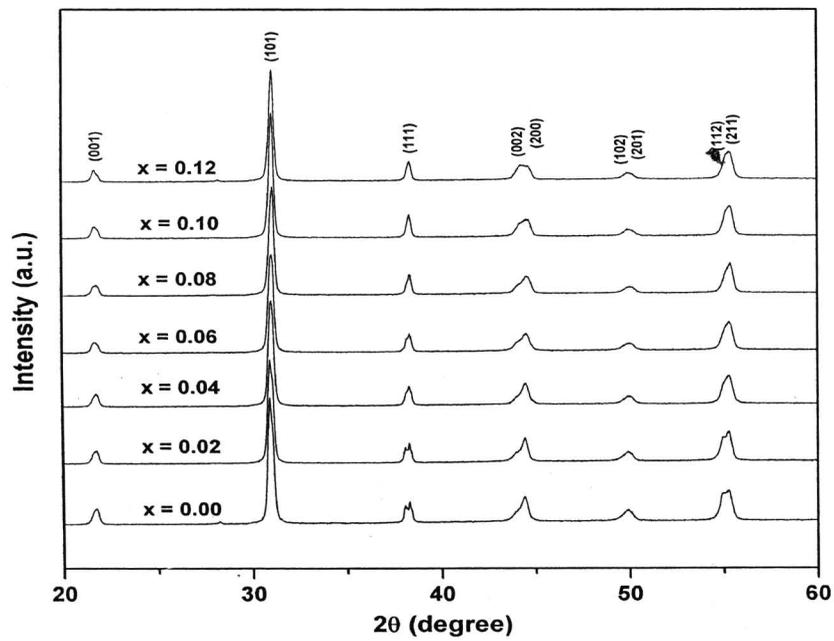
จากการเตรียมผง PSZT-ZN พบว่าผงที่ได้ก่อนการเผาแคลไซน์ ผงจะมีลักษณะเป็นสีส้มแดง เมื่อนำผงไปทำการแคลไซน์แล้วจะได้ผงมีสีเหลืองอ่อน แล้วทำการขึ้นรูปเม็ดเซรามิก เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C ในอัตราการเพิ่มขึ้น/ลดลงของอุณหภูมิ 10 °C/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.10 จากผลการตรวจสอบพบว่าได้ข้อมูลสอดคล้องกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 33-0748 (รูปแบบ JC-file แสดงในภาคผนวก) ซึ่งเป็นข้อมูลของ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ มีโครงสร้างเฟสเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) ในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนค่า y (ZN) และ x (Sr)



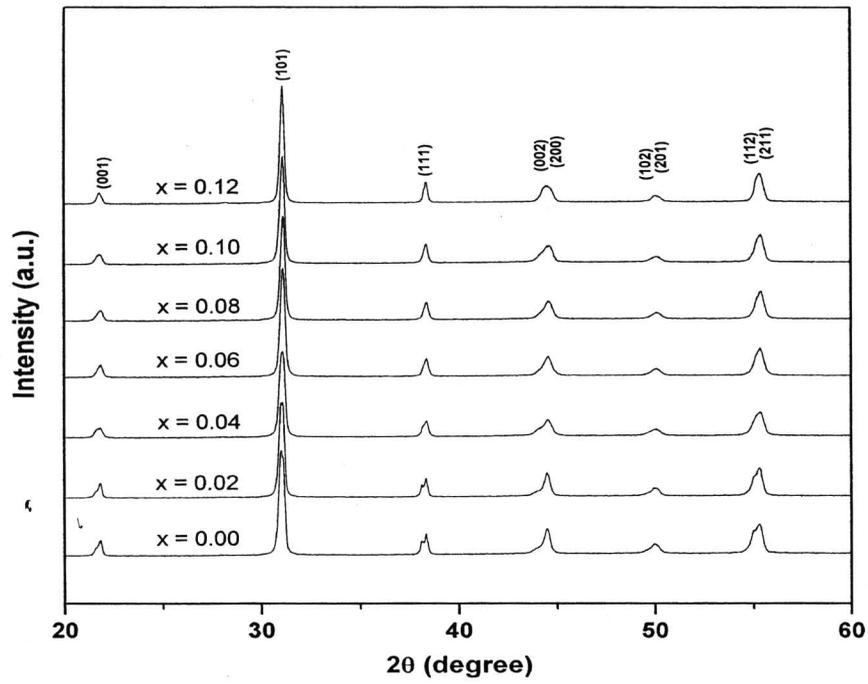
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เงื่อนไข y (ZN) = 0.02



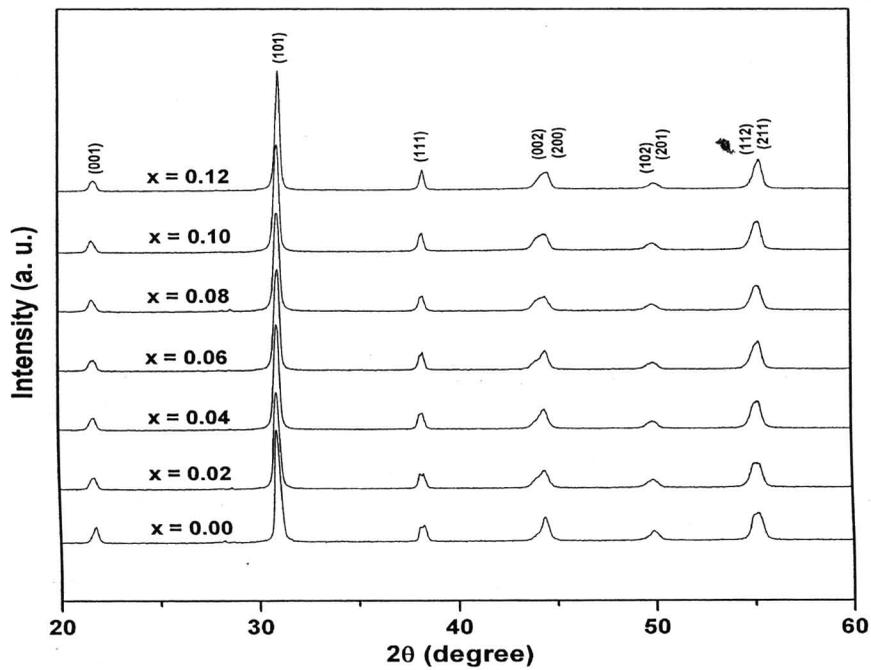
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจือไนย $y(\text{ZN}) = 0.04$



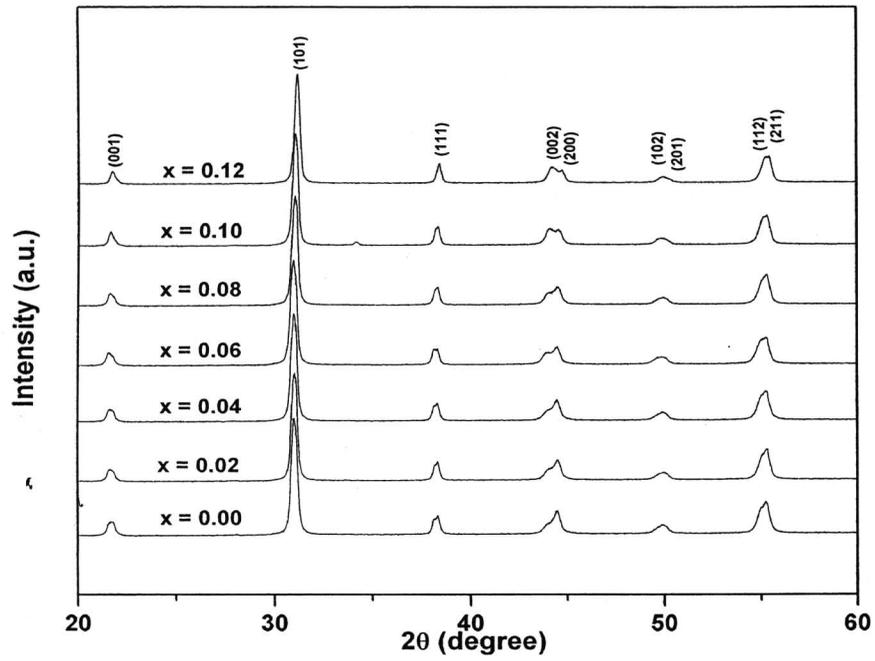
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจือไนย $y(\text{ZN}) = 0.06$



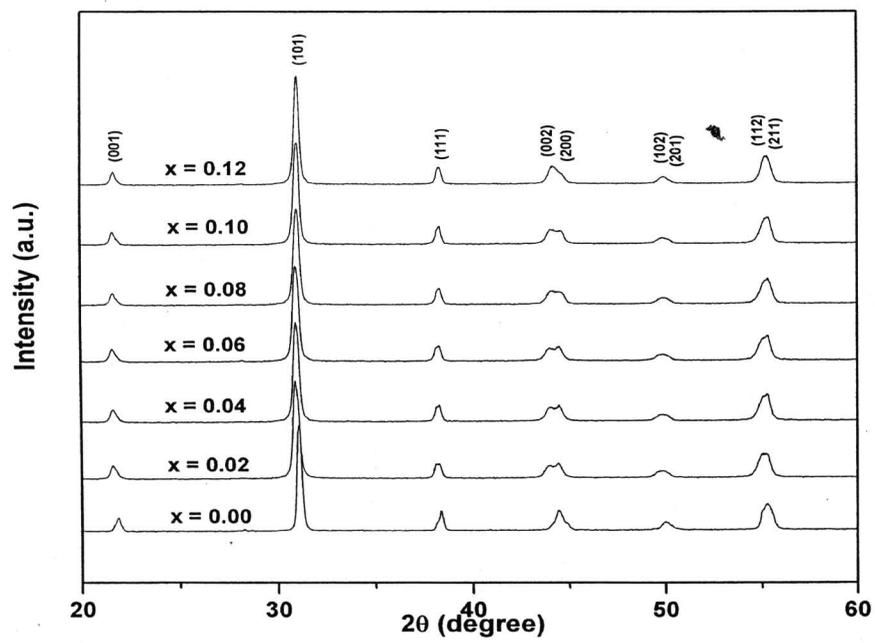
รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เหนือไน y (ZN) = 0.08



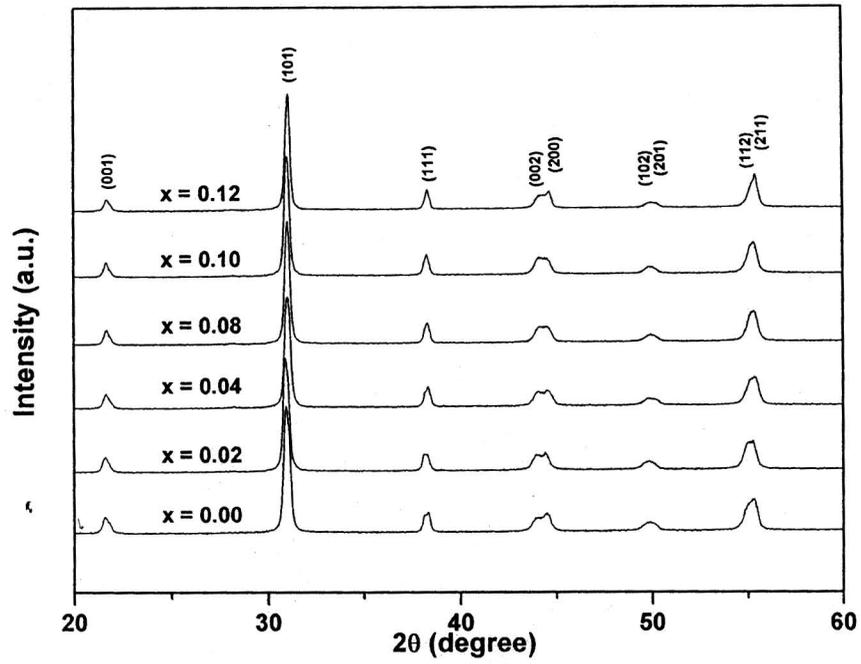
รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เหนือไน y (ZN) = 0.10



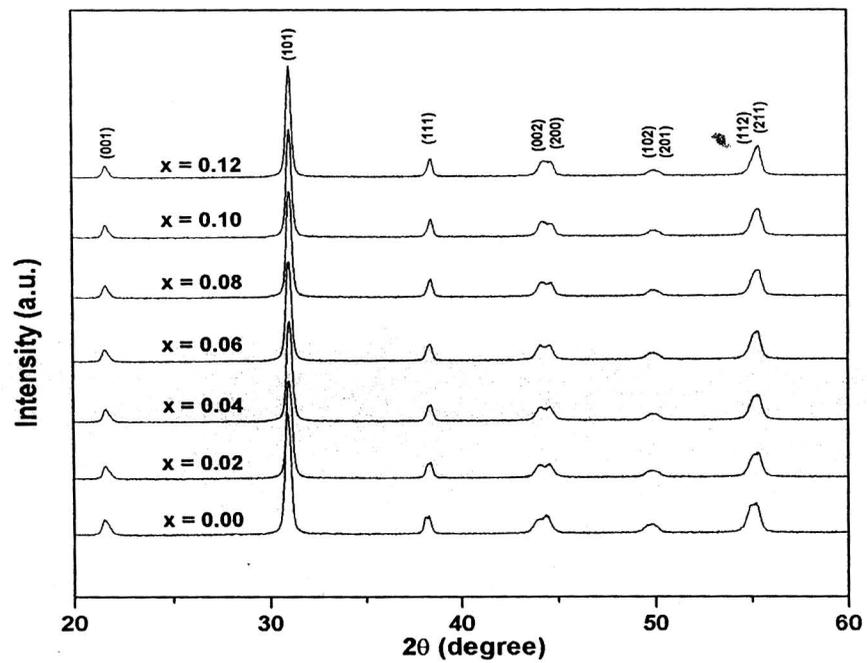
รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เหนือไนไซ $y(\text{ZN}) = 0.12$



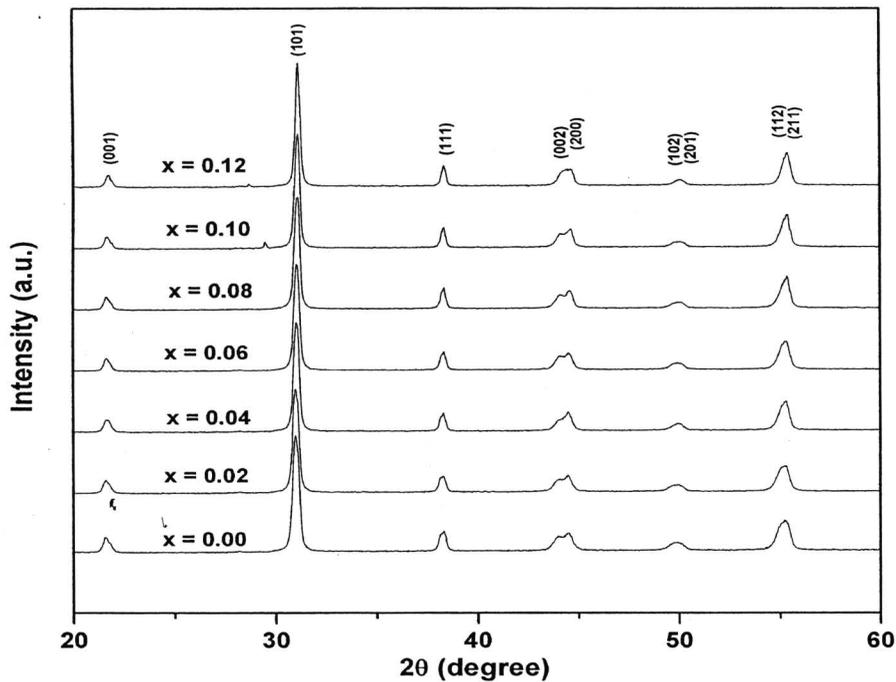
รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เหนือไนไซ $y(\text{ZN}) = 0.14$



รูปที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจือไนย $y(\text{ZN}) = 0.16$



รูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจือไนย $y(\text{ZN}) = 0.18$



รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เงื่อนไข y (ZN) = 0.20

จากกราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เมื่อเปลี่ยนค่าของปริมาณสารเจือ y (ZN) ในตำแหน่ง B-site และเปลี่ยนค่าปริมาณของ x (Sr) ในตำแหน่ง A-site พบว่าทุกเงื่อนไขชิ้นงานแสดงเฟสเพอร์รอฟสไกต์ของเพียโซอิเล็กทริก PZT เมื่อเทียบกับฐานข้อมูล JCPDS file จะสอดคล้องกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 33-0784 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นเฟสเตตระโกนอล (tetragonal) และมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ โดยทั่วไปการแสดงผลึกเดี่ยว (single peak) ของระนาบ 200 จะแสดงถึงเฟสรอมโบฮีดรอล และจะเกิดการแยกออกเป็นสองพีคของเฟสเตตระโกนอลที่ระนาบ 002 และ 200 แสดงให้เห็นถึงการคงอยู่ของสองพีคระหว่างรอมโบฮีดรอลและเตตระโกนอล พีค XRD ของเซรามิกในระบบที่ศึกษานี้พบว่าแสดงทั้งพีคเดี่ยวของรอมโบฮีดรอลและการคงอยู่ร่วมกันทั้งสองเฟส ในกราฟรูปที่ 4.1-4.2 แสดงเงื่อนที่ ZN = 0.02 และ ZN = 0.04 พบว่ารูปแบบ XRD ที่เกิดขึ้นจะแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเฟสจากเฟสรอมโบฮีดรอลเป็นเฟสเตตระโกนอล และแสดงการอยู่ร่วมกันของทั้งเฟสเตตระโกนอลและเฟสรอมโบฮีดรอลเมื่อปริมาณของ Sr เพิ่มขึ้นจาก 0.00 – 0.10 ซึ่งสังเกตจากการแยกออก (splitting) ของพีคที่ (002) และ (200) แต่หาเมื่อปริมาณ Sr เพิ่มขึ้นเป็น 0.12 ความเป็นเตตระโกนอลจะเพิ่มมากขึ้นซึ่งสังเกตจากความเข้มของพีคในระนาบ 002 และ 200 ที่มากขึ้น เมื่อปริมาณของ ZN เพิ่มขึ้นจาก 0.06 – 0.10

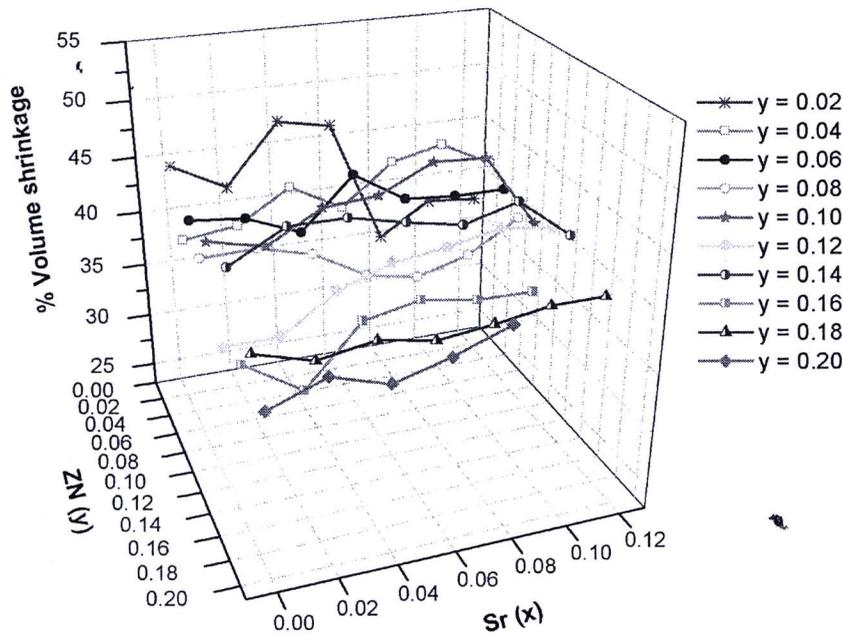
(รูป 4.3-4.5) โครงสร้างเฟสยังคงแสดงการคงอยู่ของเฟสรวมโบฮีตรอลที่ปริมาณของ Sr ปริมาณน้อยและแสดงการอยู่ร่วมกันของทั้งเฟสเตตระโกนอลและรวมโบฮีตรอลเมื่อปริมาณ Sr เพิ่มขึ้น จากผลที่ได้นี้แสดงว่าการเติมสาร ZN ในช่วง 0.02 – 0.10 ในเซรามิก PZT จะส่งผลทำให้โครงสร้างเฟสของสารเปลี่ยน เมื่อสังเกตกราฟ XRD เมื่อ ZN (y) เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.12 จนถึง 0.20 (รูป 4.6-4.10) พบว่าเมื่อปริมาณของ Sr เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.00 – 0.12 รูปแบบ XRD ที่พิกในระนาบ 200 และ 002 แสดงการปรากฏของเฟสสองเฟสในทุกเงื่อนไข Sr และในทุกเงื่อนไข ZN ในช่วง 0.12 – 0.20 ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นแสดงได้ว่าการเจือสาร Sr และ ZN ในโครงสร้างของ PZT ในช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้จะไม่ส่งผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในตำแหน่ง A-site และ B-site ในเซรามิก ซึ่งสังเกตจากการเลื่อนของพิกเพียงเล็กน้อยในตำแหน่งความเข้มของพิกเมื่อปริมาณของ Sr เพิ่มมากขึ้น [47] ดังนั้นในการศึกษาโครงสร้างเฟสของสารในระบบ PSZT-ZN นี้สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างเฟสมีการเปลี่ยนแปลงจากเฟสรวม โบฮีตรอลเป็นเฟสเตตระโกนอลซึ่งเกิดขึ้นในช่วงปริมาณของ ZN ค่อนข้างต่ำ ($ZN = 0.02 - 0.10$) และแสดงการคงอยู่ของทั้งเฟสเตตระโกนอลและเฟสรวม โบฮีตรอลซึ่งเกิดขึ้นในเซรามิกที่เจือด้วย ZN เพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 0.12 – 0.20 การปรากฏของทั้งเฟสเตตระโกนอลและเฟสรวม โบฮีตรอลนี้แสดงได้ว่าเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารในระบบ PZT เมื่อปริมาณ ZN เพิ่มมากขึ้นอาจจะนำไปสู่การแพร่กระจาย อนุบริเวณ MBP ระหว่าง เฟสเตตระโกนอล และ เฟสรวม โบฮีตรอลซึ่งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไข องค์ประกอบของสารเจือที่เพิ่มเข้ามา

