

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก [12-13]

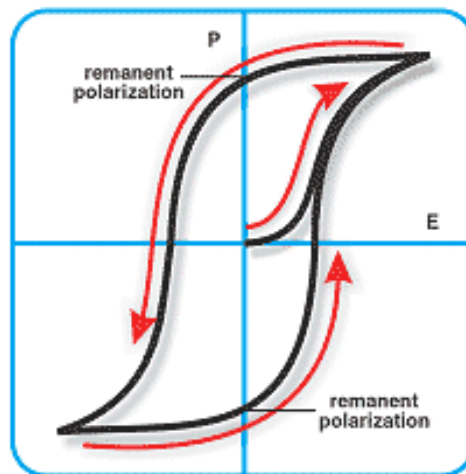
ผลึกของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พวกที่มีศูนย์กลางสมมาตร (centro-symmetric) และพวกที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (non centro-symmetric) ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 32 กลุ่ม โดยมี 21 กลุ่มเป็นพวกไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง โดยใน 21 กลุ่มนี้ พบว่า มี 20 กลุ่มเป็นพวกเพียโซอิเล็กทริกและมี 10 กลุ่มจาก 20 กลุ่มนี้เป็นพวกไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric) ซึ่งวัสดุจะเกิดโพลาไรเซชันแบบถาวรในช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ โดยวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นก็จะเป็นส่วนย่อยของสารไพโรอิเล็กทริก

เนื่องจากการไม่มีสมมาตรของศูนย์กลางเป็นสภาวะสำคัญที่ทำให้เกิดเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากแรงกลที่ให้กับวัสดุเป็นแบบไม่มีสมมาตรของศูนย์กลางและไม่สามารถทำให้เกิดการโพลาไรเซชัน เช่น การเกิดโพลาไรเซชันแบบเวกเตอร์ (vector-quality-like-polarization) นอกจากนี้ว่าวัสดุนั้นจะไม่มีสมมาตรของศูนย์กลางอยู่เอง ซึ่งทำให้ผลรวมของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและลบสามารถสร้างไดโพลไฟฟ้า (electric dipole) หรือที่เรียกว่าเกิดโพลาไรเซชัน (polarization)

วัสดุไพโรอิเล็กทริกพัฒนาการเกิดโพลาไรเซชันด้วยตัวเอง และทำให้เกิดสภาพมีขั้วถาวรในโครงสร้าง การเกิดโพลาไรเซชันนี้มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จึงเรียกว่าสภาพไพโรอิเล็กทริก ซึ่งหมายถึงสภาพที่มีแกนขั้วแบบเฉพาะภายในระบบผลึก ค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ทั้งหมดแปรผันกับอุณหภูมิ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเครื่องหมายของกระแสที่ได้จากผลึกส่วนวัสดุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะคล้ายกับวัสดุไพโรอิเล็กทริก คือ สามารถเกิดขั้วได้เอง อย่างไรก็ตามสิ่งที่ไม่เหมือนกัน คือ ขั้วเหล่านี้มีการสลับได้ด้วยกระแสไฟฟ้าค่าหนึ่งๆ ที่น้อยกว่าค่า dielectric breakdown ของวัสดุเอง ในขณะที่สารไพโรอิเล็กทริกนั้นทำไม่ได้ ดังนั้นในการแยกวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกออกจากสารอื่นๆ คือ การเกิดโพลาไรเซชันเองได้ และโพลาไรเซชันสามารถสลับทิศทางได้ ส่วนความ

แตกต่างของวัสดุที่เป็นเพียโซอิเล็กทริกกับเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ ไม่สามารถเกิดโพลาริเซชันด้วยตัวเอง แต่จะเกิดเมื่อได้รับแรงทางกลต่อผลึกเท่านั้น

ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงและถูกนำมาใช้กันจนกระทั่งปัจจุบัน เช่น เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงเพราะมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ต่อมาพบว่า การให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกสามารถจัดเรียงโดเมนในเกรน ทำให้ได้เซรามิกมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกได้ การจัดเรียงตัวด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าการโพลหรือสร้างขั้ว (poling) นั้นเป็นกุญแจสำคัญที่เปลี่ยนเซรามิกที่เฉื่อยไปเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อกลไฟฟ้า (electromechanical) เมื่อเอาสารไดอิเล็กทริกมาวางในสนามไฟฟ้าจะเกิดโพลาริเซชันขึ้นภายในสารนั้น เมื่อลดสนามไฟฟ้าที่ให้อนเป็นศูนย์แล้วโพลาริเซชันจะไม่เป็นศูนย์เหมือนสารไดอิเล็กทริกทั่วไป แต่จะเป็นศูนย์เมื่อ $E = E_c$ ทำให้เกิดวงของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ซึ่งเป็นลักษณะของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกแสดงดังรูป 2.1



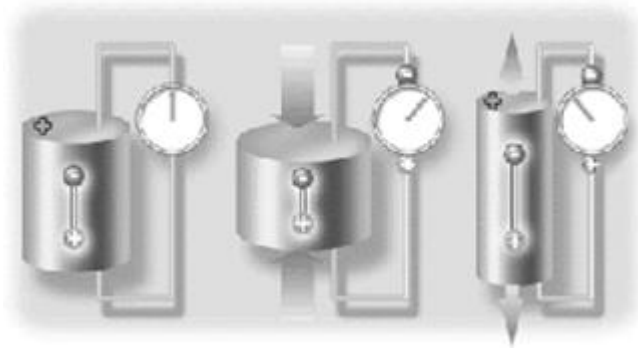
รูป 2.1 แสดงความสัมพันธ์ E-P ของสาร Ferroelectric [12]

2.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric properties) [12-14]

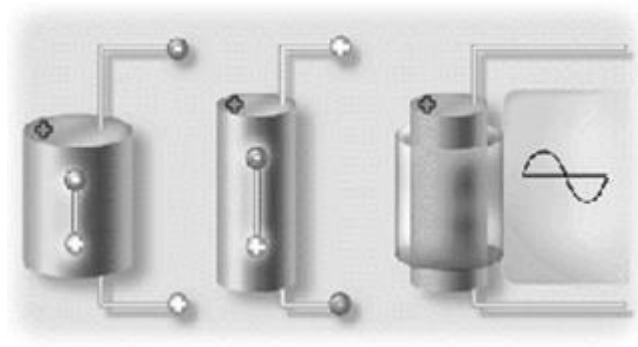
ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังดัน หรือ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ถูกค้นพบในระหว่างที่ทำการศึกษเกี่ยวกับผลของแรงดันที่มีต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึก ซึ่งคำว่า “เพียโซ” เป็นภาษากรีก หมายถึง แรงดันหรือแรงกด ดังนั้นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกจึงเป็นปรากฏการณ์ที่แสดงถึงการสร้างประจุไฟฟ้าให้เกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากแรงกดอัดเชิงกล (mechanical force) หรืออีกนัยหนึ่งคือ เป็นปรากฏการณ์ที่ใช้เรียกการเกิดกระบวนการแยกขั้วไฟฟ้า (electric polarization) ขึ้นในวัสดุเมื่อได้รับความเครียดเชิงกล (mechanical strain) ซึ่งการแยกขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเครียดที่วัสดุนั้นได้รับ

สารประกอบ PZT นั้นจัดได้ว่าเป็นสารที่สามารถแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้ดี กล่าวคือเมื่อสาร PZT นั้นถูกแรงกลมากระทำให้เกิดความเค้น (stress) ขึ้นเช่น ถูกกดหรือถูกกระแทก จะส่งผลให้เกิดการแยกขั้วไฟฟ้า และเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นมาบนผิวของตัววัสดุดังกล่าว โดยเรียกปรากฏการณ์แบบนี้ว่า ปรากฏการณ์ตรง (direct effect) ดังรูป 2.2 ในทำนองกลับกัน เมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการยืดหดตัว คือ ปรากฏการณ์ย้อนกลับ (converse effect) หรือปรากฏการณ์มอเตอร์ (motor effect) ดังรูป 2.4 จากปรากฏการณ์ข้างต้นนี้ พบว่า ปริมาณของโพลาไรเซชันจะขึ้นกับขนาดของความเค้นที่ให้กับสาร และประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของแรงที่กระทำ เช่น เป็นแรงกด หรือแรงดึง เป็นต้น

นอกจากนี้ ความเป็นสมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับสมบัติของหน่วยเซลล์พื้นฐานของโครงผลึกของสาร ซึ่งมีผลึกหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางเซลล์ จากหน่วยเซลล์ทั้งหมด 32 point groups จะมีสารที่หน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกึ่งกลาง (Noncentrosymmetric) อยู่ 21 point group แต่มีเพียง 20 point groups ที่มีสมบัติเป็น เพียโซอิเล็กทริกดังรายละเอียดในรูป 2.2



(A)

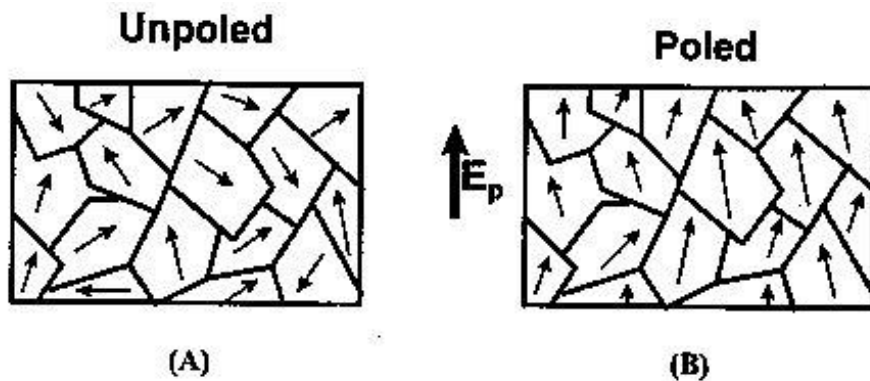


(B)

รูป 2.2 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (A) ปรากฏการณ์ตรง และ (B) ปรากฏการณ์ย้อนกลับ [14]

2.3 โพลาริเซชัน (Polarization) [12,14]

เมื่อเราพิจารณาสารเซรามิกที่ประกอบด้วยผลึกก้อนเล็กๆ ที่มีทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ต่างกัน การที่โมเมนต์ขั้วคู่ไม่เรียงตัวเป็นระเบียบจะให้เซรามิกไม่สามารถวัดค่าเพียโซอิเล็กทริกได้ แต่เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารตัวอย่าง หรือการสร้างขั้วให้แก่สารก็จะทำให้เกิดโพลาริเซชัน หรือโมเมนต์ขั้วคู่ภายในเนื้อสารอยู่ในทิศทางใกล้เคียงกัน หรือทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ดังรูป 2.3 เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการเป็นเพียโซอิเล็กทริก และสมบัติทางไฟฟ้าด้วย



รูป 2.3 แสดงโมเมนต์ขั้วคู่ภายในเนื้อสาร (A) ก่อนทำการสร้างขั้ว และ (B) หลังทำการสร้างขั้ว [12]

2.4 สมบัติไดอิเล็กทริก(Dielectric Properties) [11-15]

สารทุกชนิดประกอบด้วยส่วนย่อย คือ โมเลกุล ซึ่งโมเลกุลโดยปกติประกอบด้วยกลุ่มโปรตอนและอิเล็กตรอนมีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกัน และอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้ามากระทำกับโมเลกุลจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนาม และกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นโมเลกุลทุกโมเลกุลของสารต่างก็ก่อตัวเป็นโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) โดยมีขั้วเล็กๆ เรียงต่อกันในทิศทางเดียวกันตามทิศทางสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสารไดอิเล็กทริกประเภทนี้เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecule)

สารไดอิเล็กทริกบางชนิดที่โมเลกุลก่อตัวเป็นขั้วคู่ไฟฟ้า (dielectric dipole) ซึ่งในทิศทางไม่เป็นระเบียบ และเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำต่อมันจะทำให้ขั้วคู่เล็กๆ เหล่านี้เรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าขั้วคู่ถาวร (permanent dipole)

มีสารบางอย่างที่มีโมเลกุลเรียงตัวกันตัวเอง โดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก เรียกสารชนิดนี้ว่าสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric materials) เช่น เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) เป็นต้น ลักษณะของการที่โมเลกุลขั้วคู่ของสารไดอิเล็กทริกก่อตัวเป็นขั้วเล็กๆ แล้วจัดเรียงตัวกันในสนามไฟฟ้าเรียกว่าโพลาไรเซชัน โดยกำหนดให้โพลาไรเซชันเป็นจำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ต่อหน่วยปริมาตร ถ้า N เป็นโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตรและทุกๆ โมเลกุลมีขั้วโมเลกุลคู่เป็น P ดังนั้นจะได้โพลาไรเซชันแสดงดังสมการ 2.1

$$P = Np \quad (2.1)$$

และเมื่อสารไดอิเล็กทริกถูกโพลาไรซ์ สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปโดยพิจารณาจากสมการ

2.2

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.2)$$

โดยที่ D คือ Electric displacement vector E คือ สนามไฟฟ้าในตัวกลาง และ ϵ_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศซึ่งมีค่า $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

สมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารไดอิเล็กทริก คือ มีสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าหรือความซึมซาบทางไฟฟ้า χ (electric susceptibility) ซึ่งกำหนดได้ด้วยสมการ 2.3

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (2.3)$$

ในสุญญากาศไม่เกิดโพลาไรเซชัน ($P = 0$) ดังนั้น χ เป็นศูนย์ด้วย เพราะฉะนั้น D จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าภายนอกเท่านั้น ถ้าสนามไฟฟ้าภายนอกเป็น E_0 ดังนั้นสนามไดอิเล็กทริกจะเป็น

$$D = \epsilon_0 E_0 \quad (2.4)$$

จากสมการ 2.2 และสมการ 2.3 จะได้สมการดังนี้

$$D = \epsilon_0 E_0 + \epsilon_0 \chi E$$

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi) E$$

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2.5)$$

โดยจะเรียกเทอม $(1 + \chi)$ หรือ ϵ_r ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant) อาจเขียนสมการ 2.5 ได้ดังนี้

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2.6)$$

โดยที่ ϵ เรียกว่า สภาพยอมของสารไดอิเล็กทริก

สารไดอิเล็กทริกมักจะใช้เป็นฉนวนที่ทำหน้าที่คั่นระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุ เพื่อกันหรือให้แรงดันสูงขึ้นกว่าก๊าซรวมทั้งอากาศด้วย โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่า

ความจุของตัวเก็บประจุที่สารไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นว่าเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุในสุญญากาศ ดัง
สมการ