4.1.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

4.1.2.1 การตรวจสอบการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตร (% volume shrinkage)

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไขค่า ZN (y) เท่ากับ 0.02 – 0.20 และเปลี่ยนค่า Sr (x) เท่ากับ 0.00, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 ทุกเงื่อนไข y แสดงรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เปลี่ยนไป ผลที่ได้พบว่าค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิก PSZT-ZN จะมีค่าอยู่ในช่วงเท่ากับ 35.87 – 47.87 พบในเงื่อนไข $y = 0.02$ $x = 0.08$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ค่าต่ำสุด และ $y = 0.02$ $x = 0.04$ เป็นค่าสูงสุด จากกราฟพบว่าเงื่อนไข ZN เริ่มตั้งแต่ 0.02 – 0.14 จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการ

หาคัดตัวของเซรามิกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงกับปริมาณของ Sr ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับหาคัดตัวที่ช่วงปริมาณของ ZN ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.14 ไปสู่ 0.20 ซึ่งพบว่าค่าการหาคัดตัวมีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นกับปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.02 -0.12 ผลที่แสดงอาจบอกได้ว่าปริมาณของ ZN ที่ 0.20 อาจจะมีอนุภาคบางส่วนที่จะไม่สามารถเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของ PSZT ได้ และทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างส่งผลทำให้การหาคัดตัวของเซรามิกลดลง

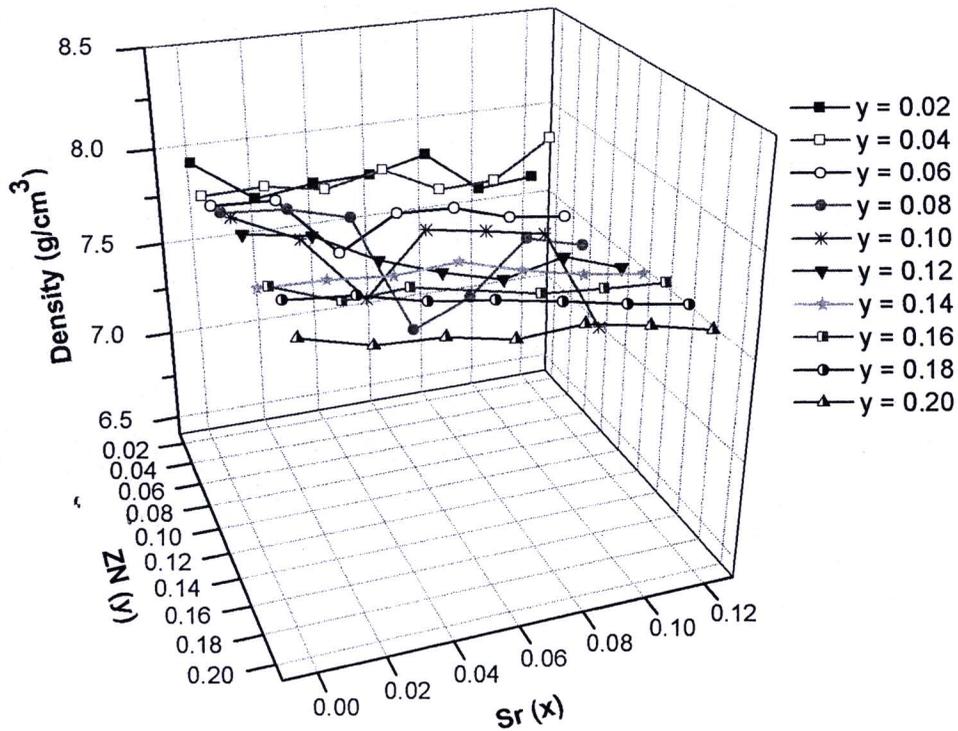


รูปที่ 4.11 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรเทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) และ Sr (x) ของเซรามิก PSZT-ZN

4.1.2.2 การตรวจสอบค่าความหนาแน่น (density)

ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเซรามิก PSZT-ZN แสดงในรูป 4.12 ที่แสดงค่าความหนาแน่นเทียบกับปริมาณของสารเจือในเซรามิกพบว่าค่าความหนาแน่นของเซรามิก PSZT-ZN มีการเปลี่ยนแปลงกับปริมาณขององค์ประกอบที่เปลี่ยนไป ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $7.14 \text{ g/cm}^3 - 7.98 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งพบในเงื่อนไข $y = 0.10 \text{ x} = 0.12$ และ $y = 0.10 \text{ x} = 0.00$ เป็นองค์ประกอบที่ค่าต่ำสุดและมากที่สุดตามลำดับ จากกราฟ ค่าความหนาแน่นจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่สัมพันธ์

กันกับค่าการหดตัวคือมีแนวโน้มลดลงกับปริมาณของสารเจือที่เพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นก็จะลดลงด้วย และเมื่อค่าการหดตัวเพิ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นก็เพิ่มขึ้น ซึ่งพบที่เงื่อนไขตั้งแต่ $y = 0.02 - 0.10$ เท่านั้นแต่เมื่อปริมาณของ ZN เพิ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นจะแสดงแนวโน้มลดลงซึ่งเริ่มแสดงที่ ZN ตั้งแต่ 0.12 จนถึง 0.20 ผลที่ได้นี้แสดงได้ว่าค่าร้อยละการหดตัวและค่าความหนาแน่นจะมีค่าที่สัมพันธ์กันเมื่อปริมาณของ ZN เพิ่มมากขึ้นถึงค่าๆหนึ่งเท่านั้นคือ ZN เพิ่มจนถึงประมาณ 0.10 จากนั้นเมื่อ ZN เพิ่มมากขึ้นค่าทั้งสองก็จะมีแนวโน้มไม่ไปในทิศทางเดียวกันและเมื่อเทียบกับปริมาณสาร Sr ที่เปลี่ยนพบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง $ZN = 0.02 - 0.12$ แต่เมื่อ ZN เพิ่มขึ้นมากกว่านี้ค่าความหนาแน่นจะลดลงกับปริมาณ Sr ที่เพิ่มขึ้นแต่ลดลงในอัตราที่น้อยมาก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเติมสารเจือที่มากเกินไป ทำให้ไอออนของสารเจือไปแทนที่ในตำแหน่งหลักไม่สัมพันธ์กับไอออนที่ขาดหายไป ทำให้ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกเกิดขึ้น ความไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างมีมากขึ้น จึงส่งผลต่อค่าความหนาแน่นและค่าการหดตัวของเซรามิกได้ และนอกจากนี้ยังอธิบายผลได้ว่าการเจือสารหรือการดัดแปลงองค์ประกอบของ PSZT-ZN ด้วย Sr จะไม่แสดงผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงในค่าร้อยละการหดตัวและค่าความหนาแน่นของเซรามิกในระบบ PSZT



รูปที่ 4.12 ค่าความหนาแน่นเทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) และ Sr (x) ของเซรามิก PSZT-ZN

4.1.3 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

4.1.3.1 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

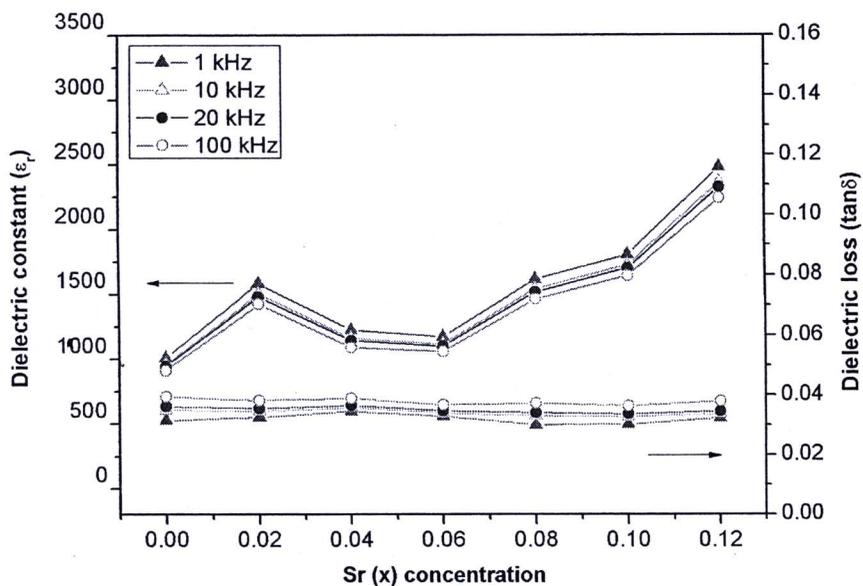
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant; ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss; $\tan \delta$) ของเซรามิก PSZT-ZN ที่ผ่านการทำขั้ว วัดที่อุณหภูมิห้อง โดยวัดที่ความถี่ 1 kHz 10 kHz 20 kHz และ 100 kHz ดังแสดงในรูป 4. 13- 4.22 ซึ่งแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เปลี่ยนไปในทุก เงื่อนไข Zn ที่เพิ่มมากขึ้นจาก 0.02 – 0.20 จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของ Sr เพิ่มมากขึ้น และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของ Zn เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเทียบกับความถี่ที่ทำการวัดค่า พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 4290 พบที่เงื่อนไข Zn = 0.20 Sr = 0.12 ซึ่งเป็นค่าที่วัดที่ความถี่ 1 kHz พิจารณากราฟรูป 4.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของ Sr = 0.00- 0.06 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลง จากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ Sr เพิ่มขึ้นเป็น 0.08-0.20 ในรูป 4.14 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมี

ค่าเพิ่มขึ้นกับปริมาณของ Sr เริ่มปรากฏที่ปริมาณ Sr = 0.04 ส่วนในกราฟ 4.15 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นกับปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้นซึ่งเริ่มตั้งแต่ปริมาณ Sr = 0.02 และที่ ZN เท่ากับ 0.08 (กราฟ 4.16) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นกับปริมาณ Sr ที่เพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขของ Sr ที่เพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อปริมาณของ ZN ที่เงื่อนไข 0.10 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเป็นอย่างมากที่ปริมาณ Sr เท่ากับ 0.02 จากนั้นก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมากกับปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณของ ZN เพิ่มขึ้นจาก 0.12 จนถึง 0.20 (รูป 4. 18 – รูป 4.22) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมากกับปริมาณ Sr ที่เพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขของ ZN ที่เพิ่มขึ้นด้วย และพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงสุดที่เงื่อนไข ZN = 0.20 Sr = 0.12 จากผลนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของ Sr เพิ่มมากขึ้นจาก 0.00 – 0.12 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของ ZN ที่เพิ่มขึ้นด้วย สังเกตจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เพิ่มกับปริมาณของ Sr อย่างชัดเจนที่เงื่อนไขของ ZN ค่ามาก จากผลการศึกษานี้แสดงได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทั้งจากสารเจือของ ZN และ Sr และยังสามารถบอกได้ว่าเป็นผลของการเจือด้วยสารที่มีวาเลนซ์เท่ากันในตำแหน่ง A-site (Pb^{2+}) คือ Sr ซึ่งมีประจุ เป็น +2 จะส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงมากและแสดงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำ ส่วนการเจือด้วย ZN ในสาร PZT ไอออนของ Nb เป็นการเจือสารด้วยวาเลนซ์ที่มากกว่าวาเลนซ์ของตัวถูกแทรกที่ คือ Nb^{5+} ในตำแหน่ง B-site ของ Zr^{4+}/Ti^{4+} (เป็นการเจือแบบ donor) ซึ่งการเจือแบบนี้ไอออนที่เกินมาจะไปชดเชยตำแหน่งของช่องว่างที่ขาดหายไปจึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น [24-26]

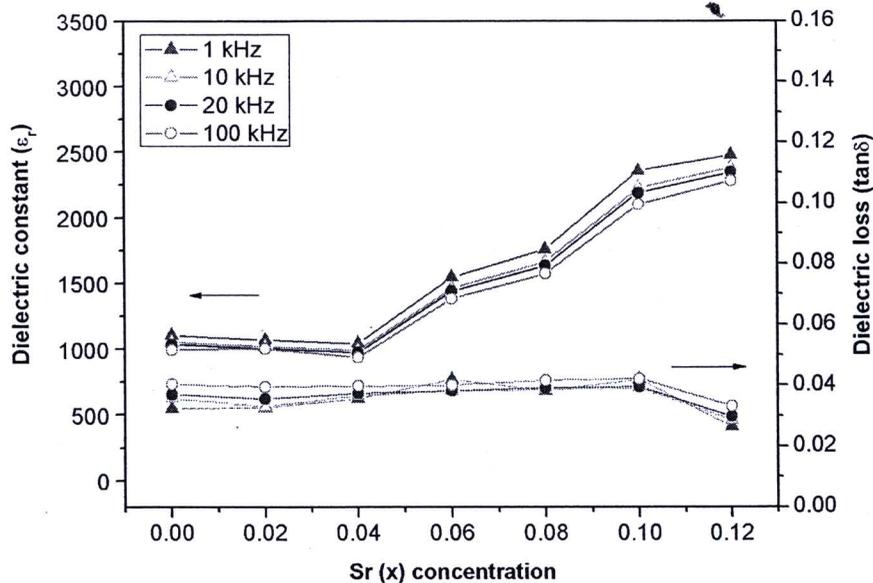
ในส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกแสดงในรูปที่ 4.13 – 4.22 พบว่าในทุกเงื่อนไขของ ZN ค่าการสูญเสียจะมีแนวโน้มลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้นซึ่งเห็นได้ชัดเจนในเซรามิกที่มีปริมาณ ZN ตั้งแต่ 0.02 – 0.10 จากนั้นเมื่อปริมาณ ZN เพิ่มมากขึ้นจาก 0.12 – 0.20 พบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ Sr เพิ่มมากขึ้น ซึ่งพบว่าค่าการสูญเสียมากที่สุดมีค่าประมาณ 0.067 พบในชิ้นงาน ZN = 0.20 Sr = 0.12 ซึ่งก็ถือว่ามีค่าการสูญเสียที่ค่อนข้างน้อย ผลที่ได้นี้อาจเกิดเนื่องมาจากผลของการเจือด้วย Sr ในตำแหน่ง A-site ของเซรามิกซึ่งตัวเจือจะไปแทนที่ไอออนที่มีช่องว่างที่เท่ากันและสัมพันธ์กันในขนาดที่เท่ากันส่งผลทำให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำและเมื่อ



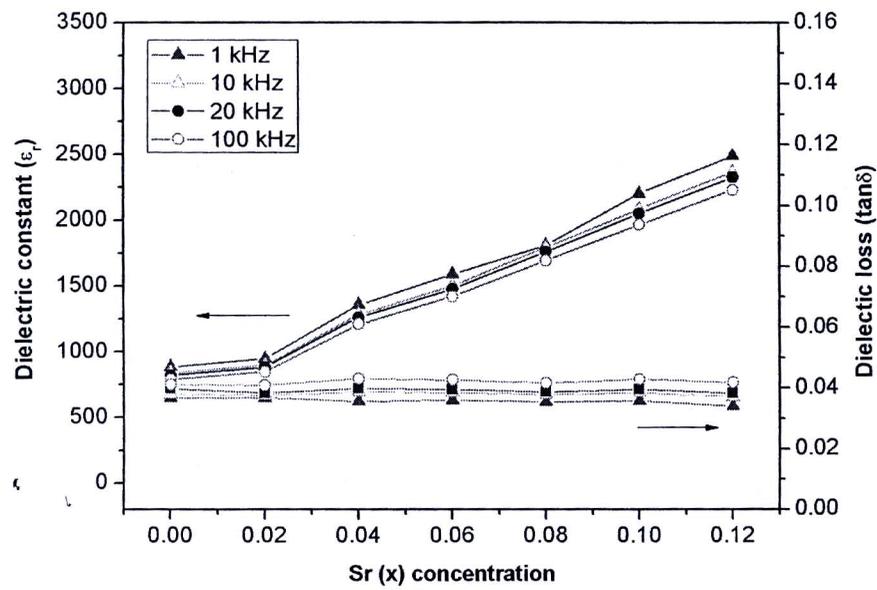
เทียบกับความถี่ที่เพิ่มขึ้นจาก 1 kHz 10 kHz 20 kHz และ 100 kHz (รูป 4.13 – 4.22) พบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับความถี่ที่เพิ่มขึ้น



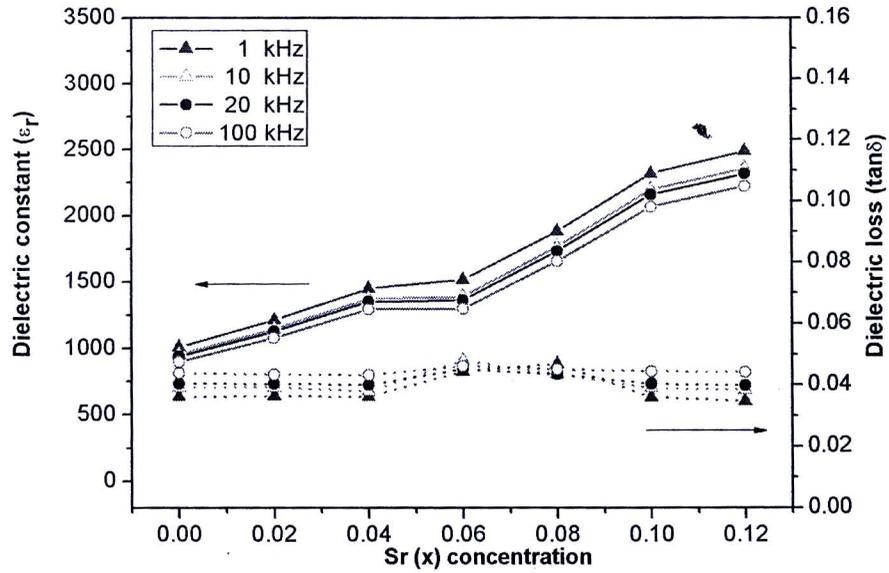
รูปที่ 4.13 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.02$