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.7)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก
ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น ϵ_r ซึ่งโดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เทียบกับ
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ ϵ_0 คือ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.8)$$

และจากความสัมพันธ์ $C = Q/V$ สำหรับที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริกจะได้ว่า

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.9)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก และ d คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริกสำหรับตัวเก็บ
ประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r จะได้ว่า

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.10)$$

ถ้าป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟส
นำหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กทริกมี
ความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา
เรียกว่า การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent)

2.5 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss; $\tan\delta$) [11-15]

ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss, $\tan\delta$) สำหรับเซรามิกนั้นเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการให้พลังงานไฟฟ้าแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นรูปแบบอื่นๆ เช่นเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนเป็นต้น ซึ่งสามารถประมาณได้จากสัดส่วนของความได้เปรียบทางพลังงานของวงจรแผ่นตัวนำคู่ขนาน และสามารถวัดได้จากวงจรอิมพีแดนซ์ ซึ่งปริมาณของค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นสามารถประมาณได้ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

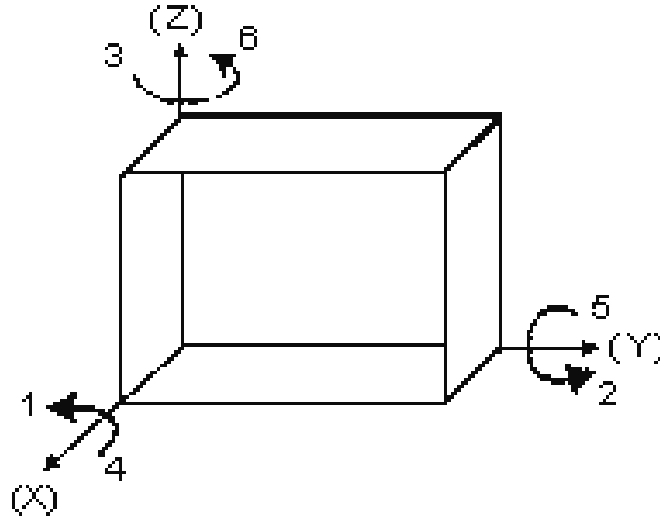
2.6 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient: d_{33}) [16]

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความเครียดเชิงกล (mechanical strain; S) ความเค้นเชิงกล (mechanical stress; T) สนามไฟฟ้า (electric field; E) และการขจัดไดอิเล็กทริก (dielectric displacement; D) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant; ϵ^T) ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric charge constant; d) และค่าคงที่ยืดหยุ่น (elasticity constant; S^E) เนื่องจากเป็นค่าที่ขึ้นกับสมบัติที่ไม่เหมือนกันในทุกทิศทาง (anisotropy) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2.11)$$

$$S = S^E T + dE \quad (2.12)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ^T) นั้นมีความสัมพันธ์กับ สนามไฟฟ้า (E) การกระจัดไดอิเล็กทริก (D) ความเค้นเชิงกล (S) และความเครียดเชิงกล (S^E) ซึ่งมีผลมาจากทิศทางเป็นสำคัญ พารามิเตอร์ในด้านของทิศทางนั้นถูกกำกับไว้ด้วยตัวเลข 1 2 และ 3 ซึ่งจะสอดคล้องกับทิศทางในแนวแกน x y และ z ตามลำดับ ความเค้นเฉือนเชิงกล และความเครียดเฉือน ในทิศทางตามแนวแกน x y และ z ซึ่งแสดงออกมาด้วยตัวเลข 4 5 และ 6 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของแนวการเคลื่อนที่ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [16]

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33} และ d_{31}) และสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ (voltage coefficients; g_{33} , g_{31} และ g_{15}) แสดงให้เห็นถึงพารามิเตอร์ทางด้านไฟฟ้าทางกลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ระหว่างการขจัด และความเค้น หรือความเครียด และสนามไฟฟ้าซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \quad (2.13)$$

ขณะที่สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมือนกันในทางตัวเลขของทั้งสองปรากฏการณ์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่มากนั้นจะนิยมนำมาใช้ในด้านของการเคลื่อนที่หรืออุปกรณ์ที่ต้องการการกระตุ้น ตัวอย่างเช่น ระบบโซนาร์สำหรับวัดระดับความลึกในทะเล เป็นต้น อีกทั้งสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ นั้นยังมีความสัมพันธ์กับ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกโดยทางค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ดังนี้

$$g = \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{E}{T} = \frac{S}{D} \quad (2.14)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ (g) ที่มากนั้นจะนิยมนำมาใช้ในด้านของวัสดุที่ต้องการสร้างความต่างศักย์ในการตอบสนองต่อความเค้นเชิงกล ตัวอย่างเช่น หัวจุดแก๊ส และเครื่องบันทึกเสียงเป็นต้น

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) [17]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) เกิดจากการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประกอมนำเอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพต่อไป ผลที่ได้คือ ภาพของวัตถุหรือตัวอย่างที่กำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า (กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาสามารถทำกำลังขยายได้เต็มที่ไม่เกิน 3000 เท่า) และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร (nanometer) ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงส่องสว่างธรรมดามีกำลังแยกแยะใช้ดูวัตถุเล็กสุดเพียง 0.2 ไมโครเมตรเท่านั้น

ในกรณีที่เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุประกอบอยู่ด้วยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนวิเคราะห์ (analytical electron microscope) โดยในการวิเคราะห์ธาตุจะเป็นการวิเคราะห์เฉพาะจุด (spot analysis) หรือพื้นที่เล็กๆ ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นหัววัด เรียกว่าอิเล็กตรอนโพรมิโครแอนาไลซิส (Electron Probe Microanalysis, EPMA) โดยใช้การวิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสี

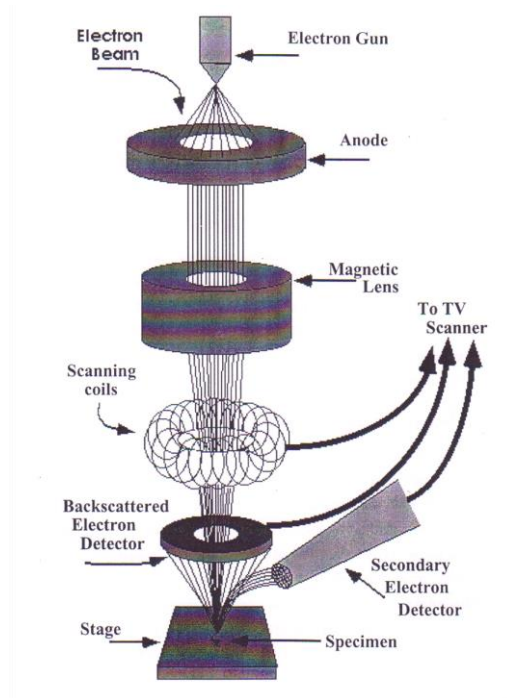
เอ็กซ์เรย์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) ซึ่งมีทั้งแบบเวฟเลงท์ดิสเพอร์ซีฟเอกซเรย์สเปกโตรโฟเมทรี (Wavelength Dispersive X-ray Spectrophotometry , WDS) และแบบเอนเนอร์ยีดิสเพอร์ซีฟเอกซเรย์สเปกโตรโฟโตเมทรี (Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry , EDS)

ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron detector , SE detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือ ใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron detector , BSE detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ทั้งแบบ EDS และ WDS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามระดับพลังงาน

2.7.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง

ในเครื่อง SEM ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆ ที่สำคัญ (ตามรูป 2.5) ดังต่อไปนี้

- 1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron source)
- 2) อิเล็กโตรแมกเนติกเลนส์ (electromagnetic lens) หรือ ขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอน
- 3) บัมสุญญากาศ และ ระบบควบคุมความดัน (control pressure system)
- 4) ช่องใส่ตัวอย่าง (specimen chamber)
- 5) ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal detector)
- 6) อุปกรณ์สร้างภาพ (imaging devices)



รูป 2.5 ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM [17]

2.7.1.1 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเป็นส่วนที่อยู่บนสุดของคอลัมน์ มีลวดทังสเตนที่บิดตัวเป็นรูปตัววีอยู่ในโลหะรูปกรวย (wehnelt cylinder) ที่มีรูตรงกลาง เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแรงดันสูงตั้งแต่ 1 ถึง 30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์เข้ามาทำให้ลวดฟิลาเมนต์มีความร้อนสูงและทำให้ประจุอิเล็กตรอนกระจายออกมา จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดลงสู่เบื้องล่างโดยแผ่นอาโนด และผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่รวบรวมประจุอิเล็กตรอนจำนวนมากที่เกิดขึ้นเป็นลำอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นพอสำหรับการส่องกราดลงบนผิวตัวอย่าง

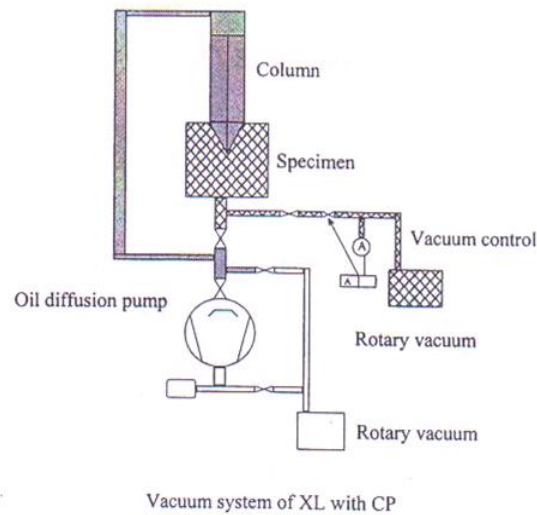
2.7.1.2 อิเล็กตรอนโทรมแมกเนติกเลนส์

อิเล็กตรอนโทรมแมกเนติกเลนส์ หรือ ขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนเป็นชุดของเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการรวบรวมและบังคับประจุอิเล็กตรอนจำนวนมากที่เกิดขึ้นให้มีลักษณะเป็นลำแสงรูปกรวยขนาดเล็กสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยให้ไปตกกระทบบนผิว

ตัวอย่างและใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ โดยทั่วไปชุดของเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะวางเรียงซ้อนเป็นระยะห่างกันพอประมาณ 2 ถึง 3 ชุด โดยในแต่ละชุดจะมีช่อง (aperture) รับแสงประกอบอยู่ทำหน้าที่กำหนดให้ลำอิเล็กตรอนที่ผ่านลงมาเป็นกรวยที่สมมาตรที่สุด

2.7.1.3 ปืนสุญญากาศและระบบควบคุมความดัน

เนื่องจากภายในคอลัมน์ของ SEM จำเป็นต้องทำงานภายใต้ภาวะความดัน เพื่อป้องกันไม่ให้ลำอิเล็กตรอนถูกทำให้กระเจิงกลับด้วยแก๊สอะตอม ด้วยเหตุนี้เองตัวอย่างที่ใช้ศึกษาโดยเครื่อง SEM จำเป็นต้องเป็นตัวอย่างที่ไม่มีความดันไอสูง ซึ่งเครื่อง SEM รุ่น XL30CP นี้สามารถทำความดันได้ทั้งระบบสุญญากาศต่ำ (low vacuum ,LV system) และระบบสุญญากาศสูง (high vacuum ,HV system) สาเหตุสำคัญที่จำเป็นต้องปรับสภาพภายในคอลัมน์ให้เป็นสุญญากาศโดยเฉพาะส่วนบนที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนก็เพื่อให้สามารถควบคุมลำอิเล็กตรอนได้ แต่ก็จะทำให้ความดันสุญญากาศในช่องใส่ตัวอย่างที่อยู่ส่วนล่างสูงตามไปด้วยถึงระดับประมาณ 10^{-5} ทอร์ ซึ่งจะมีผลตามตัวอย่างบางชนิดที่มีความชื้น และในตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าจะเกิดการตกค้างของประจุบนผิวตัวอย่างมาก ทำให้สัญญาณภาพที่ได้ไม่ดีเท่าตัวอย่างที่นำไฟฟ้า ดังนั้นการใช้ระบบควบคุมความดันที่สามารถปรับสภาพความดันในช่องใส่ตัวอย่างให้มีความดันสุญญากาศต่ำในช่วงกว้างประมาณ 0.1 ถึง 2 มิลลิบาร์ จึงทำให้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าได้



รูป 2.6 ระบบความดันสุญญากาศของ SEM [17]

2.7.1.4 ช่องใส่ตัวอย่าง

ส่วนนี้จะอยู่ล่างสุดเป็นส่วนของช่องว่างใต้เลนส์ชุดสุดท้ายมีขนาดกว้างพอที่จะติดตั้งอุปกรณ์ใช้รวบรวมสัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวอย่างและลำอิเล็กตรอน ได้แก่ SE detector BSE detector และตัวตรวจวัดสัญญาณเอ็กซ์เรย์ในอุปกรณ์วิเคราะห์แบบ EDS เป็นต้น โดยมีส่วนสำคัญคือ แท่นวางตัวอย่าง ซึ่งมีอุปกรณ์ใช้ในการควบคุมการเลื่อนของแท่นดังกล่าวไปมาได้รอบทิศทาง หรือที่เรียกว่าโกนิโอมิเตอร์สเตจ (goniometer stage) แท่นนี้สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างน้อย 6 ทิศทาง ทั้งในแนวนอน (4ทิศทาง) และแนวตั้ง (2ทิศทาง) และสามารถควบคุมการเอียง(tilt) และการหมุน(rotate)ของตัวอย่างได้

2.7.1.5 ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน

ตัวตรวจวัด ที่ใช้มีด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่ SE detector BSE detector c และ X-ray detector ซึ่งมีการติดตั้งและจัดวางท่ามุมที่ได้ระดับกับแท่นวางตัวอย่างต่างๆ กัน เพื่อให้สามารถรวบรวมสัญญาณที่

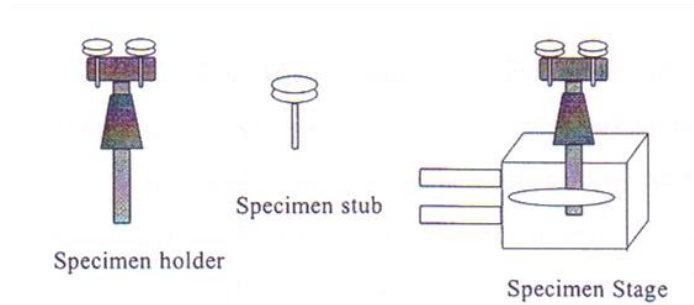
เกิดให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใน SE detector จะใช้หัววัดรังสีชนิดพลาสติกเรืองแสงกึ่งตัวนำ BSE detector จะใช้หัววัดรังสีโซลิดสเตทไดโอด (Solid-State Diode , SSD) ตัวตรวจวัดชนิดกระเจิงกลับความดันไฟฟ้าต่ำ (backscatte low voltage detector) และตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์จะใช้หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำประเภท Si(Li) ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ในการวิเคราะห์