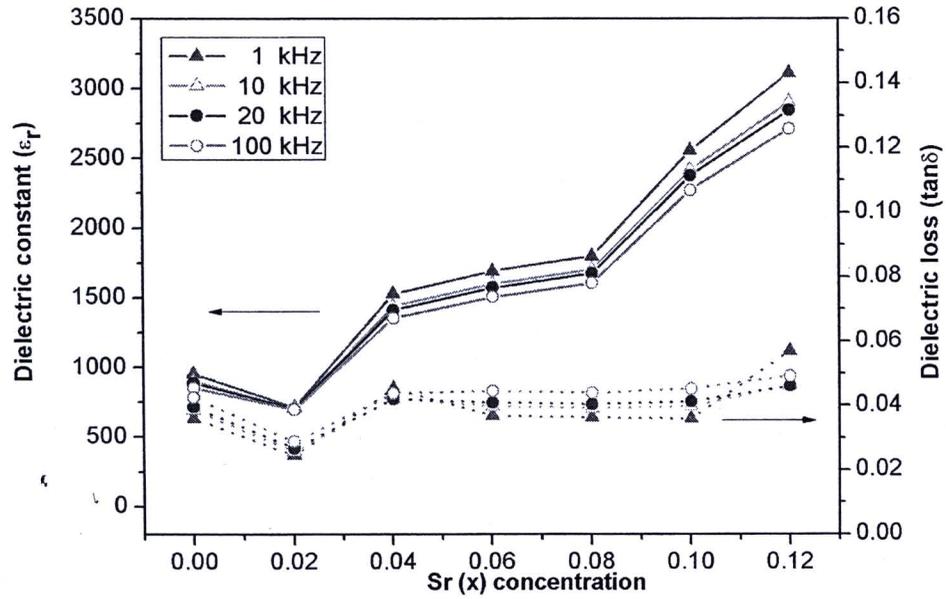
รูปที่ 4.14 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.04$



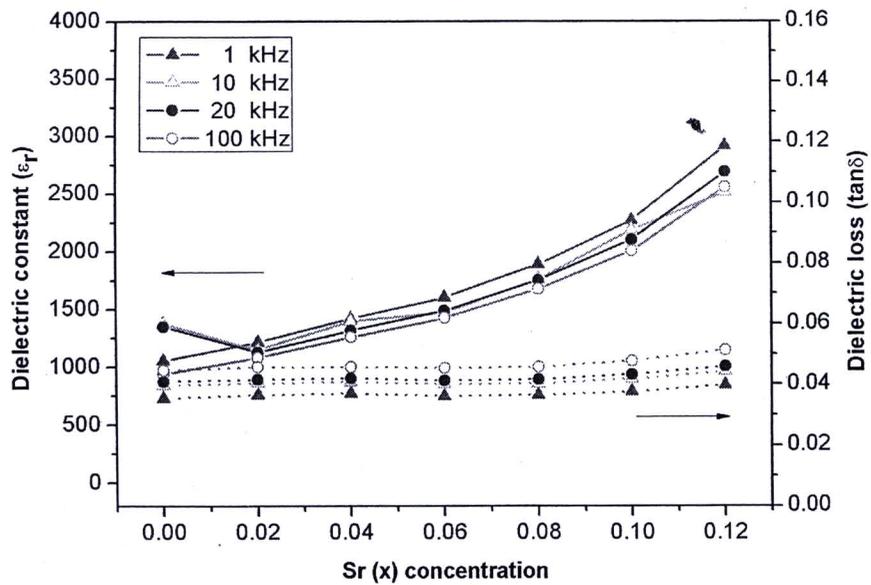
รูปที่ 4.15 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.06$



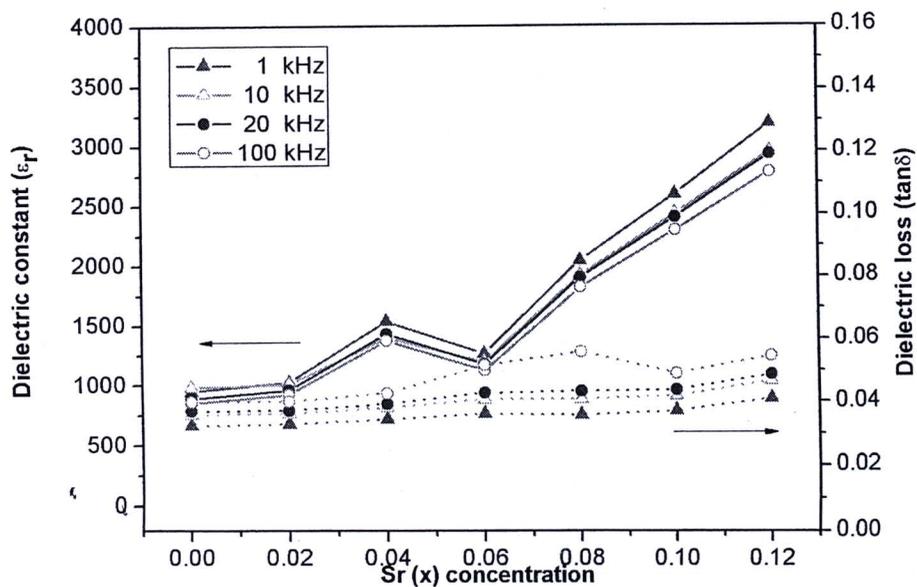
รูปที่ 4.16 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.08$



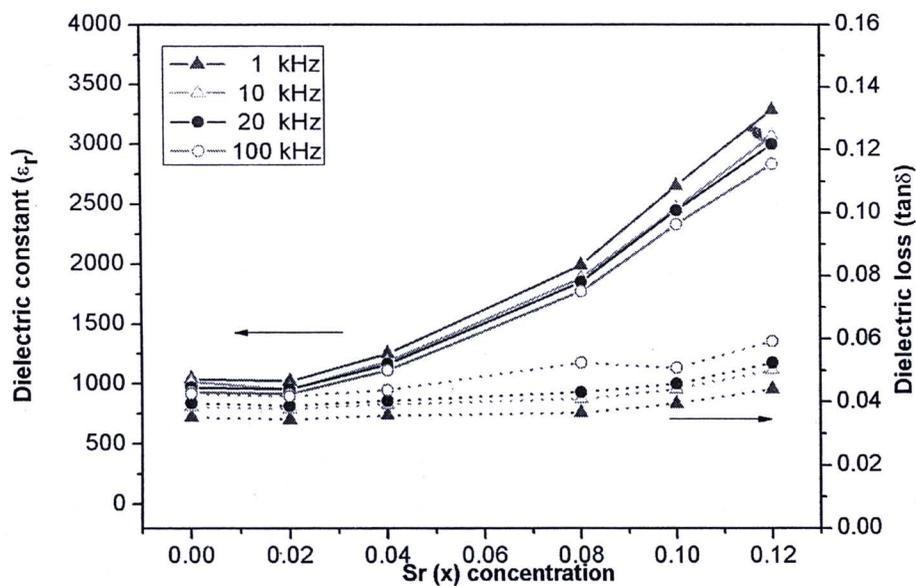
รูปที่ 4.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.10$



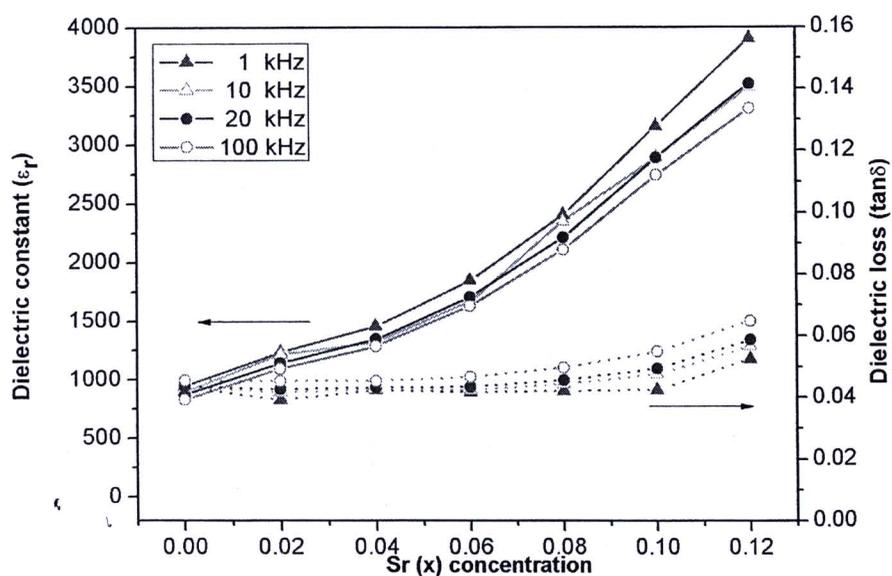
รูปที่ 4.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.12$



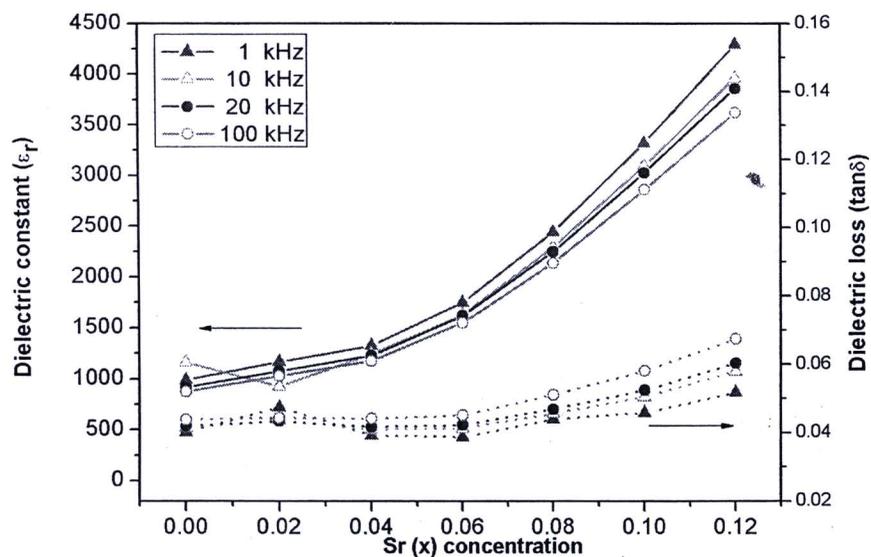
รูปที่ 4.19 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.14$



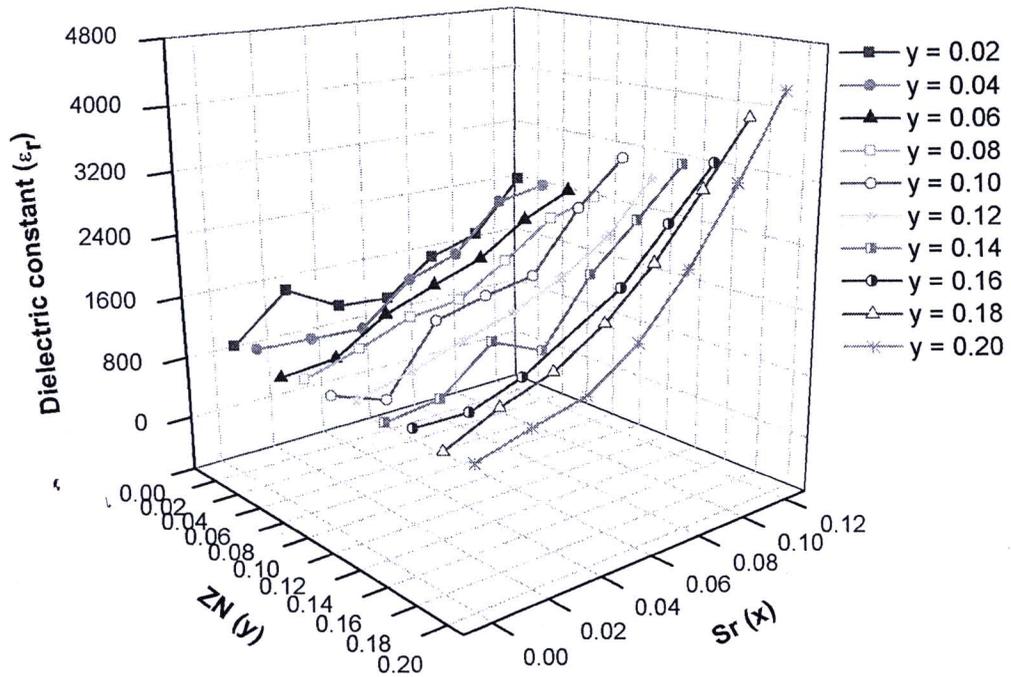
รูปที่ 4.20 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.16$



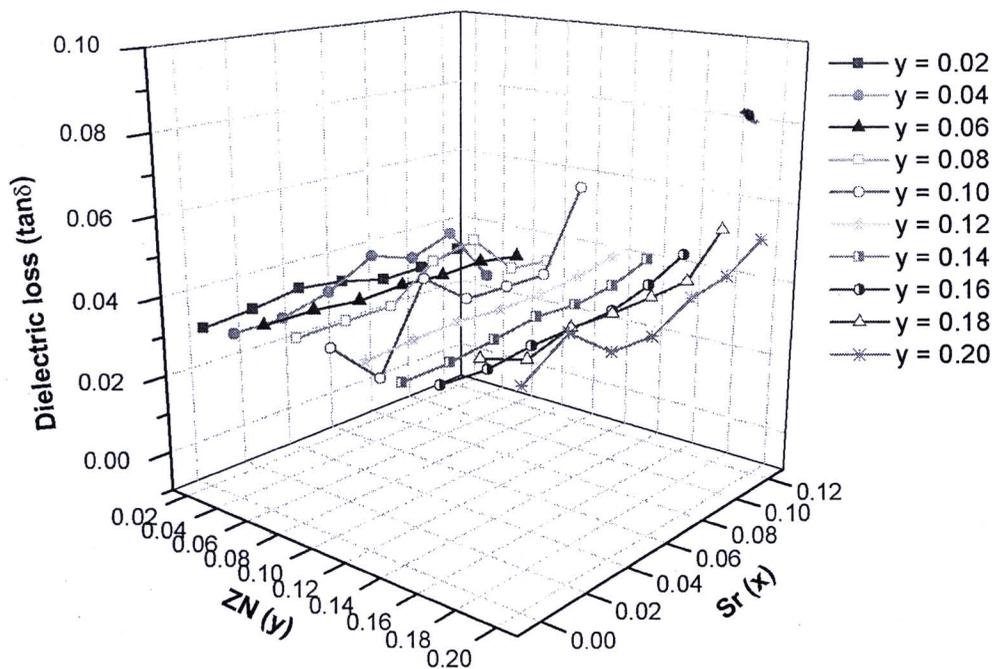
รูปที่ 4.21 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.18$



รูปที่ 4.22 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เงื่อนไข $y = 0.20$



รูปที่ 4.23 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ของเซรามิก PSZT-ZN ที่ความถี่ 1 kHz



รูป 4. 23 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PSZT-ZN ทุกเงื่อนไข ZN และ Sr วัดที่ 1 kHz พบว่าเมื่อปริมาณของ ZN และ Sr เพิ่มมากขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากกราฟที่ปริมาณ Sr เท่ากับ 0.00 ในทุกเงื่อนไข ZN จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าใกล้เคียงกันจากนั้นเมื่อปริมาณของ Sr เริ่มเพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่อยเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากและเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ ZN เพิ่มมากขึ้น คือที่เงื่อนไข ZN เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มในอัตราที่มากขึ้นกับปริมาณ Sr ที่มากขึ้นด้วย ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PSZT วัดที่ 1 kHz แสดงในรูป 4.24 จากกราฟพบว่า ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับสารเจือทั้ง Sr และ ZN อย่างเห็นได้ชัดเจน ในช่วงการเติมด้วย ZN ปริมาณน้อย ($ZN = 0.02 - 0.10$) แต่ก็มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของ ZN และ Sr เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงในช่วง ZN ตั้งแต่ 0.12 เป็นต้นไป

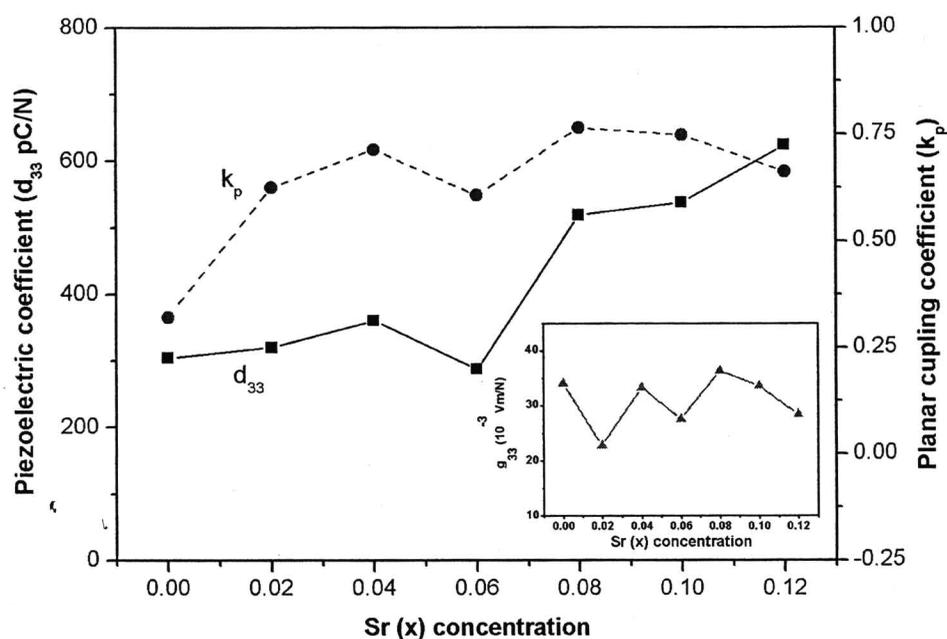
4.1.3.2 การตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริก สมบัติคู่ควบไฟฟ้ากลเชิงระนาบและ สมบัติความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient; d_{33}) สัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (voltage piezoelectric coefficient; g_{33}) สัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (Planar electromechanical coupling coefficient; k_p) วัดจากเซรามิกที่ผ่านการโพลิง (poling) ภายใต้อสนามไฟฟ้า 3 kV/mm) ที่อุณหภูมิ 60 ° ซเป็นเวลา 30 นาที ผลแสดงในรูป 4.25-4.34 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{33} ค่า k_p และ ค่า g_{33} เทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) จากรูปแสดงได้ว่าค่า d_{33} ค่า k_p และค่า g_{33} เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณของ Sr เปลี่ยน โดยจะเห็นได้ว่าค่าทั้ง 3 ค่านี้จะสอดคล้องกัน ค่าประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก PSZT-ZN จะอยู่ในช่วง 161 pC/N พบใน $ZN = 0.10$ Sr = 0.02 และสูงสุดเท่ากับ 778 pC/N ใน $ZN = 0.20$ Sr = 0.10 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้ากลเชิงระนาบเป็นค่าที่วัดได้จากความถี่ ณ อิมพีแดนซ์ต่ำสุดและสูงสุด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.28 – 0.78 ค่า k_p สูงสุดพบในเงื่อนไข $ZN = 0.18$ Sr = 0.04 จากกราฟ 4.25 -4.34 พบว่าในทุกเงื่อนไข ZN เมื่อปริมาณของ Sr เพิ่มขึ้นค่า d_{33} และ k_p มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะค่า d_{33} จะเพิ่มขึ้นอย่างมากกับปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดเจนที่เงื่อนไข $ZN = 0.04-0.20$ (กราฟ 4.26-4.34) และยังพบว่าค่า d_{33} จะขึ้นกับปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในเงื่อนไขของ ZN เริ่มมีค่าสูงขึ้น ในเงื่อนไข $ZN = 0.02 -0.10$ พบว่าค่า k_p จะเพิ่มขึ้นกับปริมาณของ Sr ในทุก