2.7.2 การเตรียมตัวอย่าง

ในห้องวางตัวอย่างของเครื่อง SEM มีแท่นควบคุมการเคลื่อนที่ของฐานใส่ตัวอย่าง(specimen holder) ที่มีตัวอย่างติดบนก้านวางตัวอย่าง (specimen stub) วางอยู่บนฐานใส่ตัวอย่าง(ตามรูป 2.7) ในการเตรียมตัวอย่างนั้นก็เพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพที่พร้อมก่อนการวิเคราะห์ทดสอบ ซึ่งสามารถแยกอธิบายการเตรียมตัวอย่างเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

2.7.2.1 การติดตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่าง

- 1) กรณีตัวอย่างเป็นชิ้นงาน ก่อนนำเข้าศึกษาในเครื่องต้องทำการติดชิ้นงานเข้ากับก้านวางตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่ทำด้วยโลหะจำพวกเหล็ก อลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมมีก้านที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงพอเหมาะใส่ได้พอดีกับช่องว่างในฐานวางตัวอย่าง และใช้สารยึดติดตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่ใช้วัสดุจำพวกเทปกาวสองหน้า (double-stick tape) เทปกาวคาร์บอน (carbon stick tape) หรือน้ำยาทาเล็บเป็นต้น วิธีการทำโดยการทาหรือติดสารยึดติดตัวอย่างลงบนแผ่นหน้าของก้านวางตัวอย่าง และติดตัวอย่างด้านที่ไม่ต้องการศึกษาลงบนแผ่นหน้าก้านวางตัวอย่างทิ้งให้ติดสนิทหรือแห้งดีระยะหนึ่งในกรณีที่ตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าต้องนำตัวอย่างนั้นไปผ่านขั้นตอนการฉาบผิวด้วยโลหะก่อนนำไปศึกษา
- 2) กรณีตัวอย่างเป็นผงมักใช้สารยึดติดตัวอย่างจำพวกที่เป็นเทปกาวสองหน้าหรือเทปกาวคาร์บอนติดด้านบนของก้านวางตัวอย่างและโรยผงตัวอย่างให้กระจายลงบนด้านหน้าก้านวางตัวอย่างที่มีเทปกาวอยู่ จากนั้นใช้ลูกยางเป่าลมและปัดฝุ่นและเศษของผงตัวอย่างที่ไม่ยึดติดบนก้านวางตัวอย่างออก หรือใช้เครื่องเป่าลมเป่าซ้ำอีกครั้งเพื่อให้เศษฝุ่นละอองที่ยังตกค้างออกไปจากตัวอย่าง จากนั้นจึงนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อทำการศึกษาต่อไปหรือทำการฉาบผิวด้วยโลหะกรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า



รูป 2.7 ลักษณะอุปกรณ์ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง [17]

2.7.2.2 การเคลือบ (coating) ผิวชิ้นงาน

ในการเคลือบหรือฉาบผิวตัวอย่างนิยมใช้สารตัวนำไฟฟ้าจำพวกโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเช่น คาร์บอน(carbon , C) ทอง (gold , Au) และ โลหะผสมทอง- พัลลาเดียม (gold-palladium alloy , Au-pd) เป็นต้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับตัวอย่างทั้งนี้หลักการเบื้องต้นของการฉาบผิวก็ต้องกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศ และ ให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพจากแท่งโลหะมาเป็นโมเลกุลและตกลงบนผิวตัวอย่างในอัตราส่วนเดียวกันทำให้โลหะฉาบผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน

ชนิดตัวอย่าง

- 1) วัสดุนำไฟฟ้า (conducting materials) จำพวกโลหะต่างๆที่ผ่านการขัดผิว (polishing) หรือกัดผิว (etching) เรียบร้อยแล้ว สามารถนำมาวางติดบนแท่งวางตัวอย่างเพื่อนำเข้าศึกษาโดย SEM ได้เลย
- 2) วัสดุไม่นำไฟฟ้า (non- conducting materials) ได้แก่ วัสดุจำพวกพอลิเมอร์ เซรามิกและวัสดุชีวภาพ เป็นต้น โดยวัสดุที่เป็นฉนวนนี้จะก่อให้เกิดความผิดปกติจากประจุ (charging artifacts)

คือปรากฏการณ์ที่มีประจุไฟฟ้าสถิต หรือการสะสมของประจุอิเล็กตรอนปฐมนิยามจำนวนมากที่ผิวของวัตถุทำให้ภาพที่ได้มีความสว่างจ้าผิดปกติจนมองรายละเอียดอื่นๆไม่เห็น ในการศึกษาตัวอย่างจำพวกนี้จึงต้องแก้ไขโดยลดการสะสมของประจุจำนวนมากเหล่านี้ ซึ่งทำได้โดยการให้แรงดันไฟฟ้าจำนวนน้อย (5 ถึง 15 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) หรือการทำให้ตัวอย่างนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นโดยการฉาบผิวตัวอย่างด้วยโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็กๆ เช่น ทอง คาร์บอน พัลลาเดียมและโลหะผสมทอง-พัลลาเดียมเป็นต้น