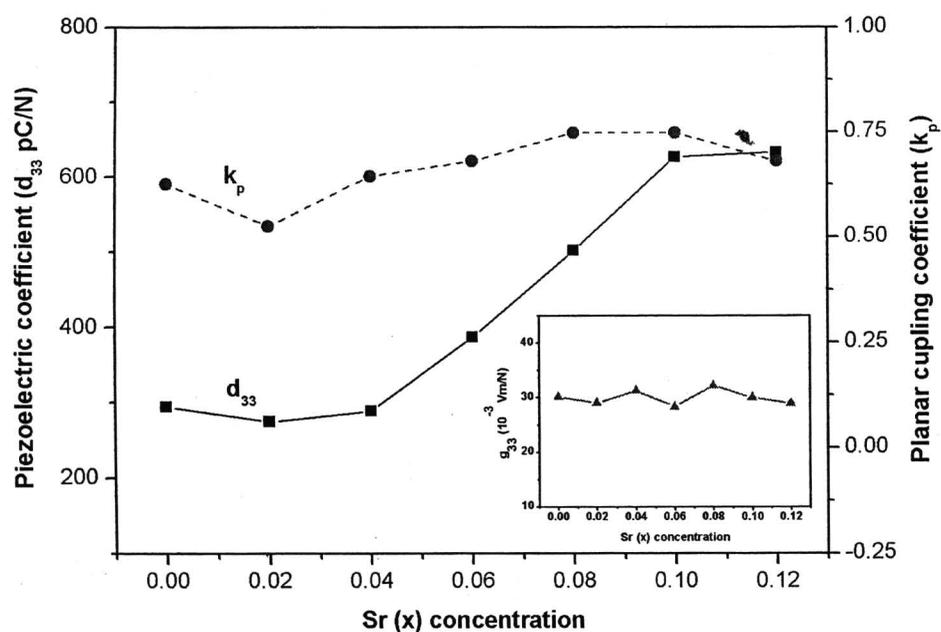
เมื่อ ZN เพิ่มขึ้นเป็น 0.12 จนถึง 0.20 ค่า k_p จะแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับ Sr ในช่วง 0.00 – 0.08 หลังจากนั้นจะลดต่ำลงที่ปริมาณ Sr เท่ากับ 0.10 และ 0.12 อธิบายได้ว่าเซรามิกจะแสดงค่า k_p สูงสุดในช่วง ZN เท่ากับ 0.02 – 0.10 แต่ถึงอย่างไรก็ตามค่า k_p ก็ยังคงแสดงค่าค่อนข้างสูง ส่วนค่า g_{33} คือค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ โดยค่า g_{33} เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{33} ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ 1 kHz วัดที่อุณหภูมิห้อง อธิบายได้ตามสมการ [15]

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

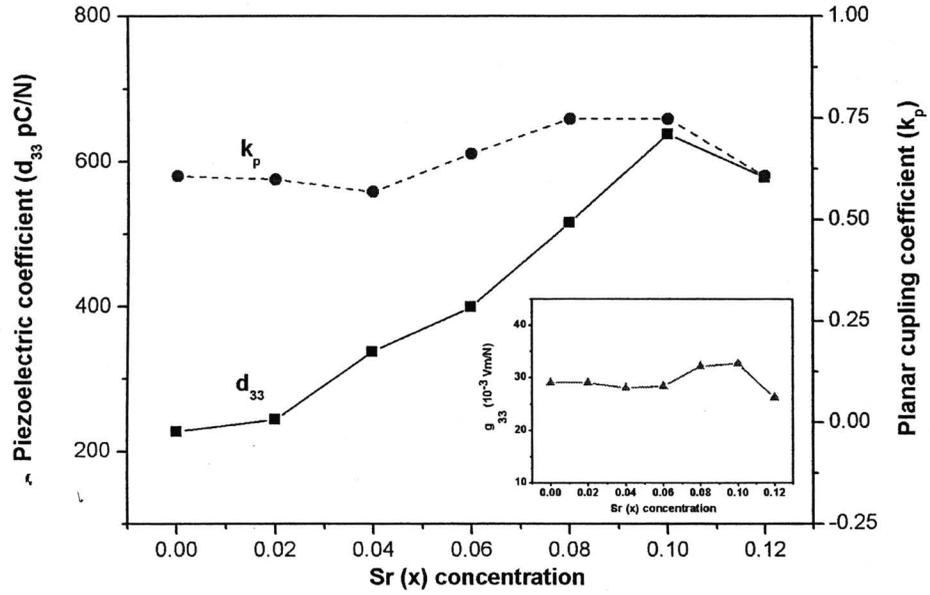
เมื่อ ϵ_r เป็น สภาพยอมของสูญญากาศ ϵ_r เป็นสภาพยอมสัมพัทธ์วัดอุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 kHz ผลที่ได้แสดงในรูปเล็กด้านขวา (รูป 4.25 – 4.34) พบว่ามีค่า g_{33} อยู่ในช่วงตั้งแต่ 20.63 – 36.29 ($\times 10^{-3}$) Vm/N ในทุกเงื่อนไขของ ZN พบว่าค่า g_{33} มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นกับปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณ ZN เพิ่มขึ้นจาก 0.12 ถึง 0.20 ค่า g_{33} มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอย่างมากกับปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันค่า d_{33} ที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณ Sr จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ไม่สูงมาก จึงทำให้ค่า g_{33} มีแนวโน้มลดลง ดังนั้นผลที่ได้แสดงได้ว่าผลของค่า d_{33} ค่า k_p และ ค่า g_{33} มีค่าที่เหมาะสมและสอดคล้องกันและแสดงสมบัติที่ดีในช่วง ZN เริ่มจาก 0.02 - 0.10 ในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนค่าปริมาณของ Sr และที่เงื่อนไข ZN = 0.12 – 0.20 ในช่วงการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Sr = 0.00 – 0.08 เท่านั้น ดังนั้นจากการอธิบายผลข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ สารเจือทั้ง Sr และ ZN เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้สมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดีได้ และสมบัติคูควบไฟฟ้าเชิงกลได้ อาจเป็นผลมาจากเป็นการเจือด้วยวาเลนดต์ที่เท่ากันของ Sr ใน A-site และการเจือด้วยวาเลนดต์ต่างกันที่มีไอออนมากกว่า ด้วย Nb ซึ่งโดยตัวเจือเหล่านี้จะไปปรับปรุงการจัดเรียงตัวใหม่ของผนัง โดเมน ไอออนที่เกินมาของตัวเจือจะไปลดช่องว่างของออกซิเจน ทำให้สภาพการเคลื่อนที่บริเวณผนัง โดเมนเพิ่มมากขึ้นและสามารถทำให้เกิดขั้วได้ง่ายจึงส่งผลทำให้เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่ทำการเจือด้วยในลักษณะนี้แสดงค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกที่มีค่า (d_{33}) สูง สัมประสิทธิ์คูควบไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) มีค่าสูงด้วย แต่ถ้าปริมาณของสารเจือมากขึ้นอาจจะทำให้ไอออนของตัวเจือไม่สามารถเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของไอออนตัวหลักในโครงสร้างผลึกได้จึงส่งผลทำให้สารที่เจือด้วย ZN และ Sr ปริมาณมากแสดงค่าพารามิเตอร์ทั้งสามค่านี้ต่ำลงได้



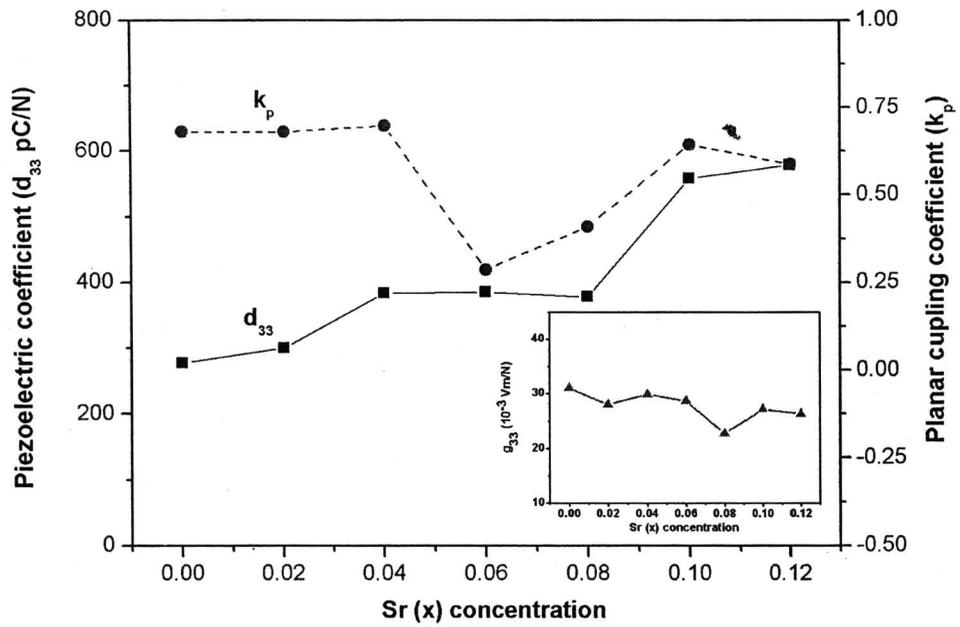
รูปที่ 4.25 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.02$



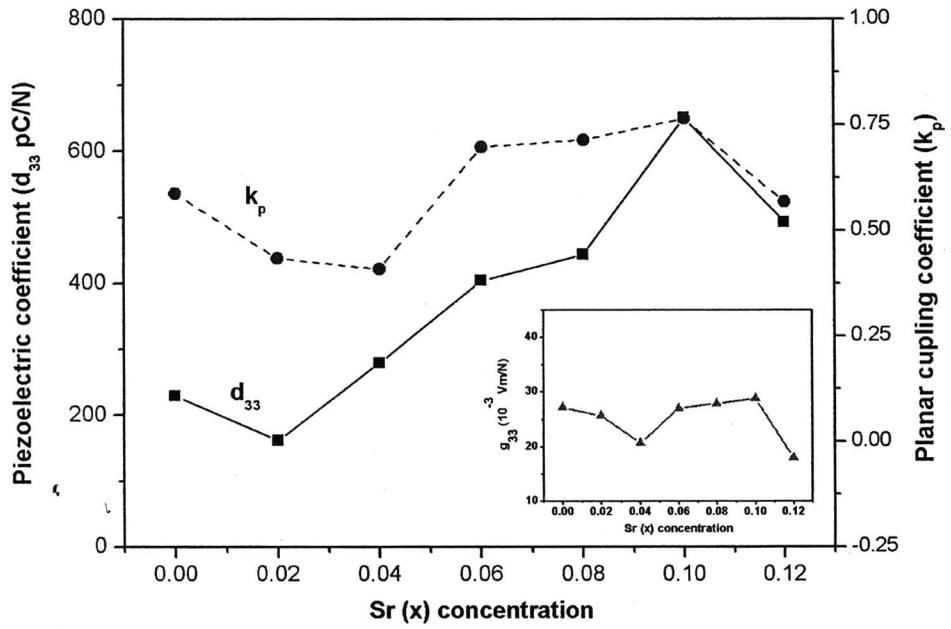
รูปที่ 4.26 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.04$



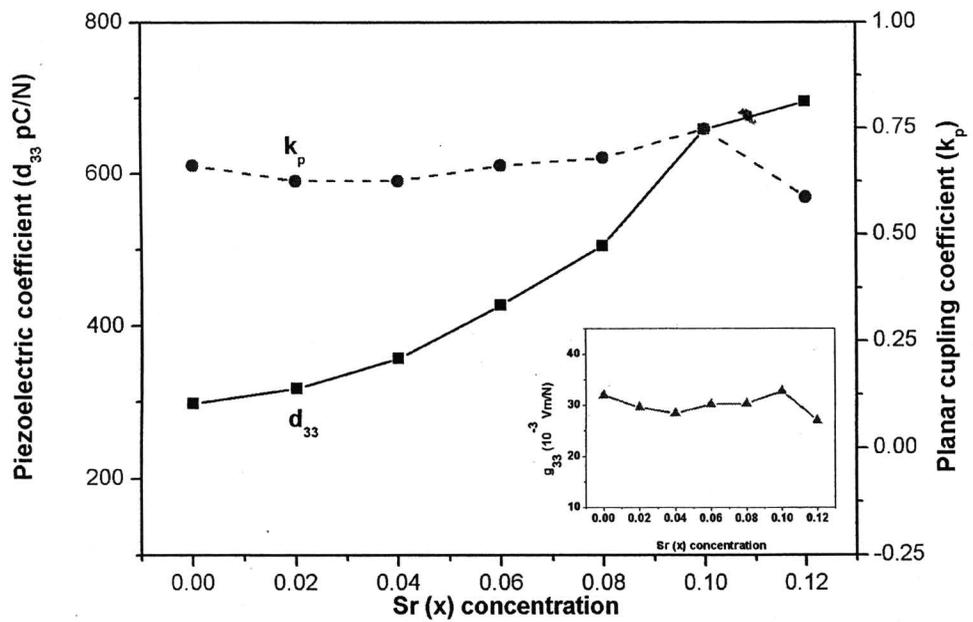
รูปที่ 4.27 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควมไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.06$



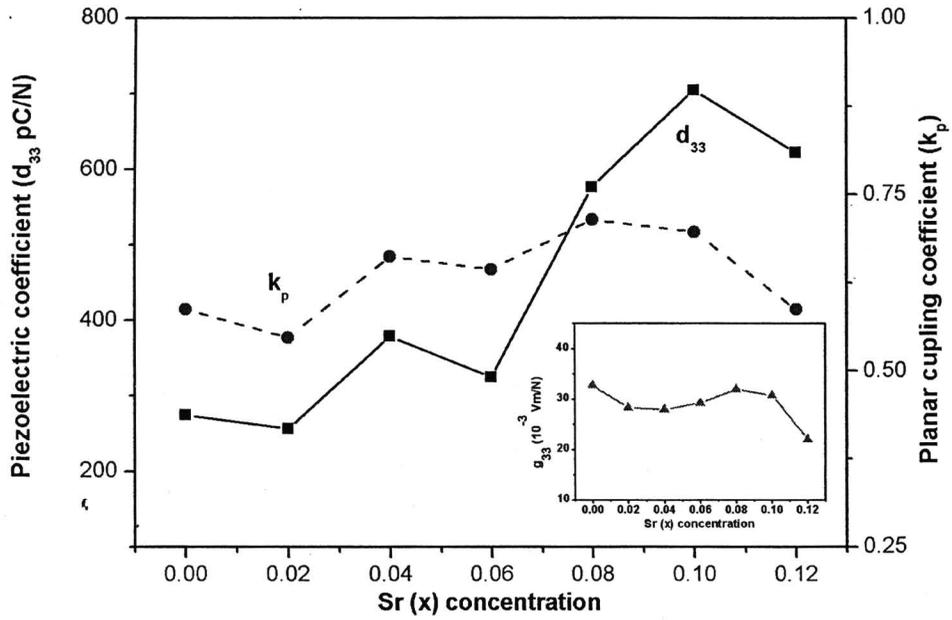
รูปที่ 4.28 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควมไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.08$



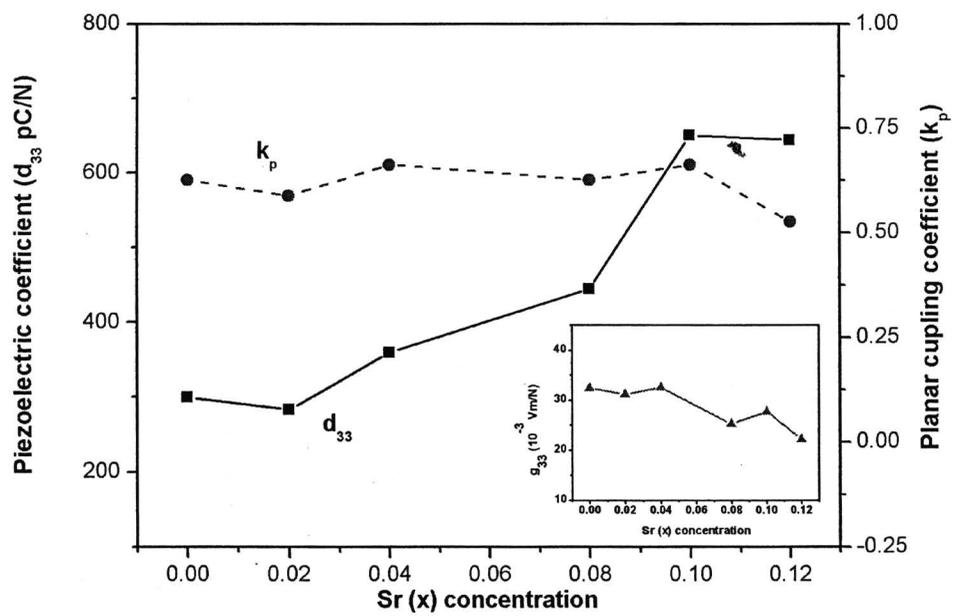
รูปที่ 4.29 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควมไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.10$



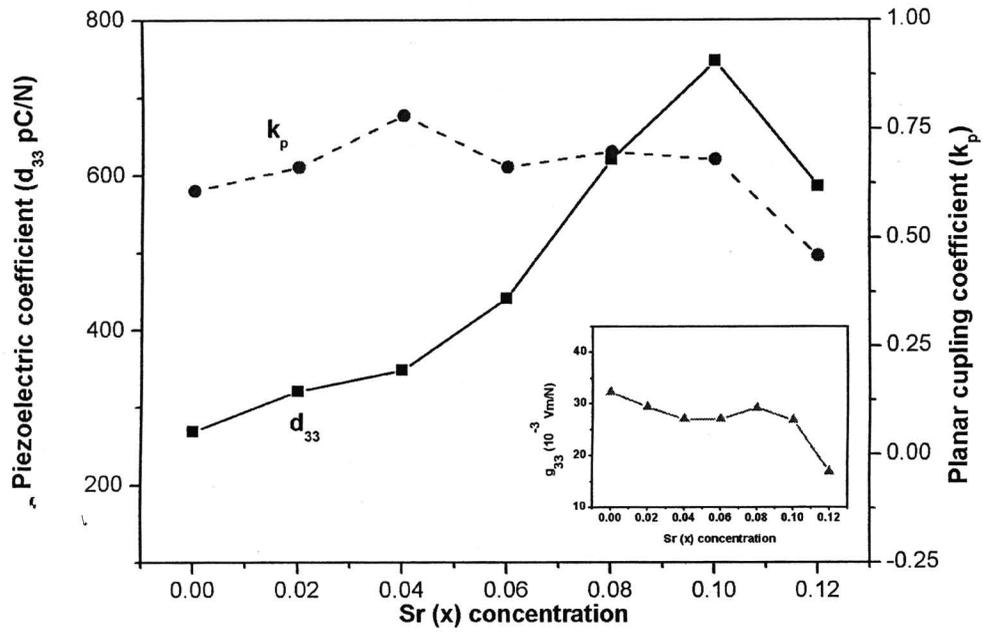
รูปที่ 4.30 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควมไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.12$



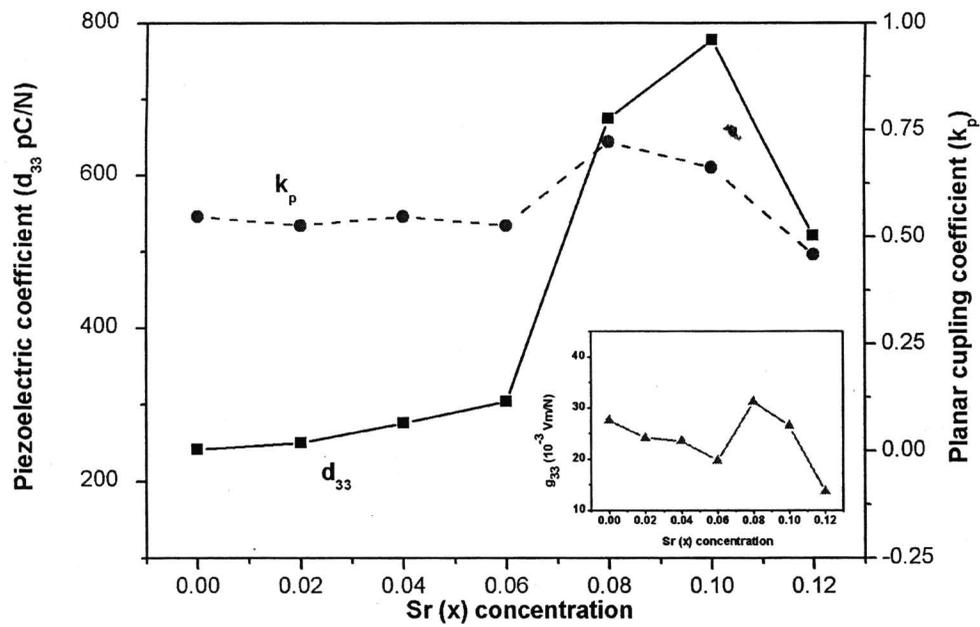
รูปที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.14$



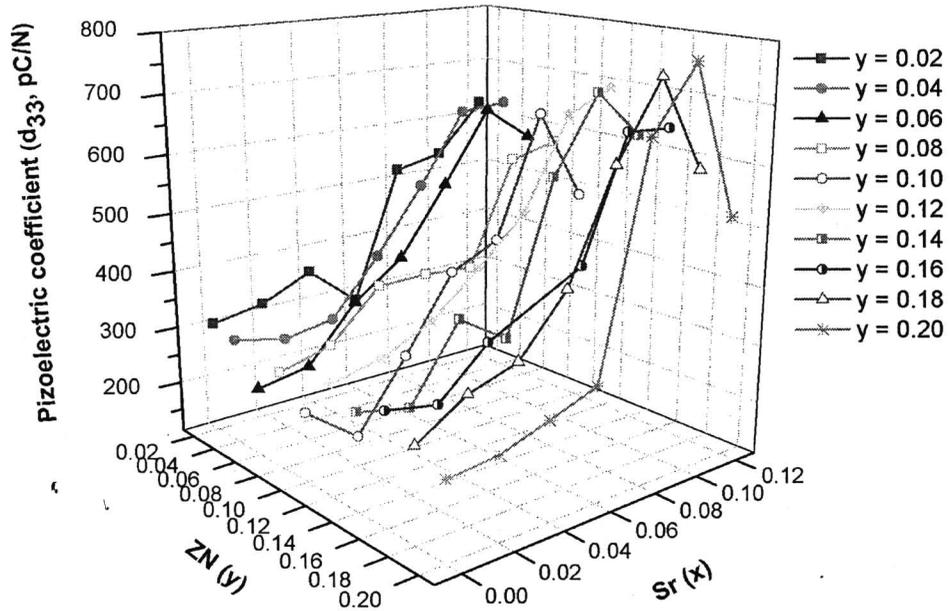
รูปที่ 4.32 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.16$



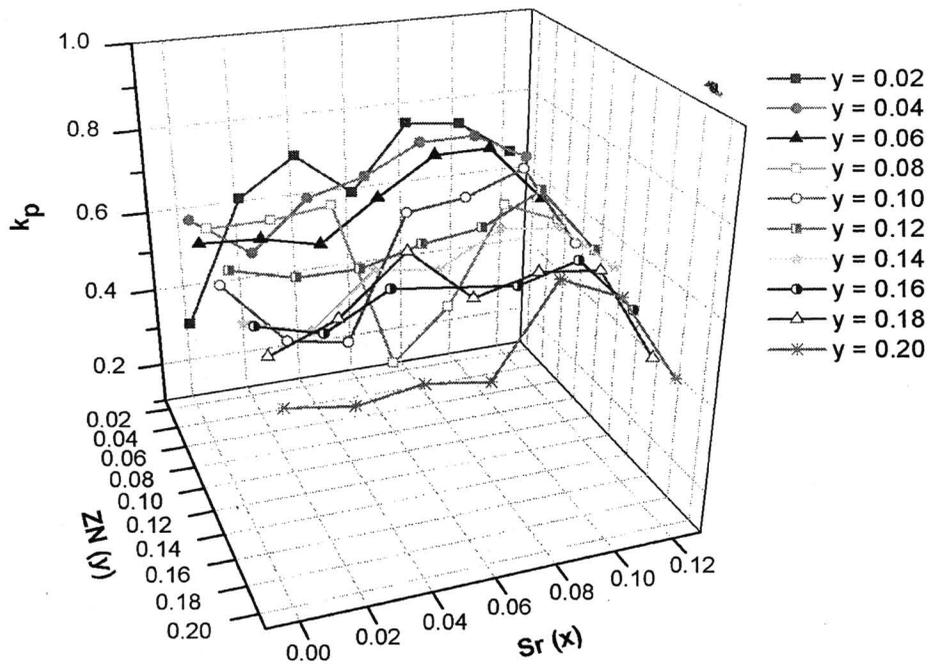
รูปที่ 4.33 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควมไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.18$



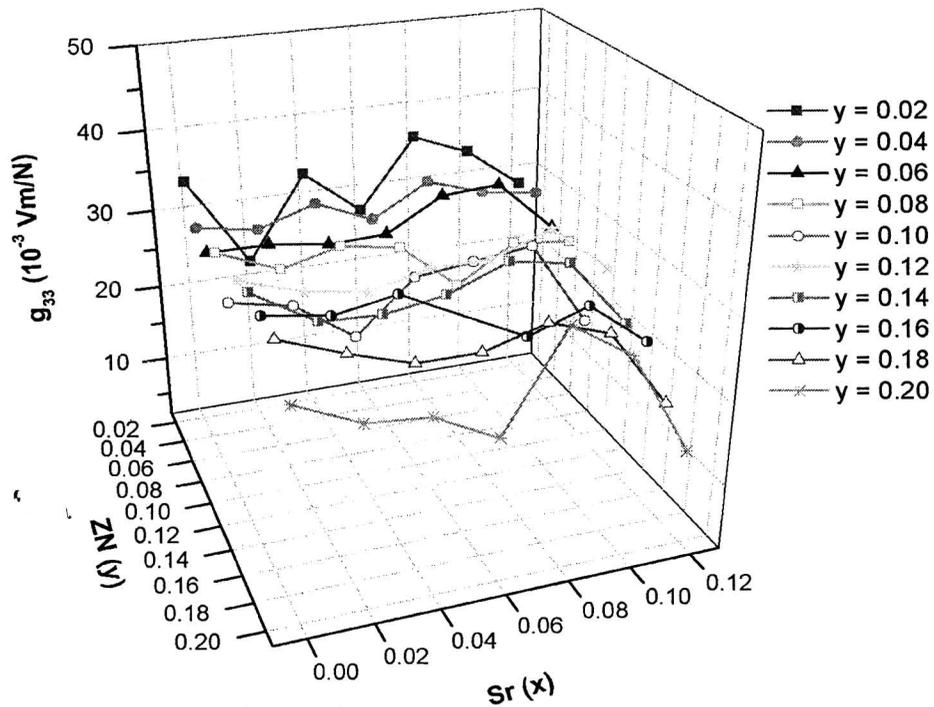
รูปที่ 4.34 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควมไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.20$



รูปที่ 4.35 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) PSZT-ZN เซรามิกในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า Zn (y) และ Sr (x)



รูปที่ 4.36 สมบัติคู่ควมไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) ของ PSZT-ZN เซรามิกในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลง ค่า Zn (y) และ Sr (x)



รูปที่ 4.37 สัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) ของ PSZT-ZN เซรามิกในทุกเงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงค่า Zn (y) และ Sr (x)

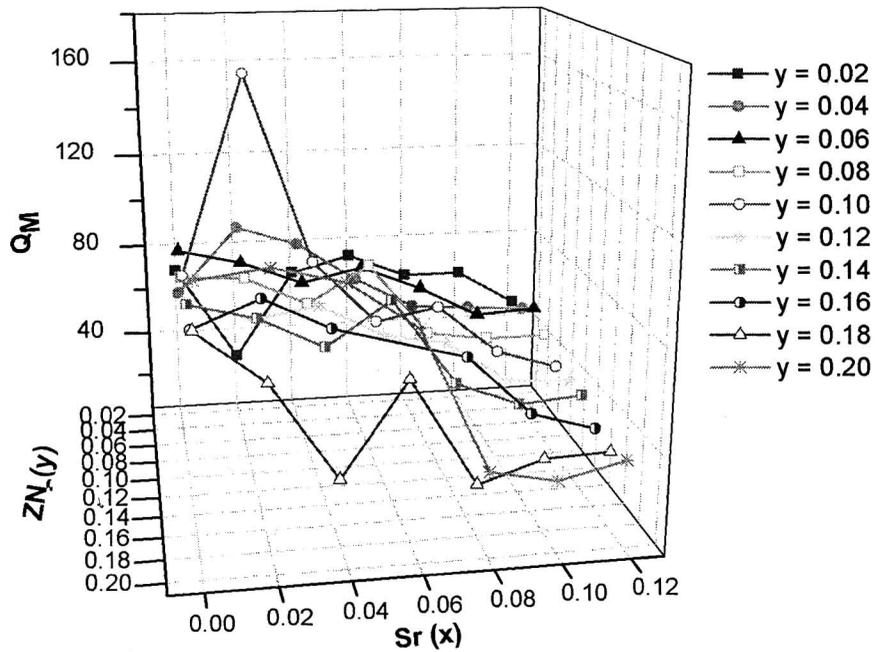
รูปที่ 4.35 4.36 และ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบค่า d_{33} ค่า k_p และค่า g_{33} ในทุกเงื่อนไข Zn และ Sr ตามลำดับ จากกราฟพบว่าค่าสมบัติทั้งสามนี้จะแสดงค่าในลักษณะที่คล้ายกันคือเมื่อปริมาณ Zn เพิ่มมากขึ้น และปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้น จากช่วง 0.00 – 0.08 ค่าทั้งสามก็จะเพิ่มขึ้นกับปริมาณ Sr เพิ่มขึ้นในลักษณะที่คล้ายกัน และเมื่อปริมาณของ Sr เพิ่มขึ้นเป็น 0.10 และ 0.12 พบว่าค่าทั้งสามพารามิเตอร์นี้จะเริ่มลดลง ซึ่งพบในทุกเงื่อนไขของ Zn ที่เปลี่ยนจาก 0.02 -0.20 ผลที่ได้แสดงให้เห็นได้ว่าสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) สมบัติไฟฟ้าคู่ควบกลเชิงระนาบ (k_p) และสมบัติความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) ของชิ้นงานที่ผ่านการทำขั้วจะแสดงค่าเพิ่มขึ้นกับปริมาณ Sr ในช่วง 0.00 – 0.10 (ค่า d_{33}) เท่านั้น และในช่วง ค่า Sr = 0.00-0.08 (ค่า k_p และ g_{33}) จะแสดงปริมาณของสารเจือที่ส่งผลทำให้เซรามิกแสดงสมบัติทั้งสามสมบัติที่ดีที่สุด อย่างเห็นได้ชัดเจนคือ ยิ่งถ้าปริมาณของ Zn เพิ่มขึ้น และปริมาณ Sr เท่ากับ 0.10 เซรามิกกลุ่มนี้ก็จะแสดงสมบัติ d_{33} ซึ่งมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 778 pC/N ซึ่งพบในเงื่อนไข Zn = 0.20 และ y = 0.10 ดังนั้นบอกได้ว่าค่า d_{33} ที่องค์ประกอบของเซรามิกนี้ถือได้ว่าเป็นระบบเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมและต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตัวตรวจจับต่อไป

4.1.3.3 การตรวจสอบแฟกเตอร์คุณภาพเชิงกล (Q_M) และค่าการสูญเสีย ($\tan \delta$)

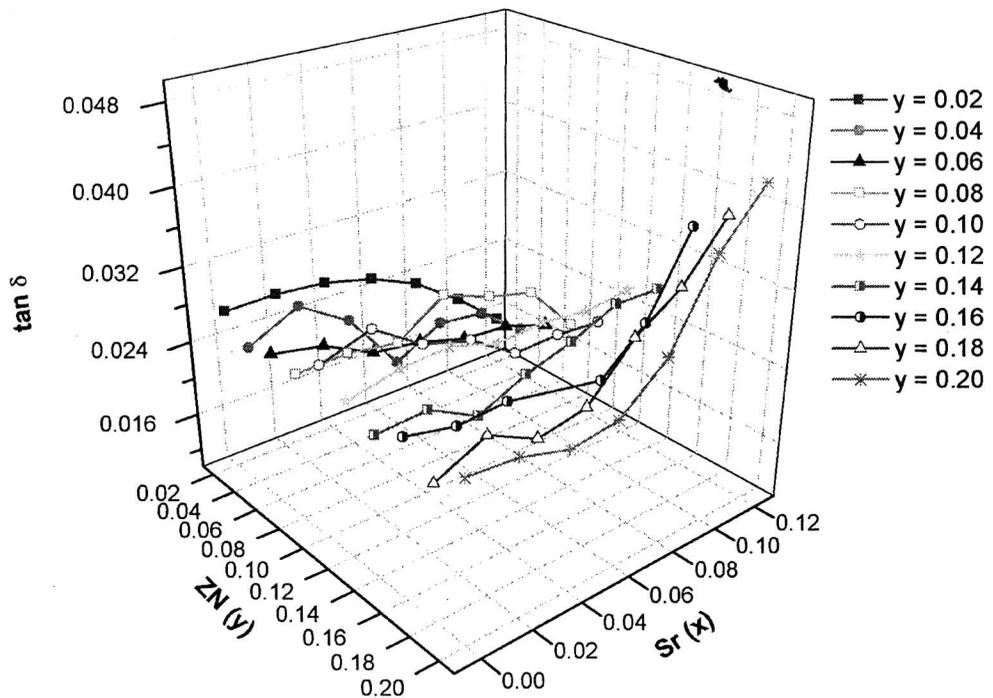
แฟกเตอร์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor; Q_M) และค่าการสูญเสียที่ทำการวัด ภายหลังการโพล โดยวัดที่ 1 kHz ค่า Q_M จะเป็นค่าอธิบายอัตราส่วนของความต้านทานต่อ กระแสไฟฟ้า (reactance) ต่อการต้านทาน (resistance) ในวงจรรวม คำนี้นำมาใช้อธิบาย ความแหลม (sharpness) ของพีคเรโซแนนซ์ ซึ่งค่า Q_M เป็นค่าที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าความถี่แอนติเรโซแนนซ์ และค่าความจุไฟฟ้าที่ 1 kHz และนำมาคำนวณได้ตามสมการ [32]

$$Q_M = \frac{1}{2\pi F_r Z_m C_o} \left(\frac{F_a^2}{F_a^2 - F_r^2} \right)$$

เมื่อ F_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ในหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) F_a คือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ในหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) Z_m คือ อิมพีแดนซ์ในหน่วยโอห์ม (Ω) วัดที่ F_r และ C_o ค่าความจุไฟฟ้าในหน่วยฟารัด (F) วัดที่ 1 kHz ผลที่ได้แสดงในรูป 4.38 และค่าการสูญเสียหลังโพลของเซรามิกวัดที่ 1 kHz แสดงในรูป 4.39 จากกราฟ 4.38 จะเห็นได้ว่าค่า Q_M มีแนวโน้มลดลงเมื่อ ZN เพิ่มมากขึ้นและลดลงอย่างมากกับ ปริมาณ Sr ที่เพิ่มขึ้น สังเกตจากกราฟในทุกเงื่อนไขของ ZN เทียบกับปริมาณของ Sr เพิ่มขึ้นจาก 0.00 – 0.10 หลังจากนั้นค่า Q_M ก็จะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Sr เพิ่มเป็น 0.12 ซึ่งพบในทุกเงื่อนไขการเติม สาร ZN ในเซรามิกระบบนี้ จะเห็นได้ว่าค่า Q_M จะแสดงในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับ ค่า d_{33} และ ค่า k_p ผลที่ได้สอดคล้องกับการเจือสารที่มีวาเลนซ์มากกว่าและเท่ากันของ Nb และ Zn ในตำแหน่ง B-site ของเซรามิก แสดงว่าเมื่อเจือสารที่วาเลนซ์มากกว่าจะส่งผลต่อกลไกที่ทำให้ค่า Q_M มีค่าต่ำ เนื่องจากการเกิดช่องว่างของตะกั่ว ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโดเมนเกิดขึ้นได้ง่ายมากกว่าผลึกที่ สมบูรณ์จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของโดเมนเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลต่อค่า Q_M โดยค่า Q_M ที่ได้มีค่าในช่วง 30 – 80 ซึ่งค่าที่แสดงนี้แสดงค่าที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากว่าค่า Q_M ที่เหมาะสมนำไป ประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตัวตรวจจับต้องการค่า Q_M ที่สูง ในรูปที่ 4.39 แสดงค่าการสูญเสีย ($\tan \delta$) ซึ่ง ทำการวัดจากเซรามิกที่ผ่านการโพล และวัดที่ความถี่ 1 kHz พบว่าค่า $\tan \delta$ มีแนวโน้มลดลงกับ ปริมาณ Sr ที่เพิ่มขึ้นในช่วงของ ZN เท่ากับ 0.00 – 0.10 หลังจากนั้นเมื่อ ZN เพิ่มเป็น 0.12 และเข้าสู่ 0.20 ค่า $\tan \delta$ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้นซึ่งผลที่ได้แสดงว่าเกิดขึ้น เนื่องมาจากการเจือสารเป็นแบบเชิงซ้อนของ Sr และ ZN ทำให้การแทนที่ในโครงสร้างผลึกมีความ ไม่สมบูรณ์จึงส่งผลทำให้ค่าการสูญเสียหลังการ โพลเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.38 แฟกเตอร์คุณภาพทางกล (Q_M) ของเซรามิก PSZT-ZN เซรามิกในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า Zn (y) และ Sr (x)



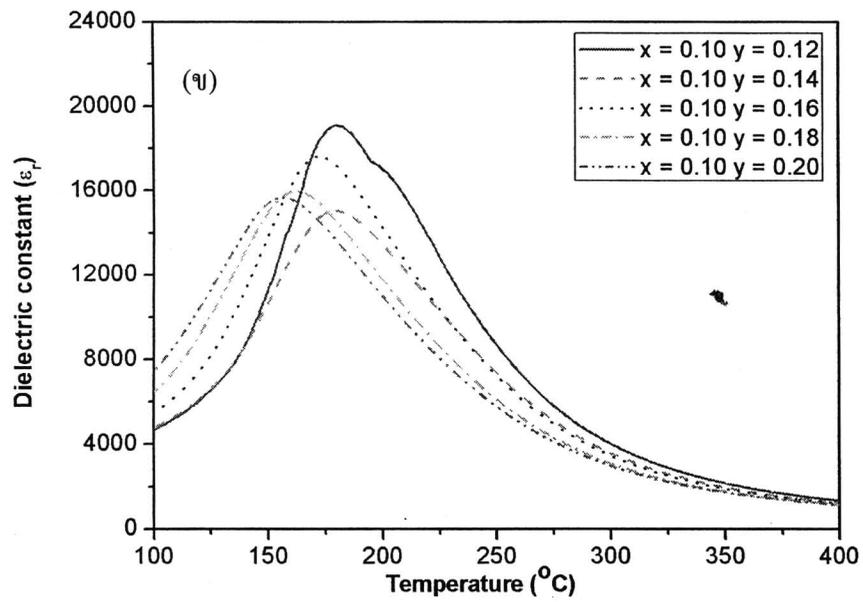
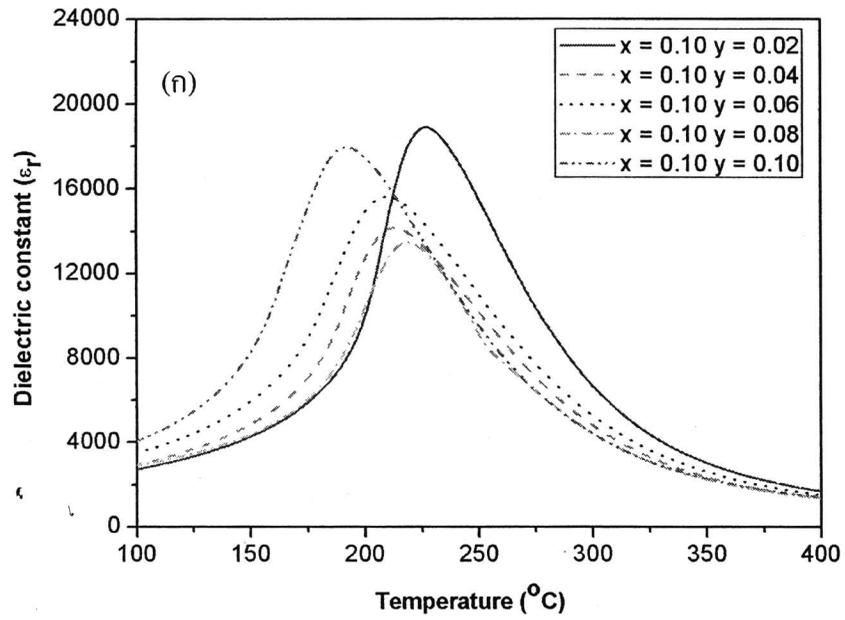
รูปที่ 4.39 ค่าการสูญเสีย ($\tan \delta$) วัดที่ 1 kHz ภายหลังการโพลของของเซรามิก PSZT-ZN ในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า Zn (y) และ Sr (x)