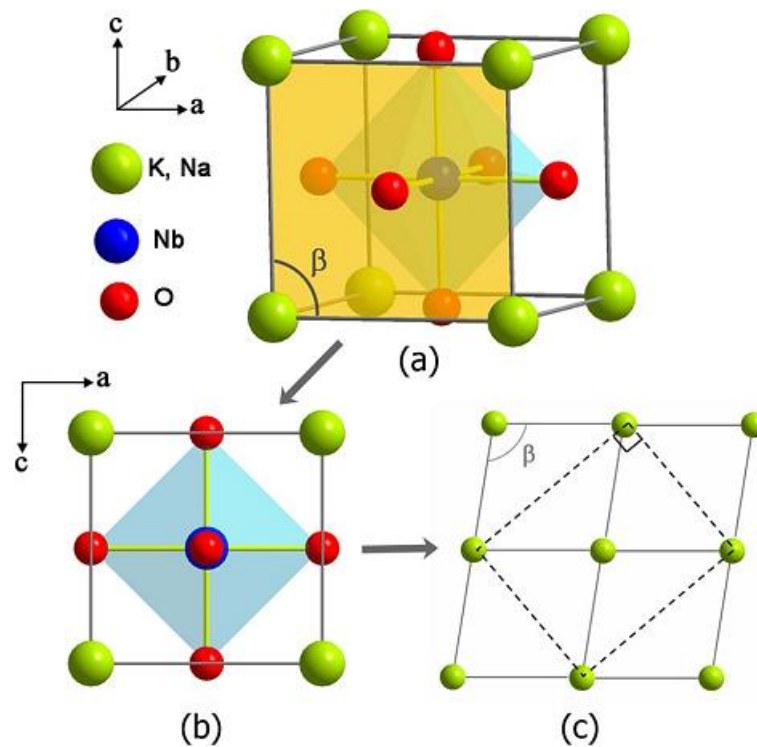
ข้อควรระวังในการใช้งาน

- 1) หลีกเลี่ยงการติดตั้งเครื่อง SEM ในตำแหน่งที่ใกล้เครื่องมือที่ใช้สนามแม่เหล็กสูงๆ เช่น เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance , NMR) แมสสเปกโตรมิเตอร์ อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron spin Resonance , ESR) เป็นต้น เพราะสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะไปรบกวนการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ทั้งนี้รวมถึงเครื่องมือที่ก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนด้วยเพราะจะไปรบกวนการทำงานของเครื่องทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องที่มีความไวสูงลดลง
- 2) ในการศึกษาตัวอย่างที่มีลักษณะพื้นผิวราบเรียบจะพบว่าสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ตรวจวัดได้จะมีน้อย ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวที่ราบเรียบสม่ำเสมอตลอดโดยทั่วจะทำให้ประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาในทุกๆทิศทางโดยรอบพื้นผิว จึงเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ตรงกับตำแหน่งของตัวตรวจวัดที่วางท่ามุมอยู่กับตัวอย่างทำให้ได้ภาพที่มีความเปรียบต่าง(contrast) น้อยภาพที่ได้จึงไม่ชัดเจน การแก้ไขสามารถทำได้โดยการเอียงตัวอย่างให้ท่ามุมลาดเอียงกับตัวตรวจวัดเพิ่มขึ้นเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนพื้นที่ผิวได้กว้างขึ้น ทำให้ประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ตรวจวัดได้มีจำนวนมากขึ้น สัญญาณภาพที่ได้จึงดีขึ้น
- 3) ในเครื่อง SEM ที่ใช้ระบบทำความดันสุญญากาศชนิดอออยด์ปั๊ม (Oil Diffusion Pump, ODP)เมื่อใช้เป็นเวลานาน ๆ จะมีไอน้ำมันไปเกาะที่แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนและชุดเลนส์ในคอลัมน์ได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจน จึงควรมีการตรวจสอบและทำความสะอาดส่วนประกอบสำคัญดังกล่าวตามระยะเวลาตรวจเช็คภาพเครื่องประจำปี หรือทำการตรวจสอบทุกครั้งที่สงสัยว่าความสกปรกดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุทำให้คุณภาพที่ได้ด้อยลง

- 4) ควรมีเครื่องควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (voltage stabilizer) ติดตั้งอยู่คู่กับเครื่อง SEM เพื่อป้องกันปัญหากระแสไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ อันจะก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบการทำงานของ SEM ได้
- 5) ควรตรวจสอบความสะอาดของตัวตรวจวัดสัญญาณด้วยเช่นกัน ในกรณีที่สงสัยว่าคุณภาพของภาพที่ด้อยลงนั้นมีสาเหตุมาจากความไม่สะอาดของตัวตรวจวัดสัญญาณ เนื่องจากมีสิ่งสกปรกเข้าไปเกาะจับบนผิวหน้าของตัวตรวจวัดสัญญาณ หากยังมีสภาพคงเดิมก็ยังไม่ได้ภาพที่ดีขึ้นก็อาจเป็นได้ว่าอุปกรณ์ดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพไปตามการใช้งานก็จำเป็นต้องเปลี่ยนตัวตรวจวัดใหม่
- 6) ในตัวอย่างที่มีลักษณะพื้นผิวบาง มีรูพรุน และไม่แข็ง เช่น ตัวอย่างพอลิเมอร์บางตัวนั้นการให้ความดันไฟฟ้าขนาดสูง(15 ถึง 30 กิโลโวลต์)จะทำให้ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังสูงทะลุผ่านพื้นผิวตัวอย่าง ทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจนและถูกต้องตามความต้องการ ดังนั้นควรทำการศึกษาตัวอย่างชนิดที่ความดันไฟฟ้าต่ำ ๆ (15 ถึง 15 กิโลโวลต์)
- 7) ในการศึกษาตัวอย่างที่จำเป็นต้องฉาบผิวด้วยโลหะนั้น ควรนำตัวอย่างนั้นเข้าศึกษาโดยทันทีที่เตรียมเสร็จ เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ คุณภาพหรือปริมาณของชั้นผิวโมเลกุลโลหะที่ฉาบอยู่จะลดลงไป ทำให้ต้องเคลือบซ้ำใหม่ หรือถ้าจำเป็นต้องเก็บตัวอย่างที่ฉาบผิวไว้เพื่อศึกษาในคราวต่อไป ก็ควรจะจัดเก็บในภาชนะสุญญากาศที่ปราศจากละอองฝุ่น
- 8) เนื่องจากใน SEM แต่ละรุ่น แต่ละบริษัทผู้ผลิตจะมีลักษณะการติดตั้งตำแหน่งของตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอนและรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งและมุมต่างกัน จึงมีระยะการทำงานที่เหมาะสมไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงไม่มีระยะการทำงานที่เหมาะสมตายตัวในการใช้ SEM ทุกรุ่นอาทิเช่น ในเครื่องรุ่นที่ทางสถาบันฯ มีอยู่นี้จะมีค่าระยะการทำงานที่เหมาะสมทั้งสำหรับการศึกษาภาพด้วย SEM และวิเคราะห์ธาตุแบบ EDS ที่ 10 นาโนเมตร ซึ่งค่านี้อาจจะไม่ใช้ระยะการทำงานที่เหมาะสมในเครื่อง SEM ชนิดหรือรุ่นอื่นก็ได้

2.8 โซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต (Sodium Potassium Niobate ; $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$) [12,18]

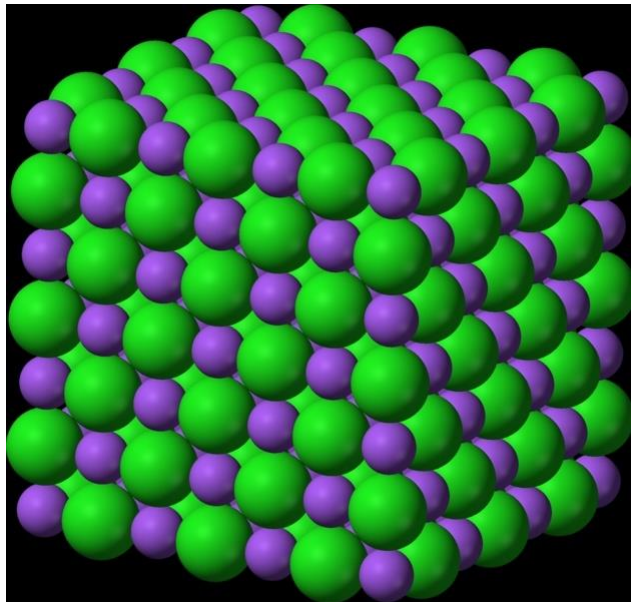
โซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต หรือ NKN เป็นสารประกอบเพียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์เชิงซ้อน (complex perovskite) สูตรโครงสร้างเป็น ABO_3 ดังรูป ที่ 2.8 โดยในรายงานวิจัยของ Hartling และคณะ ได้พบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ณ อุณหภูมิห้อง (25°C) โครงสร้างผลึกของ NKN เป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ซึ่งมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 200°C โครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) ซึ่งมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกเช่นกัน และที่อุณหภูมิ 420°C โครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็นคิวบิก (cubic) ซึ่งมีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริกตามลำดับ



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างออร์โธโรมบิกของเซรามิก NKN ณ อุณหภูมิห้อง (a) แสดงหน่วยยูนิตเซลล์ของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (b,c) ภาพฉายในแนวแกน b ของหน่วยยูนิตเซลล์ แสดงให้เห็นถึงการความสั้มนั้ระหว่างอะตอม Nb และ O [17]