4.1.3.4 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูง

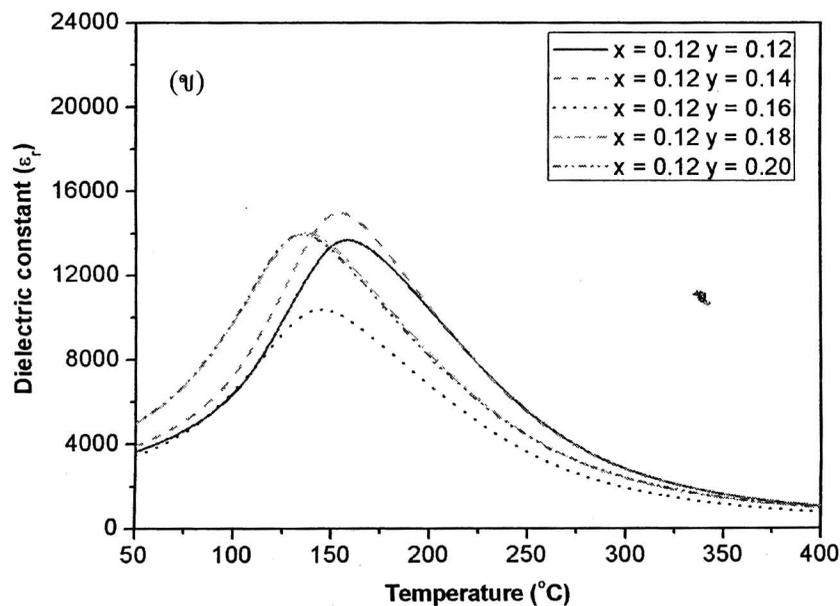
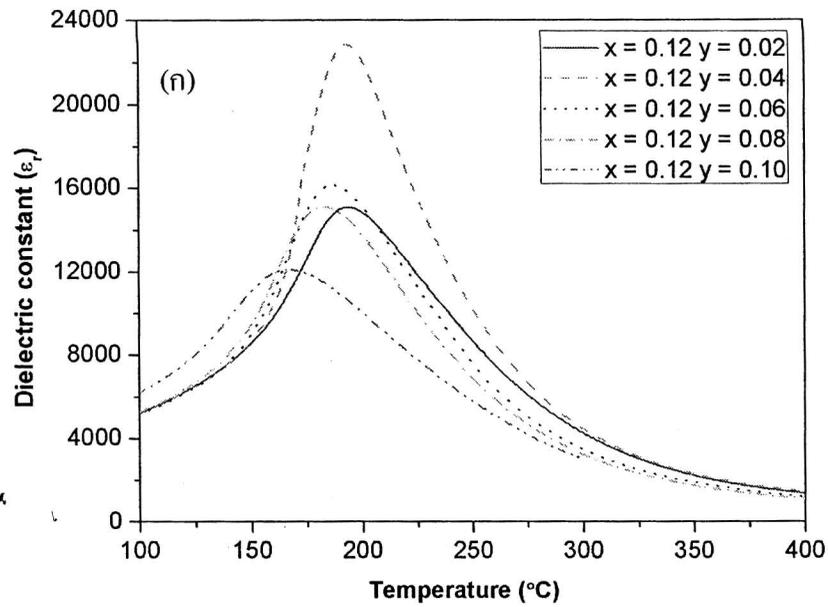
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) วัดเทียบกับอุณหภูมิ ตั้งแต่ 30°C จนถึง 400°C โดยวัดจากเซรามิกที่ผ่านการทำซ้ำด้วยกาวเงินมาวัดที่ความถี่ 1 kHz 10 kHz 100 kHz 500 kHz และ 1 MHz แต่ในการรายงานนี้จะนำเสนอในส่วนของการวัดที่ความถี่ 1 kHz และเป็นค่าที่แสดงจากชิ้นงานเซรามิกในเงื่อนไข $Sr = 0.10$ และ 0.12 ในทุกเงื่อนไข ZN เนื่องจากว่าเซรามิกในเงื่อนไข $Sr = 0.10$ และ 0.12 นี้ จากการรายงานผลของสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง จะแสดงค่าที่สูงสุด ณ เงื่อนไขสองเงื่อนไขนี้ ซึ่งสังเกตเห็นว่าจะเกิดขึ้นในทุกเงื่อนไข ZN ดังนั้นจึงเลือกที่เงื่อนไขเหล่านี้มาทำการทดสอบดูความแตกต่างของสมบัติไดอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ผลที่ได้จากการตรวจสอบแสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.3.4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของของเซรามิกในระบบ PSZT-ZN วัดเทียบกับอุณหภูมิในช่วง $30 - 400^\circ\text{C}$ แสดงในรูป 4.40 และรูป 4.41 ซึ่งแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกเงื่อนไข $Sr(x)$ เท่ากับ 0.10 และ เงื่อนไข $Sr(x)$ เท่ากับ 0.12 ตามลำดับ จากกราฟรูป 4.40 (ก) แสดงเงื่อนไขของเซรามิกที่เติม $Sr(x) = 0.10$ เปลี่ยนค่า ZN (y) จาก $0.02 - 0.10$ ส่วนรูป 4.40 (ข) แสดงเงื่อนไขของเซรามิกที่เติม $Sr(x) = 0.10$ เปลี่ยนค่า y จาก $0.12 - 0.20$ ผลที่ได้พบว่าคุณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด (ϵ_{max}) จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับปริมาณของสารเติม ZN ที่เปลี่ยนไป โดยค่า ϵ_{max} จะมีค่าอยู่ในช่วง $13457 - 19082$ ซึ่งค่าสูงสุดพบในเซรามิกเงื่อนไข ZN เท่ากับ 0.12 ส่วนในรูป 4.42 (ก) และ (ข) แสดงค่าไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิกใน เงื่อนไข $Sr(x)$ เท่ากับ 0.12 จะสังเกตเห็นว่าค่า ϵ_{max} จะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไข $Sr = 0.10$ (รูป 4.40) โดยค่า ϵ_{max} มีค่าอยู่ในช่วง $10380 - 22863$ ซึ่งค่า ϵ_{max} สูงสุดพบในเซรามิกเงื่อนไข ZN เท่ากับ 0.02 เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองเงื่อนไข Sr พบว่าค่า ϵ_{max} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Sr เพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองนี้บอกได้ว่าการเจือสารด้วย Sr และ ZN ในเซรามิก PZT จะส่งผลต่อค่า ϵ_{max} ได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเจือทั้งสอง เนื่องจากว่าระบบเซรามิกนี้เป็นการเจือสารในลักษณะเชิงซ้อน จึงไม่สามารถระบุตำแหน่งของ A-site และ B-site ที่แน่นอนหรือบอกชัดเจนได้ ค่าที่แสดงออกมาจึงเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับปริมาณที่เจือเข้าไปในเซรามิก



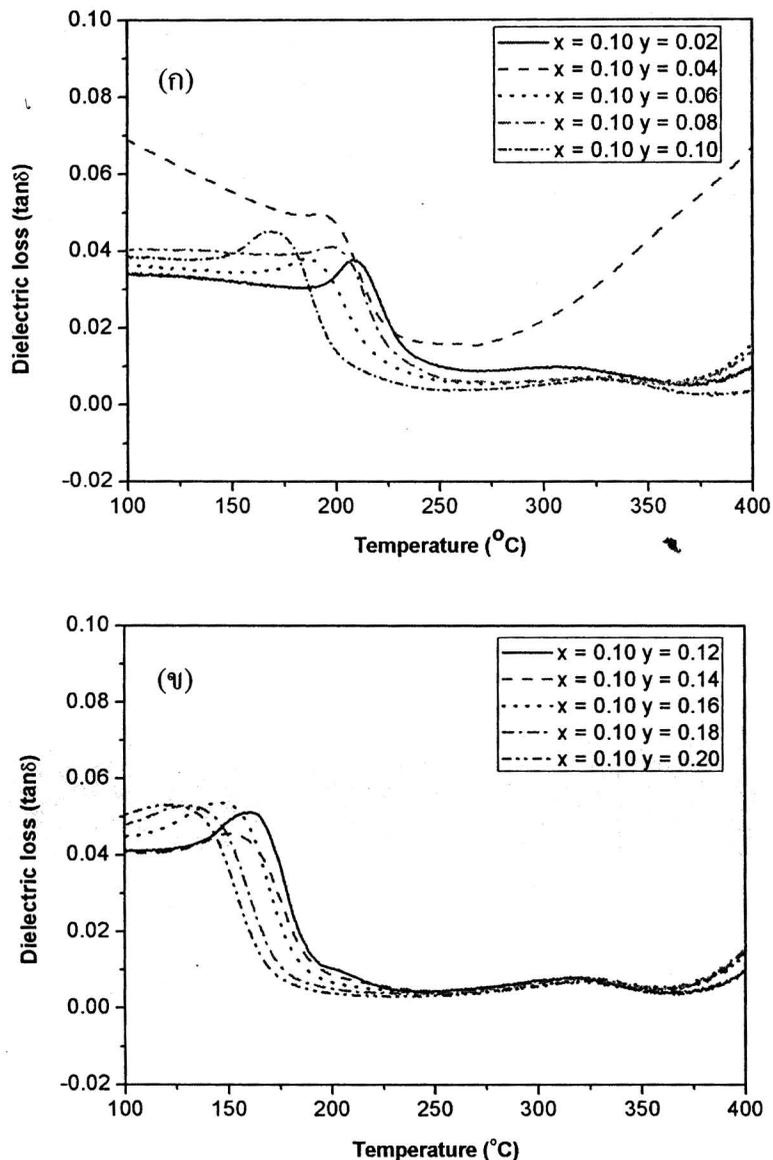
รูปที่ 4.40 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก PSZT-ZN เจือไนเซียม Sr (x) = 0.10 เมื่อ (ก) ปริมาณ ZN (y) = 0.02 – 0.10 และ (ข) ปริมาณ ZN (y) = 0.12 - 0.20



รูปที่ 4.41 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก PSZT-ZN เซื่อนโซ Sr (x) = 0.12 เมื่อ (ก) ปริมาณ ZN (y) = 0.02 – 0.10 และ (ข) ปริมาณ ZN (y) = 0.12 - 0.20

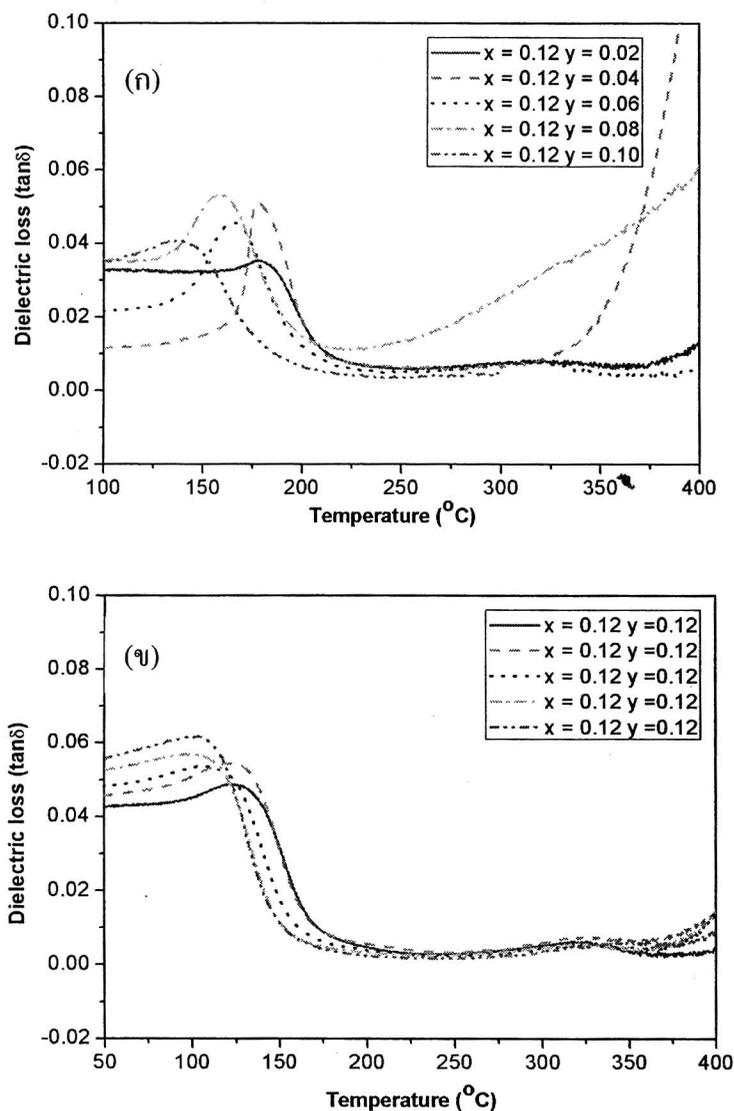
รูป 4.42 และ รูป 4.43 แสดงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก เซื่อนโซ Sr (x) = 0.10 และ Sr (x) = 0.12 ตามลำดับ จากรูป 4.42 (ก) พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 100 – 200 ° ซ ค่าการสูญเสียมีค่ามากประมาณ 0.03 – 0.06 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น หรืออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสพบว่าค่าการสูญเสียจะลดลงเรื่อยๆและจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 250 –

350 ° ซ โดยที่ค่าการสูญเสียจะเกิดในระดับที่ต่ำมากคือน้อยกว่า 0.02 หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไปค่านี้ก็จะมีเพิ่มมากขึ้นอย่างมากซึ่งเป็นการแสดงว่าที่อุณหภูมินี้เป็นช่วงของอุณหภูมิที่ไม่เหมาะต่อการนำมาใช้งาน ในรูป 4.42 (ก) ค่าการสูญเสียก็แสดงพฤติกรรมในลักษณะที่คล้ายกันแต่ช่วงหรือตำแหน่งของการเปลี่ยนค่าการสูญเสียจากมากไปน้อยจะต่างกันตามอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของสาร และสังเกตว่าที่ปริมาณ ZN เพิ่มมากขึ้น ช่วงการคงอยู่ของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำและคงที่นั้นจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิช่วงกว้างได้ (ดูในรูป 4.42 (ข) อุณหภูมิ 200 – 400 ° ซ) และพบว่าเมื่อปริมาณ ZN เพิ่มมากขึ้นค่าการสูญเสียในช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4. 42 ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก PSZT-ZN เจือไน Sr (x) = 0.10 เมื่อ (ก) ปริมาณ ZN (y) = 0.02 – 0.10 และ (ข) ปริมาณ ZN (y) = 0.12 - 0.20

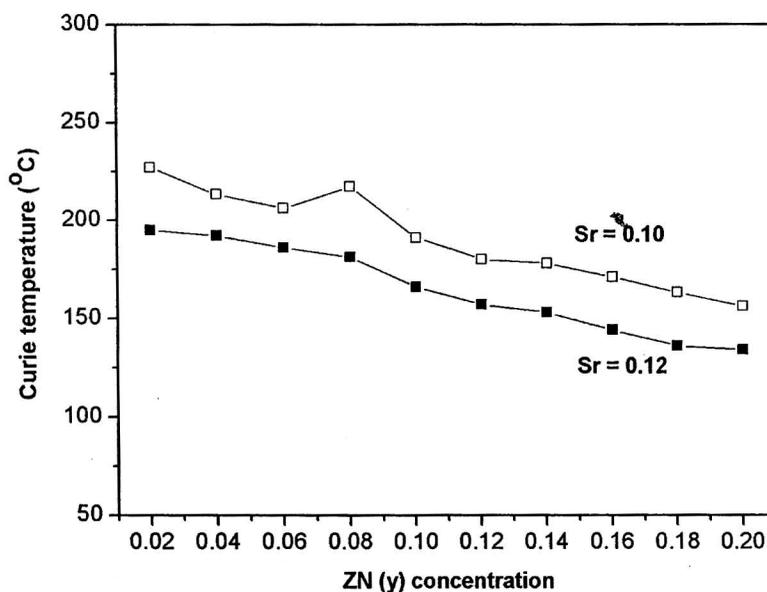
ในรูป 4.43 (ก) และ (ข) แสดงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูงของเซรามิกในเงื่อนไข Sr (y) เท่ากับ 0.12 จากกราฟพบว่าแสดงพฤติกรรมที่คล้ายกับกรณีเงื่อนไข Sr เท่ากับ 0.10 โดยที่ช่วงปริมาณสาร ZN ต่ำ วัสดุจะแสดงค่าการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นอย่างมากที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำคือเกิดที่อุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (30 - 300 °ซ) แต่เมื่อ ZN เพิ่มมากขึ้น (รูป 4.43(ข)) ค่าการสูญเสียที่ต่ำจะคงอยู่ในช่วงของอุณหภูมิช่วงกว้าง (150 - 400 °ซ) และในช่วงอุณหภูมินี้ค่าการสูญเสียมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากในทุกเงื่อนไข ZN ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าการสูญเสียในช่วงการเปลี่ยนเฟสในกราฟรูป 4.43 ก และ ข พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ ZN (y) ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.43 ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr (x) = 0.12 เมื่อ (ก) ปริมาณ ZN (y) = 0.02 - 0.10 และ (ข) ปริมาณ ZN (y) = 0.12 - 0.20

4.1.3.4.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิก PSZT-ZN

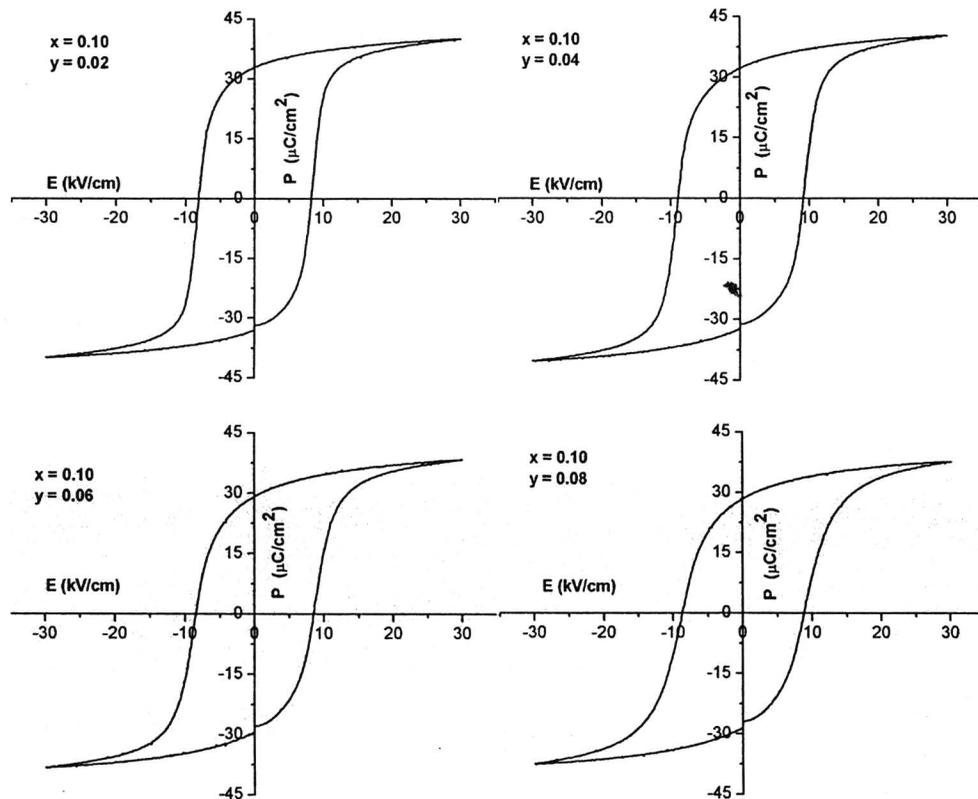
การลดลงในอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดของเซรามิก PSZT-ZN แสดงในรูปที่ 4.44 ซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (Curie temperature) ที่เงื่อนไข Sr = 0.10 และ Sr = 0.12 จากกราฟทั้งสองเงื่อนไขจะพบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะลดลงกับปริมาณของ ZN ที่เพิ่มขึ้น โดยจะลดลงจาก 227 ถึง 156 ในเงื่อนไข Sr = 0.10 ส่วนในเงื่อนไข Sr = 0.12 อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะลดลงจาก 195 – 134 เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองกราฟพบว่าปริมาณ Sr เพิ่มมากขึ้นอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะลดลง ซึ่งผลของอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสที่ต่ำมากอาจจะเนื่องมาจาก การเพิ่มขึ้นของปริมาณ Sr จะไปทำให้เกิดการหดตัวของออกซิเจนที่ตำแหน่ง octahedrals ซึ่งไอออนที่เกาะกันอย่างหลวมๆ ไม่นั่น จะไปเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์คู่ขั้วขึ้นได้ง่าย ซึ่งพฤติกรรมนี้จะนำไปสู่การลดลงในอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของสารเซรามิก PSZT-ZN [48] ปริมาณ Nb ที่เพิ่มขึ้น จะแสดงกลไกการเคลื่อนของผนังโดเมนให้เกิดขึ้นได้ง่ายจึงส่งผลทำให้ อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสต่ำลง [49]



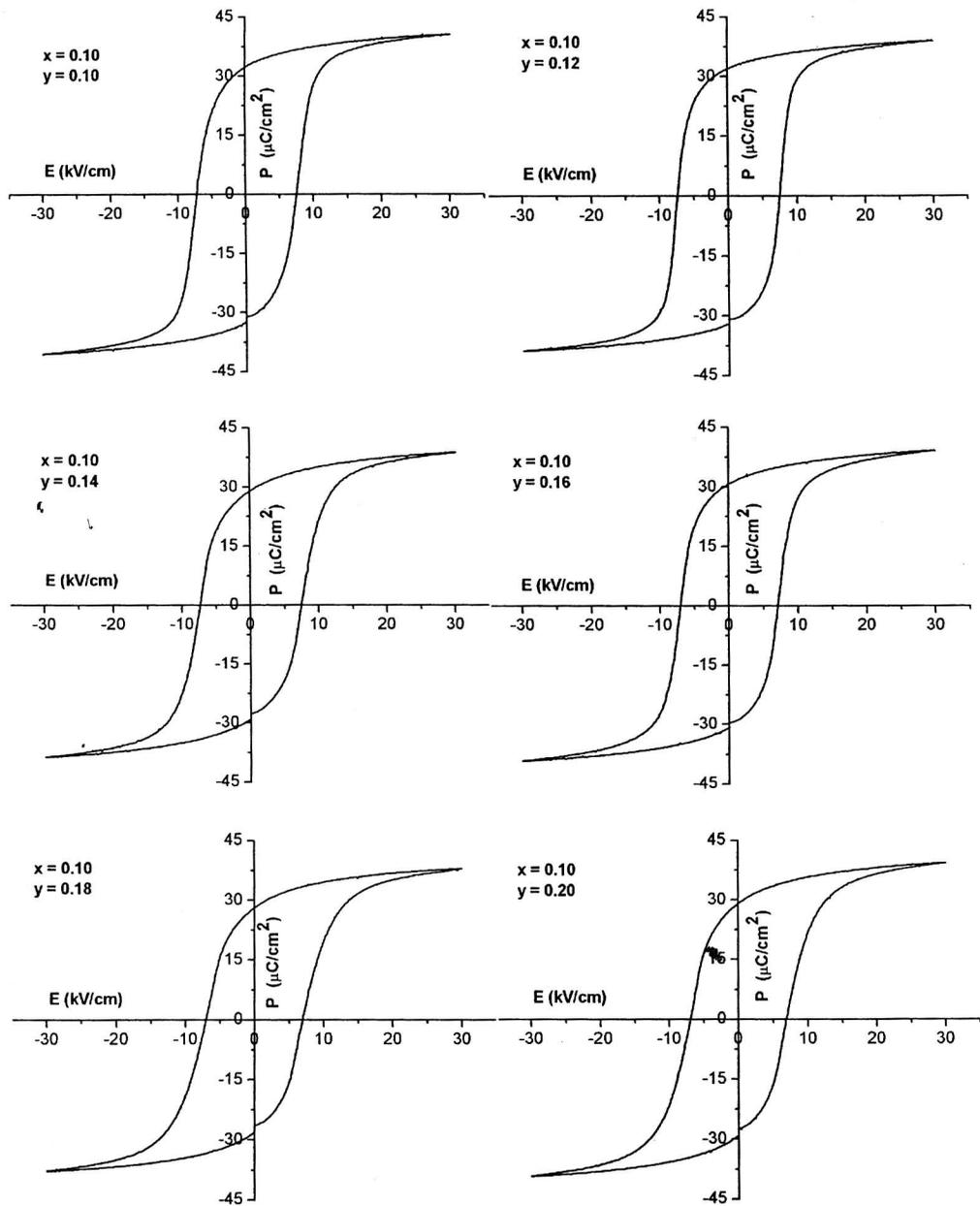
รูปที่ 4.44 อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr = 0.10 และ เงื่อนไข Sr = 0.12

4.1.3.5 การตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PSZT-ZN โดยการวิเคราะห์จากวงฮิสเทอรีซิส เพื่อทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) และโพลาริเซชัน (P) หรือ (P-E hysteresis loop) ของเซรามิก ซึ่งได้ทำการตรวจสอบที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ 3 kV ผลแสดงในรูป 4.45 จากกราฟพบว่าทุกเงื่อนไขของเซรามิกจะแสดงพฤติกรรมของเฟอร์โรอิเล็กทริก และพบว่าเมื่อปริมาณของ ZN (y) เพิ่มมากขึ้น วงฮิสเทอรีซิสมีการเปลี่ยนแปลงแบบแคบลง (slim) มากยิ่งขึ้น เมื่อสังเกตจากกราฟ 4.45 พบว่าในเงื่อนไข ZN (y) เพิ่มขึ้นจาก 0.02-0.08 วงฮิสเทอรีซิสจะแสดงในลักษณะเล็กลงและเป็นสี่เหลี่ยมที่แคบลงแต่เมื่อปริมาณ ZN เพิ่มขึ้นเป็น 0.10 วงฮิสเทอรีซิสกลับมีความกว้างมากขึ้นและหลังจากนั้นก็แสดงแนวโน้มที่ลดลงในวงฮิสเทอรีซิสเมื่อปริมาณของ ZN เพิ่มขึ้นจาก 0.10 -0.20



รูปที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) และโพลาริเซชัน (P) (P-E loop) ของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr (x) เท่ากับ 0.10

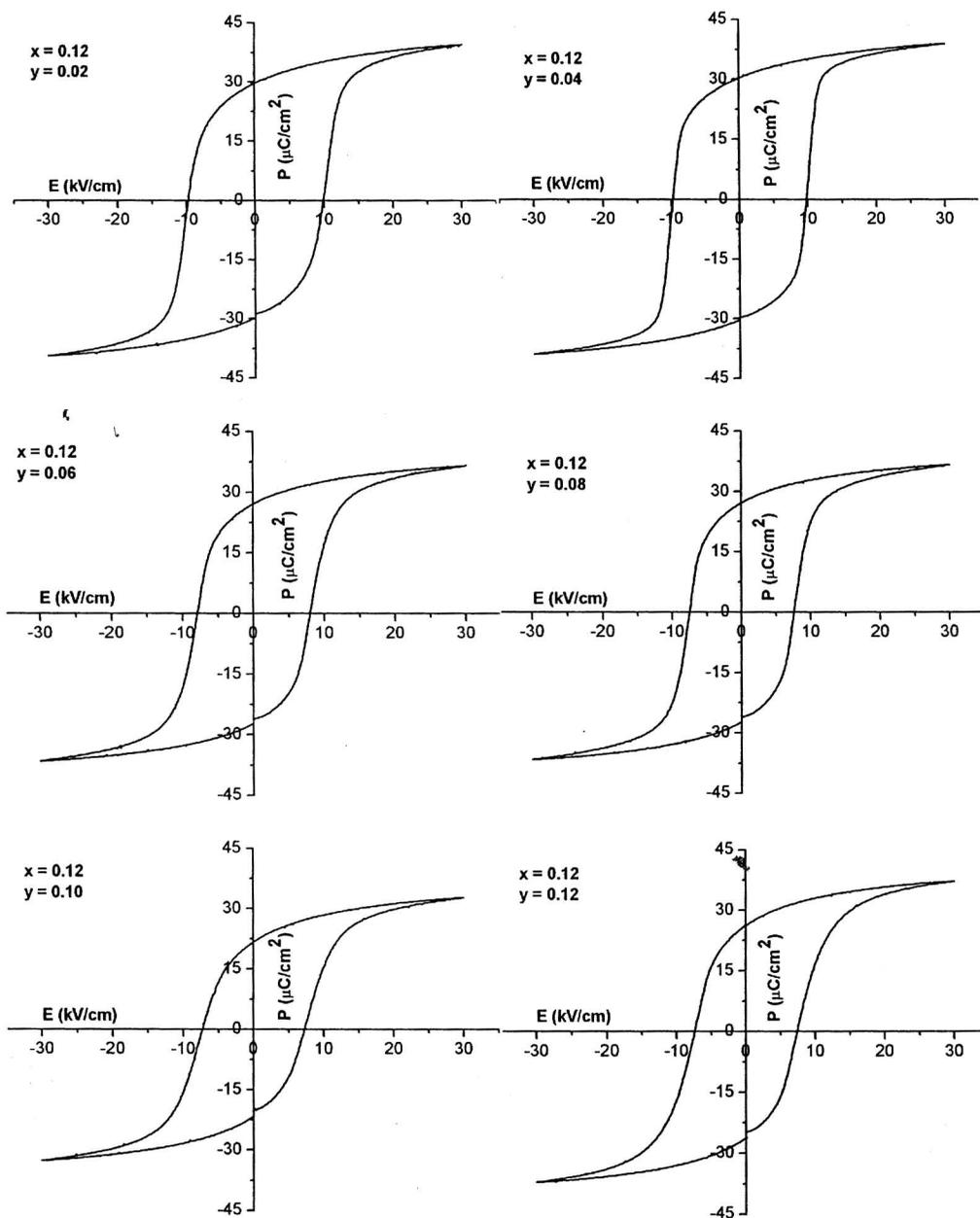


รูปที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) และ โพลาริเซชัน (P) (P-E loop) ของ เซรามิก PSZT-ZN เจือไน Sr (x) เท่ากับ 0.10 (ต่อ)

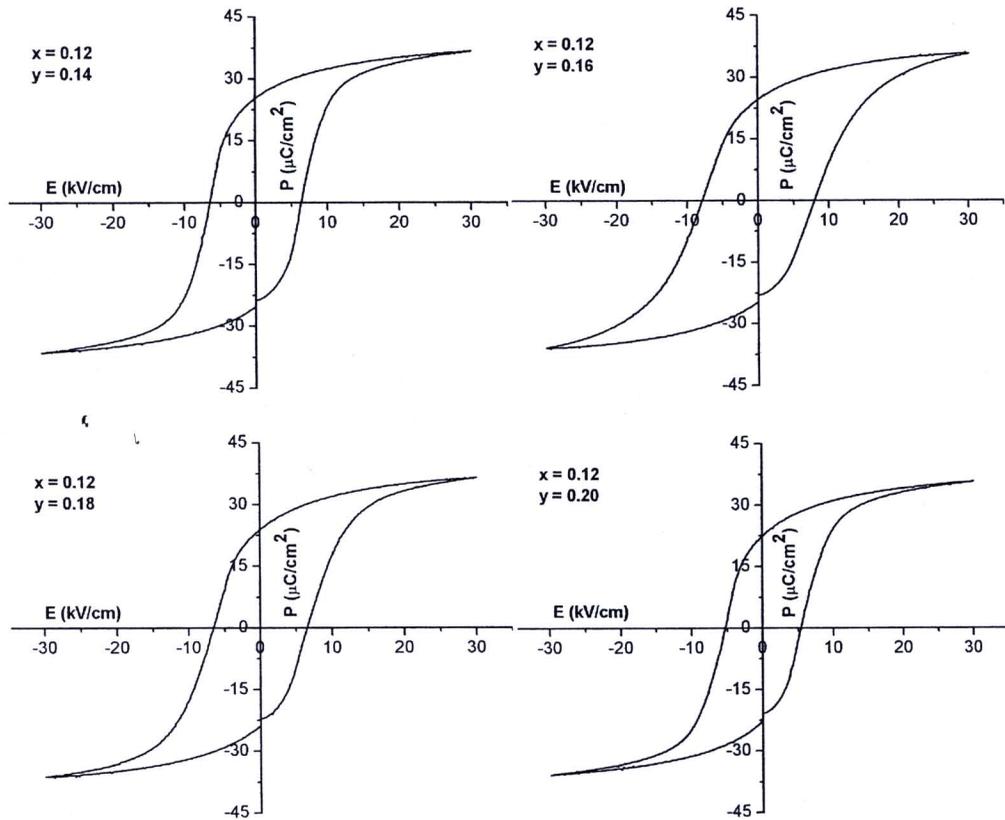
ในกราฟเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ปรากฏนี้อธิบายได้ว่าเซรามิกในระบบที่ศึกษานี้แสดงพฤติกรรมของเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบอ่อนหรือแบบชั่วคราว (soft ferroelectric) เมื่อมีการเจือด้วยสาร Nb ที่เพิ่มขึ้น และบอกได้ว่าผลของการเจือด้วย Nb ส่งผลทำให้เซรามิกในระบบนี้สามารถที่จะทำให้เกิดขั้วได้ง่ายและทำลายความเป็นขั้วได้ง่าย (depolarization) ซึ่งการแสดง

พฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริกในลักษณะของ soft จะเกี่ยวข้องกับกลไกการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนในสาร PZT ภายใต้การกระทำของสนามไฟฟ้าที่ให้กับเซรามิก [49]

ในรูป 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P-E loop ของเซรามิก PSZT-ZN ที่เจือไน Sr (x) เท่ากับ 0.12 จากกราฟพบว่าขนาดของวงฮิสเทอรีซิส (P-E loop) มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมที่กว้างปรากฏที่เจือไน ZN (y) เท่ากับ 0.02 - 0.04 หลังจากนั้นเมื่อปริมาณ ZN เท่ากับ 0.06 จนถึง 0.12 วงฮิสเทอรีซิสจะเข้าสู่ลักษณะเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบ soft สังเกตจากกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของวงฮิสเทอรีซิสลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อเราเพิ่มปริมาณสารเจือของ ZN มากขึ้นจาก ZN = 0.12 - 0.14 การเปลี่ยนแปลงใน ฮิสเทอรีซิสจะเริ่มเพิ่มขึ้นที่ ZN = 0.12 หลังจากนั้นก็จะเปลี่ยนเป็นวงแบบแคบและแหลมมากยิ่งขึ้น ซึ่งการแสดงผลพฤติกรรมทางเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบนี้ต้องอธิบายข้างต้น และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ 4.45 (Sr = 0.10) กราฟแสดงฮิสเทอรีซิสมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นแบบแคบลงหรือบางลงเช่นกัน แต่ในเจือไน Sr = 0.12 จะแสดงความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบอ่อนที่มากกว่าสังเกตในขนาดวงฮิสเทอรีซิสที่เล็กลงมากกว่า และพบว่าลักษณะที่เป็นที่ต้องการของอุปกรณ์ตัวตรวจจับต้องการวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่แสดงลักษณะของวงฮิสเทอรีซิสแบบค่อนข้างเป็นสี่เหลี่ยมที่แสดงค่าสนามไฟฟ้าหักล้าง (E_c) ค่าต่ำและโพลาริเซชันเหลือค้าง (P_r) ค่าสูง ดังนั้นจะเห็นว่าในเจือไน Sr เท่ากับ 0.10 จะแสดงผลพฤติกรรมทางด้านเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เหมาะสมมากกว่าเพราะแสดงค่า P_r ที่สูงมากกว่า ซึ่งในเจือไนนี้จะสอดคล้องกับสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และสัมประสิทธิ์คูลอมบ์ไฟฟ้ากลเชิงระนาบที่มีค่าที่สูงด้วยเช่นกัน จึงบอกได้ว่าที่เจือไน Sr = 0.10 เป็นเจือไนที่แสดงสมบัติเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตัวตรวจจับมากที่สุด



รูปที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) และโพลาไรเซชัน (P) (P-E loop) ของ เซรามิก PSZT-ZN เจือไนซ์ Sr (x) เท่ากับ 0.12



รูปที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) และโพลาริเซชัน (P) (P-E loop) ของเซรามิก PSZT-ZN เจือไนโตรเจน Sr (x) เท่ากับ 0.12 (ต่อ)

สมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกดังกล่าว การโพลาริเซชันอิ่มตัว (saturate polarization; P_s) โพลาริเซชันเหลือค้าง (remanent polarization; P_r) และสนามไฟฟ้าลบล้าง (coercive field; E_c) แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกที่เติมด้วย Sr และ ZN ต่างกัน จากตารางพบว่าค่า P_r และ ค่า E_c ของเซรามิกมีค่าในช่วง $22.5 - 32.9 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ $5.38 - 9.94 \text{ kV}/\text{cm}$ และแสดงในรูปที่ 4.47 และ รูป 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า P_r และ E_c เทียบกับความเข้มข้นของ ZN ในรูป 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า P_r และ E_c ของเซรามิกที่เจือไนโตรเจน Sr (x) = 0.10 และรูป 4.48 เป็นเจือไนโตรเจนของ Sr เท่ากับ 0.12 ซึ่งพบว่าค่า P_r และ E_c ในทั้งสองเจือไนโตรเจนของ Sr มีแนวโน้มลดลงกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณ ZN จากกราฟที่ 4.47 และ 4.48 พบว่าค่า E_c จะแตกต่างกันคือในเจือไนโตรเจน Sr สูง (0.12) จะลดลงอย่างมากและชัดเจนเมื่อปริมาณของ ZN เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเจือไนโตรเจน Sr = 0.10 ส่วนค่าโพลาริเซชันเหลือค้าง (P_r) ก็แสดงในทิศทางที่คล้าย

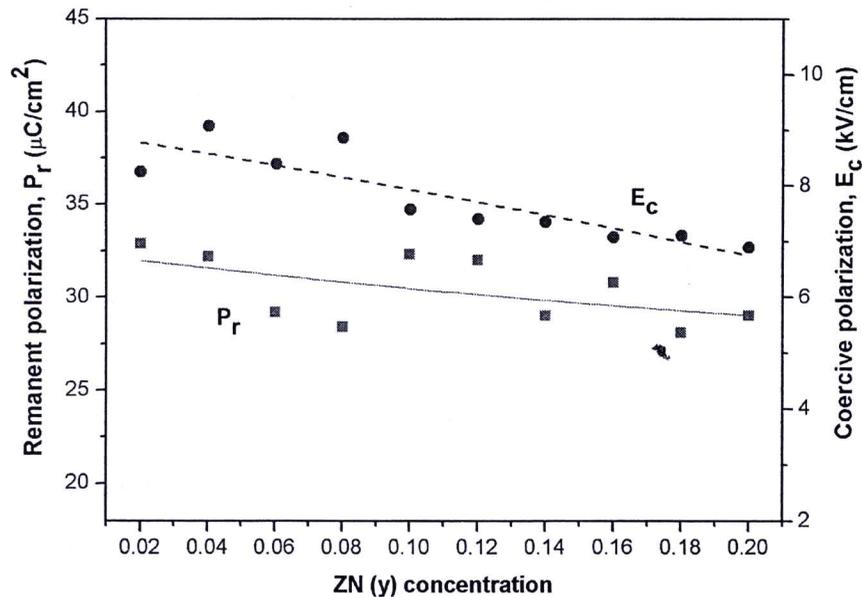
กับค่า E_c แต่พบว่าที่เงื่อนไข $Sr = 0.10$ แสดงค่า P_r ที่สูงกว่าและมีการเปลี่ยนแปลงกับปริมาณของ ZN ที่เพิ่มมากขึ้นน้อยมาก