2.9 นิกเกิลออกไซด์ (NiO) [19]

นิกเกิลออกไซด์ (NiO) เป็นสารประกอบออกไซด์ของ Ni^{2+} ที่มีโครงสร้างแบบเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีเลขโคออดิเนตเท่ากับ 6 และมีโครงสร้างแบบออกตาฮีดรอล (octahedral) ดังรูปที่ 2.9 มีจุดหลอมเหลวประมาณ $1960\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 74.6928 g/mol ความหนาแน่น เท่ากับ 6.67 g/cm^3 ลักษณะผงเป็นแบบผลึกละเอียดสีดำหรือสีเขียว ในปัจจุบันสารประกอบ NiO ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น เซรามิกคอมโพสิต อิเล็กโทรโครมิก แบตเตอรี่ โลหะผสม (alloy) และเซรามิกตระกูลเฟอร์ไรต์เพื่อใช้ทำสารแม่เหล็ก



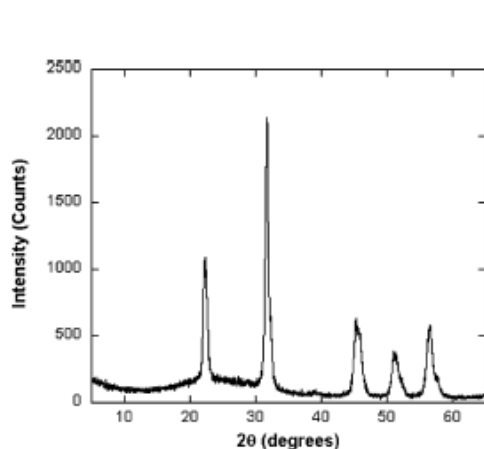
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) [19]

2.10 นาโนคอมโพสิตเฟอร์ไรต์อิเล็กทริกเซรามิก

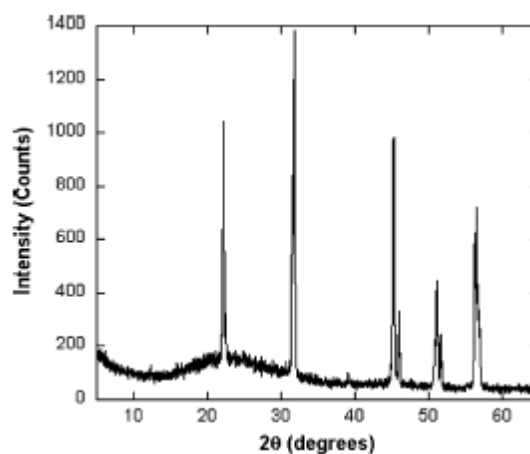
ในการใช้งานเซรามิกเฟอร์ไรต์อิเล็กทริกในทางด้านตัวขั้วรับหรือตัวแปลงนั้น มักจะถูกไวใช้งานภายใต้สภาวะความเค้น ดังนั้นสมบัติเชิงกลจึงมีความสำคัญในการนำมาพิจารณาด้วย การศึกษาการเสื่อมสภาพทางเชิงกล (mechanical degradation) ความเสถียรสูงต่ออายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งเมื่อใช้งานอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าหรือการให้น้ำหนักเป็นช่วงๆ (cyclic load) เป็นระยะเวลาหนึ่ง อาจทำให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างทางจุลภาคในรูปแบบของการแตกรระดับจุลภาค (micro cracking) และอาจทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมน ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป เกิดการเสื่อมสภาพทางสมบัติไฟฟ้าเชิงกล ดังนั้นจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาสมบัติเชิงกลของเซรามิกเฟอร์ไรต์อิเล็กทริก โดยยังคงสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีภายใต้สภาวะการทำงานที่มีการให้น้ำหนักทั้งทางเชิงไฟฟ้าและเชิงกล (electrical and mechanical loading) ซึ่งในปี ค.ศ. 1991 Niihara และคณะได้เสนอหลักการของเซรามิกนาโนคอมโพสิต โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ที่นำเสนอไว้นั้นจะเป็นเซรามิกนาโนคอมโพสิตในระบบ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ [20], $\text{BaTiO}_3/\text{metal oxide}$ [21], $\text{BaTiO}_3/\text{NiO}$ [22], $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ [23] เป็นต้น ซึ่ง Niihara และคณะ ได้นำเสนอแบบจำลองหรือแนวคิดในการจำแนกรูปแบบในการจัดเรียงเฟสองค์ประกอบหรือรูปแบบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกนาโนคอมโพสิตที่ประกอบด้วยสองเฟส ไว้ทั้งหมด 4 รูปแบบด้วยกันคือ (1) inter-granular (2) intra-granular (3) inter/intra-granular (4) nano/nanocomposite พร้อมทั้งได้รายงานไว้ว่าสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของเซรามิกนาโนคอมโพสิตดังกล่าวได้ ในแง่ของความแข็งแรงและความทนทานต่อการแตกหักได้เป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับเซรามิกในระบบเดี่ยว เช่น Al_2O_3 และ BaTiO_3

2.11 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในปี พ.ศ. 2547 Birol และคณะ [24] ได้ศึกษาสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตด้วยวิธีการมิกซ์ออกไซด์แบบดั้งเดิม โดยการควบคุมปัจจัยต่างๆ ทั้งความชื้นและอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ จากการศึกษพบว่า ค่าความหนาแน่นที่ได้จากชิ้นงานเซรามิกสูงถึงร้อยละ 95 จากความหนาแน่นทางทฤษฎี ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่ประมาณ 100 pC/N จากการศึกษาวงฮิสเทอรีซิสพบว่า ค่าสนามลบด้างแม่เหล็กที่ประมาณ 20 kV/cm และสภาพคงเหลือโพลาริเซชัน 20 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ดังรูปที่ 2.12 จากการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าการแยกตัวของฟิสิกและความคมชัดที่มากขึ้นดังรูปที่ 2.10 และจากรูป 2.11 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่รวดเร็ว 2 ช่วงอุณหภูมิที่ประมาณ 200 และ 420 °C ซึ่งเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากโครงสร้างออร์โธโรมบิกไปเป็นโครงสร้างเตตระโกนอล และคิวบิกตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ (ก) ผงแคลไซต์ (ข) ชิ้นงานเซรามิก ของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต [24]

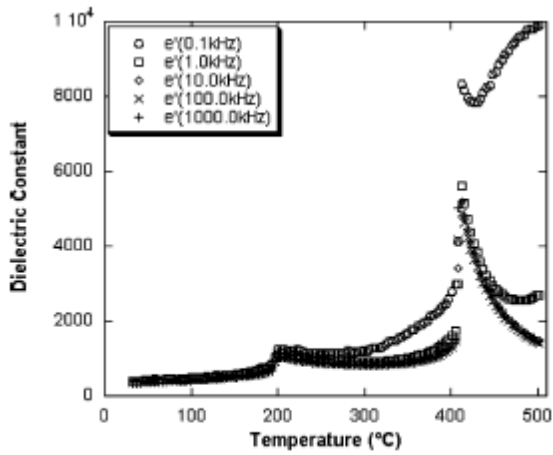
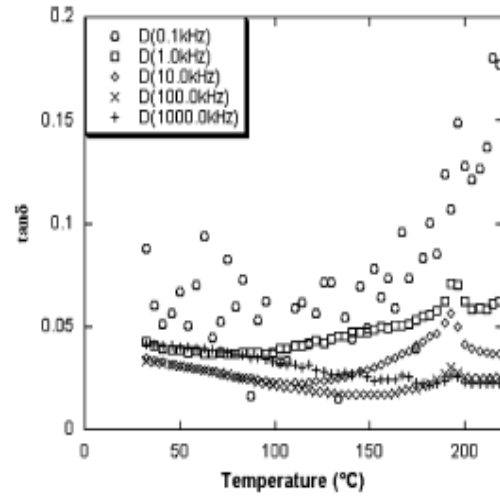