ตารางที่ 4.1 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PSZT-ZN

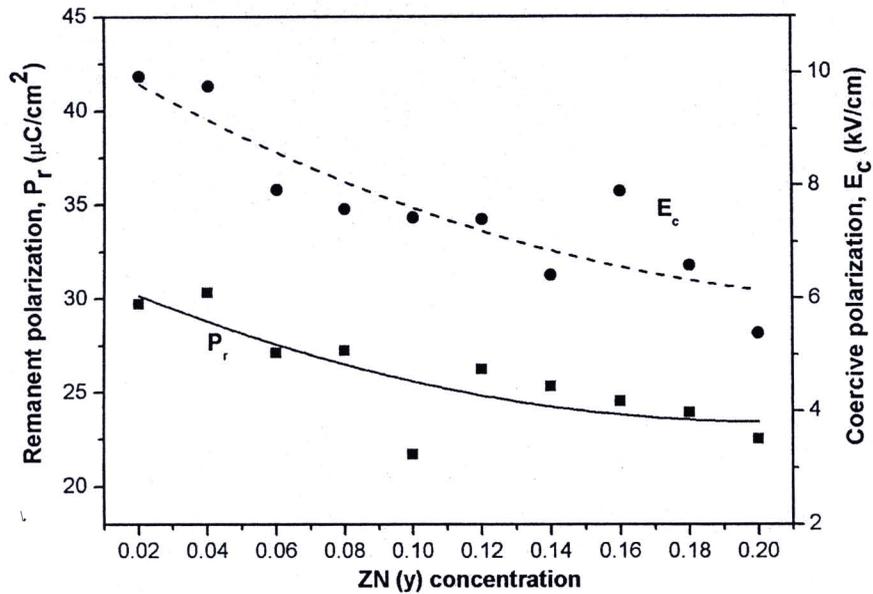
สารเจือ		P_s (max) $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	P_r $\mu\text{C}/\text{cm}^2$	E_c kV/cm	พื้นที่ kJ/m^3	R_{qs}
Sr (x)	ZN (y)					
0.10	0.02	40.0	32.9	8.25	4207	1.2741
	0.04	40.3	32.2	9.07	4159	1.2418
	0.06	38.3	29.2	8.39	3899	1.1069
	0.08	37.7	28.4	8.86	3700	1.0219
	0.10	40.7	32.3	7.57	4232	1.1692
	0.12	38.8	32.0	7.40	4141	1.1944
	0.14	38.7	29.0	7.35	3926	0.9793
	0.16	39.1	30.8	7.08	4068	1.1143
	0.18	37.9	28.1	7.11	3771	1.0005
	0.20	39.3	29.0	6.90	3931	0.9468
0.12	0.02	39.5	29.7	9.94	3947	1.2114
	0.04	38.9	30.3	9.77	4007	1.3911
	0.06	36.6	27.1	7.93	3653	1.0201
	0.08	36.6	27.2	7.58	3703	1.1112
	0.10	32.7	21.7	7.43	3148	0.9428
	0.12	37.1	26.2	7.40	3648	0.8932
	0.14	36.7	25.3	6.41	3648	0.9308
	0.16	35.7	24.5	7.90	3345	0.8368
	0.18	36.5	23.9	6.58	3535	0.8343
	0.20	35.5	22.5	5.38	3512	0.8226

ผลที่ได้จากการตรวจสอบนี้อธิบายได้ว่าจะสอดคล้องกับทฤษฎีของการเจือสารซึ่งอธิบายว่าเซรามิกที่ผ่านการเจือแบบตัวให้ (Nb) จะแสดงวงฮิสเทอรีซิสแบบจตุรัส มีค่าสนามลบล้าง (coercive fields;

E_c ค่าค่าโพลาริเซชันเหลือค้าง (remanent polarization; P_r) สูง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง สัมประสิทธิ์คู่อวไฟฟ้าเชิงกลสูง การสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูง สมบัติเพียโซอิเล็กทริก d_{33} ที่สูง แต่สังเกตจากกราฟว่าวงฮิสเทอรีซิสมีแนวโน้มเป็นวงสี่เหลี่ยมจัตุรัสในลักษณะของค่า E_c ที่ลดลง และค่า P_r ที่ลดลงด้วยเช่นกัน อาจเนื่องมาจากสารเจือร่วม ZN ที่มีวาเลนซ์ที่น้อยกว่าสารตัวหลัก (Zn^{2+} ใน Ti^{4+}/Zr^{4+}) และนอกจากนี้การที่ค่า E_c ลดลงอาจเป็นผลมาจากการเติมหรือการเจือสาร Sr และ ZN เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการที่สารเจือเหล่านี้เข้าไปในโครงสร้างหลักส่งผลทำให้ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (unit cell volume) เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอาจจะทำให้เกิดช่องว่างทั้งในตำแหน่ง A-site และ B-site ซึ่งการเกิดขึ้นของช่องว่างอาจไปทำให้ความเค้นภายนอกลดลงทำให้เกิดการเคลื่อนของผนังโดเมนได้ง่ายขึ้นจึงส่งผลทำให้ค่า E_c ลดลงและลดต่ำลงมากที่ ZN เพิ่มสูงขึ้น [50-51]



รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันคงเหลือ (P_r) และสนามไฟฟ้าลบด้าง (E_c) เทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) ที่เงื่อนไข Sr (x) เท่ากับ 0.10



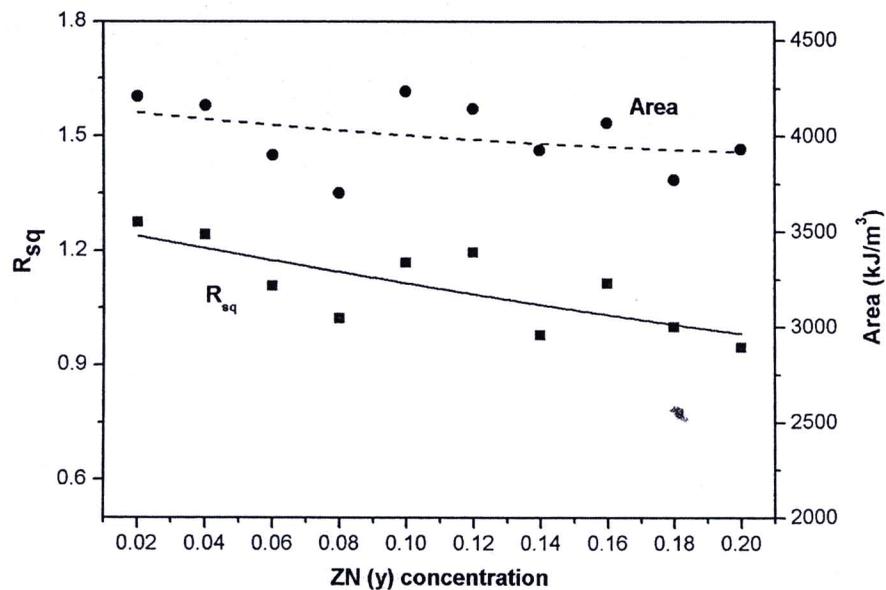
รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันคงเหลือ (P_r) และสนามไฟฟ้าลบด่าง (E_c) เทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) ที่เจือไนซ์ Sr (x) เท่ากับ 0.12

การแสดงผลการเปลี่ยนแปลงในวงฮิสเทอรีซิส ตาม Haertling และ Zimme [52] ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_s) โพลาริเซชันเหลือค้าง (P_r) และโพลาริเซชันที่ $1.1E_c$ ดังสมการต่อไปนี้

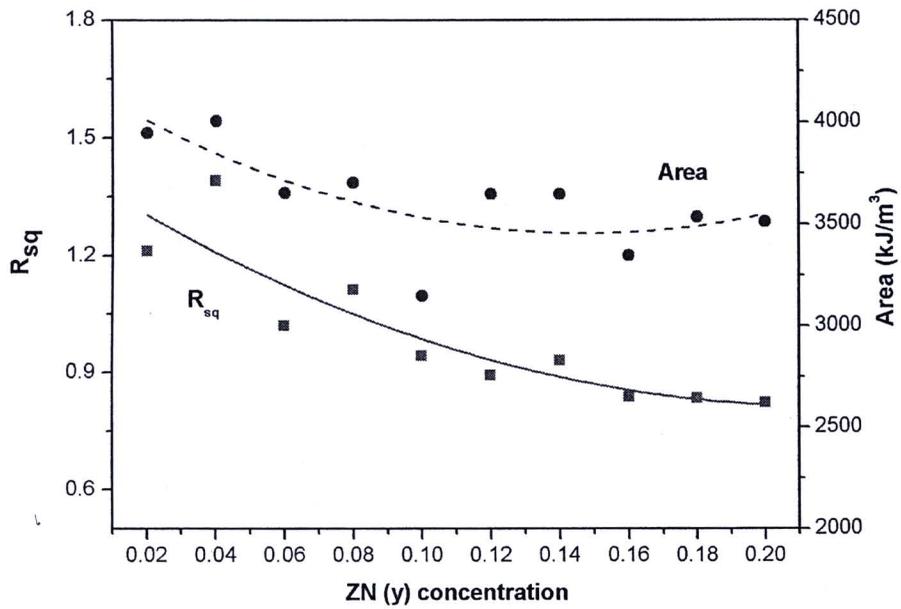
$$R_{sq} = \frac{P_r}{P_s} + \frac{P_{1.1Ec}}{P_r}$$

เมื่อ R_{sq} แสดงความเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสของวงฮิสเทอรีซิส P_s เป็นโพลาริเซชันอิ่มตัว P_r เป็นโพลาริเซชันเหลือค้าง และ $P_{1.1Ec}$ เป็นโพลาริเซชันที่สนามไฟฟ้า $1.1E_c$ ค่า R_{sq} แสดงในรูป 4.49 และรูป 4.50 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_{sq} และ พื้นที่ของวงฮิสเทอรีซิสเทียบกับปริมาณของ ZN ที่เพิ่มขึ้นในเจือไนซ์ Sr เท่ากับ 0.10 และ 0.12 จากกราฟรูป 4.49 พบว่าค่า R_{sq} จะมีค่าในช่วงประมาณ 0.94 - 1.27 ซึ่งค่ามากที่สุดพบที่เจือไนซ์ ZN = 0.02 และในรูปที่ 4.50 ค่า R_{sq} มีค่าในช่วง 0.82 - 1.39 จากกราฟทั้งสองเจือไนซ์จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ ZN เพิ่มมากขึ้น ค่า R_{sq} มีแนวโน้มลดลง ที่เจือไนซ์ Sr = 0.10 ยังแสดงวงฮิสเทอรีซิสแบบจัตุรัสที่แสดงค่า P_r ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับ Sr = 0.12 และจะสังเกตจากกราฟพบว่าค่านี้จะเปลี่ยนในลักษณะที่สอดคล้องกับค่า P_r

และ E_c ที่ลดลงเมื่อปริมาณ Sr และ ZN เพิ่มมากขึ้น แต่ผลที่ได้นี้แสดงได้ว่าเซรามิกกลุ่มนี้แสดงค่า R_{sq} ที่ค่อนข้างต่ำ แสดงได้ว่าการเติมสาร Zn และ Nb ใน PZT จะทำหน้าที่ในการไปเปลี่ยนแปลงวงฮีสเตอร์ซิสในเซรามิก ส่วนการวัดพื้นที่ของวงฮีสเตอร์ซิสของเซรามิกเงื่อนไข Sr = 0.10 และ Sr = 0.12 แสดงในรูป 4.49 และ 4.50 ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าจะสอดคล้องกับค่า R_{sq} การเปลี่ยนแปลงแบบบางลงของวงฮีสเตอร์ซิส และค่า P_r , E_c ที่ลดลงในช่วงของปริมาณ ZN ที่เพิ่มขึ้น พื้นที่ในวงฮีสเตอร์ซิสจะบอกถึงพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่พื้นที่ ซึ่งพื้นที่ที่ลดลงเมื่อประมาณของ ZN เพิ่มขึ้นจะเนื่องมาจากการที่วงฮีสเตอร์ซิสแคบและบางลง พลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดขั้วและการทำลายความเป็นขั้ว (depolarize) จะลดลงด้วย

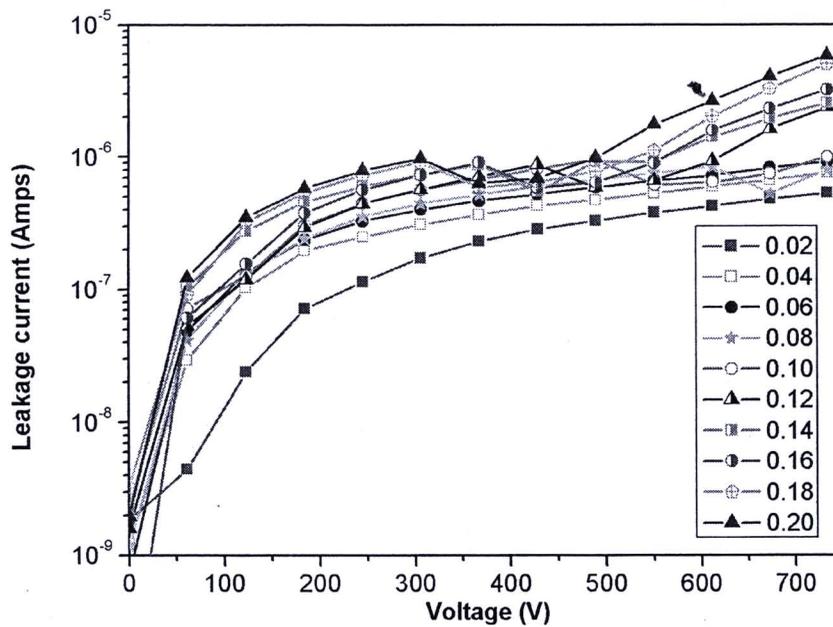


รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_{sq} และ พื้นที่ของวงฮีสเตอร์ซิส เทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) ในเงื่อนไข Sr (x) เท่ากับ 0.10

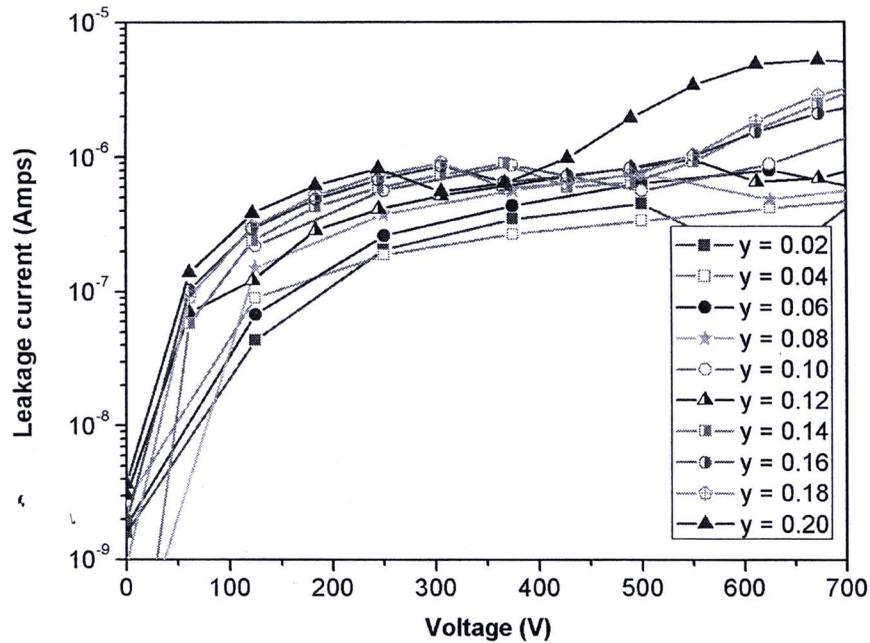


รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_{sq} และ พื้นที่ของวงฮีสเทอรีซิสเทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) ในเงื่อนไข Sr (x) เท่ากับ 0.12

4.1.3.6 การตรวจสอบลักษณะของกราฟ I-V curve



รูปที่ 4.51 ความหนาแน่นกระแสรั่วเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr (x) เท่ากับ 0.10



รูปที่ 4.52 ความหนาแน่นกระแสรั่วเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของเซรามิก PSZT-ZN เจือไนซ์ Sr (x) เท่ากับ 0.12

ในรูปที่ 4.51 และ รูป 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสรั่ว (leakage current density) หรือค่ากระแสรั่ว (leakage current) เทียบกับศักย์ไฟฟ้าของเซรามิกระบบ PSZT-ZN ในเจือไนซ์ Sr (y) เท่ากับ 0.10 และ Sr เท่ากับ 0.12 เมื่ออยู่ภายใต้การให้สนามไฟฟ้า ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของ ZN (y) เพิ่มมากขึ้นค่ากระแสรั่วจะเปลี่ยนแปลงในทิศทางเพิ่มขึ้นด้วยและเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงมากขึ้น ค่ากระแสรั่วก็ยิ่งจะเพิ่มมากขึ้น และเห็นความแตกต่างในค่าการรั่วของกระแสได้ชัดเจนในช่วงศักย์ไฟฟ้าสูง โดยเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้า 500 V เป็นต้นไป ในกราฟสามารถอธิบายได้ว่าค่ากระแสรั่วจะมีค่ามากที่สุดที่ปริมาณ ZN น้อยและค่ากระแสรั่วเกิดขึ้นมากที่สุดพบในงานเซรามิกที่ปริมาณของ ZN มากสุด และเมื่อเปรียบเทียบกราฟรูป 4.50 และ 4.52 ที่เจือไนซ์ของ Sr ต่างกัน การรั่วของกระแสเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าผ่านกับเซรามิก พบว่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นผลการตรวจสอบการรั่วของกระแสไฟฟ้าของเซรามิกในระบบนี้ พบว่าค่ากระแสรั่วเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของ ZN ที่เปลี่ยนคือเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ZN เพิ่มขึ้นจาก 0.02 - 0.20 ซึ่งผลที่ได้นี้อาจจะเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของไอออนของสารเจือ จึงส่งผลทำให้โครงสร้างของเซรามิกตัวหลักเปลี่ยนแล้วส่งผลต่อสมบัติทางด้านไฟฟ้าได้

4.2 ผลการศึกษาการเตรียมแผ่นฐานรอง (substrates) ของซลิคอน และผลการเตรียมฟิล์ม PSZT บนแผ่นฐานรอง Ti/SiO₂/Si

การเตรียมแผ่นฐานซลิคอนโดยทำการปลูกฟิล์มของซลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ความหนา 500 nm และเคลือบด้วยชั้นของไททาเนียม (Ti) แสดงในลักษณะ Ti(100 nm)/SiO₂(500 nm)/Si สามารถเตรียมได้โดยใช้เทคนิคการปลูกฟิล์มโดยอาศัยไอของพลาสมา (PECVD) ผลที่ได้พบว่าสามารถทำการปลูกชั้นฟิล์มของ SiO₂ และ Ti ที่อุณหภูมิต่ำ (750 ° ซ) ได้ และผิวของชั้นเคลือบมีการเกาะกันได้ดีและความหนาของชั้นเคลือบที่วัดโดยเครื่อง ellipsometer โดยทำการวัดทั้งหมด 50 จุด ผลการวัดความหนาของชั้นฟิล์ม SiO₂ และสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่ทำการตรวจสอบ แสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 ความหนาของชั้นฟิล์ม SiO₂ บนแผ่นซลิคอนที่ปลูกโดยเทคนิค PECVD

ชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย (Å)	ค่าต่ำสุด (Å)	ค่ามากที่สุด (Å)	UNIF (%)	STDEV (%)
D01	5016.0	4979.8	5059.0	79.183	20.929
D02	5031.8	4990.9	5073.8	82.907	19.871
D03	4974.1	4924.6	5019.5	94.901	21.363

ตารางที่ 4.3 สภาพต้านทานทางไฟฟ้าของแผ่นซลิคอนหลังเคลือบด้วย Ti

ชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย (Ω.cm)	ค่าต่ำสุด (Ω.cm)	ค่ามากที่สุด (Ω.cm)	UNIF (%)	STDEV (%)
D01	0.490	0.482	0.495	0.930	4.562 m
D02	0.467	0.462	0.473	0.732	3.455 m
D03	0.460	0.458	0.470	0.722	3.350 m

จากตารางที่ 4.2 แสดงความหนาของชั้นฟิล์ม SiO₂ ที่ปลูกโดยใช้เทคนิค PECVD พบว่าค่าความหนาที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างน้อยและจากการปลูกชั้น SiO₂ ด้วยเทคนิคที่กล่าว



มาข้างต้นสามารถทำการปลูกฟิล์มให้ได้ความหนาตามที่ต้องการได้ ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานของชั้นฟิล์ม Ti ที่ปลูกโดยใช้เทคนิคสปัตเตอริง (sputtering) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.46 - 0.49 Ω .cm ดังนั้น Ti สามารถที่จะทำหน้าที่เป็นขั้ว (electrode) บนแผ่น SiO_2/Si ได้ ในส่วนของการเตรียมสารละลายโซล PSZT พบว่าสาร PSZT ที่เตรียมโดยวิธีโซล เจลสามารถเตรียมได้ ซึ่งสารที่เตรียมจะมีลักษณะเป็นสารละลายสีเหลือง ไม่มีความหนืด เมื่อนำไปตกสะสมบนแผ่นฐานรองที่เตรียมพบว่าจะสามารถทำการปลูกฟิล์ม PSZT หรือทำการเคลือบลงบนแผ่นซับสเตรทหรือแผ่นฐานรอง Ti(100 nm)/ SiO_2 (500 nm)/Si โดยเทคนิค spin coating ได้