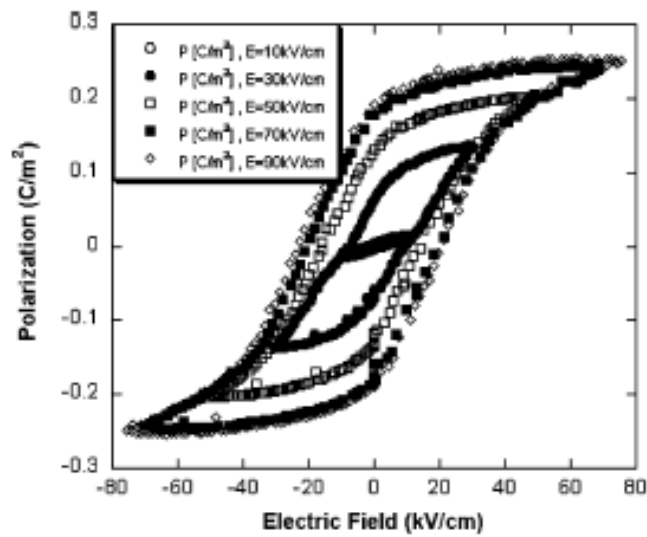
Fig. 4. Temperature vs. dielectric constant.

(ก)



(ข)

รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง(ก)ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และ(ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง [24]

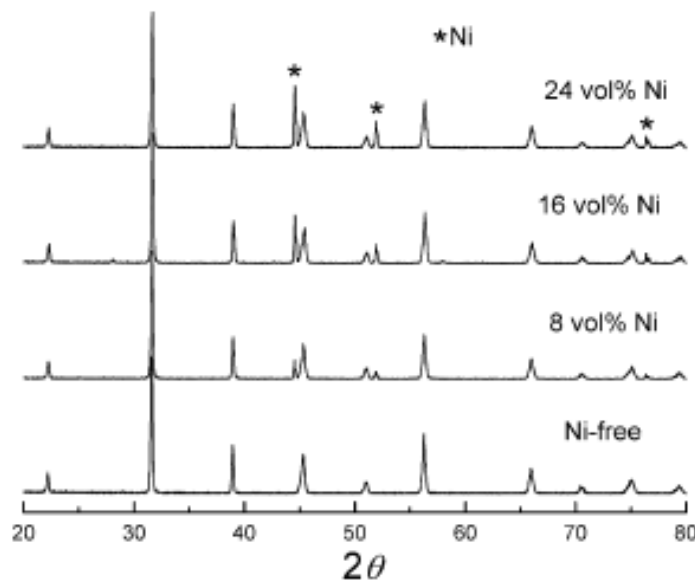


รูปที่ 2.12 แสดงวงฮิสเทอรีซิสของเซรามิกโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตที่อุณหภูมิห้อง [24]

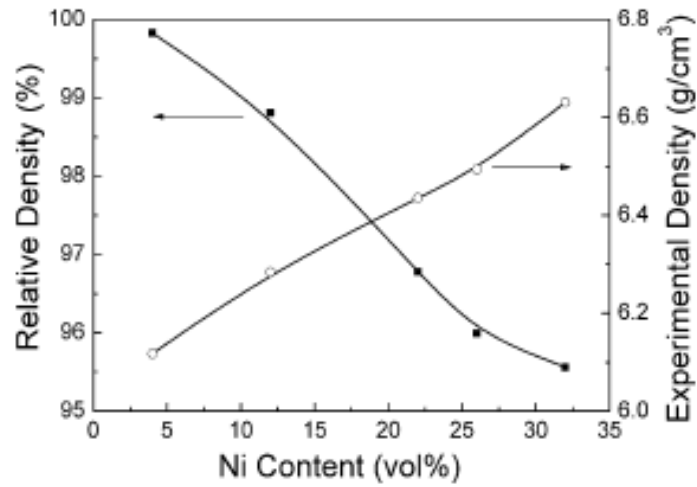
ในปี พ.ศ. 2547 Chen และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมบัติไดอิเล็กทริกโดยการเติมอนุภาคระดับนาโนของนิกเกิล(Ni) ลงไปในเซรามิกแบเรียมไทเทเนต(BT) ชนิด X7R โดยปริมาณที่เติมลงไปมีค่าเท่ากับ 0-30 vol% ผลการศึกษาจากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า ไม่พบเฟสขององค์ประกอบอื่นเกิดขึ้นนอกจาก BT และ Ni และไม่พบการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง BT กับ Ni ดังรูป 2.13

ผลจากการศึกษาค่าความหนาแน่นพบว่าเมื่อปริมาณของ Ni เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณรูพรุนที่มากขึ้นนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.14

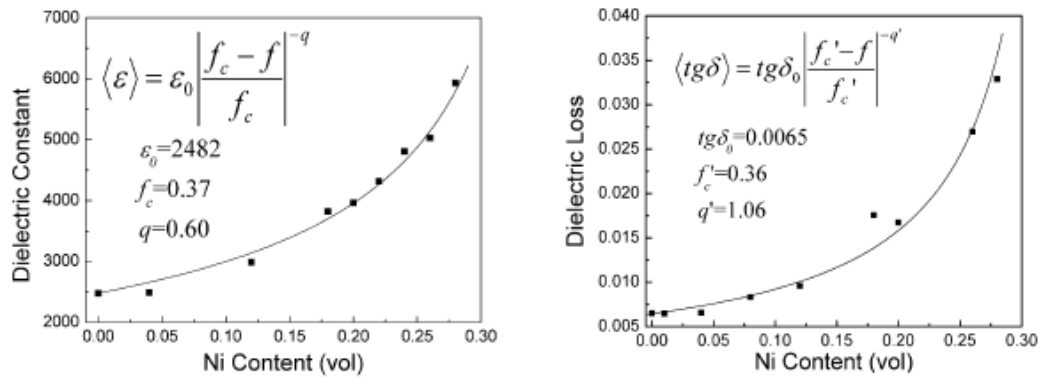
จากค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ได้เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Ni ที่เติมลงไป โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ปริมาณของ Ni เท่ากับ 28 vol% ที่ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ 6000 อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณที่เติมลงไป เท่ากับ 30 vol% แล้ว เซรามิกที่ได้ จะกลายสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า และเช่นเดียวกันกับค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Ni ที่เติมลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.13 แสดง XRD pattern ของเซรามิกคอมโพสิต BT/Ni เทียบกับปริมาณของ Ni ที่เติมลงไป [25]



รูปที่ 2.14 แสดงค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองและค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เทียบกับปริมาณของ Ni ในสัดส่วนต่างๆกัน [25]



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เทียบกับปริมาณของ Ni ที่เติมลงไปในส่วนต่างๆ ที่ทำการวัด ณ อุณหภูมิห้อง [25]

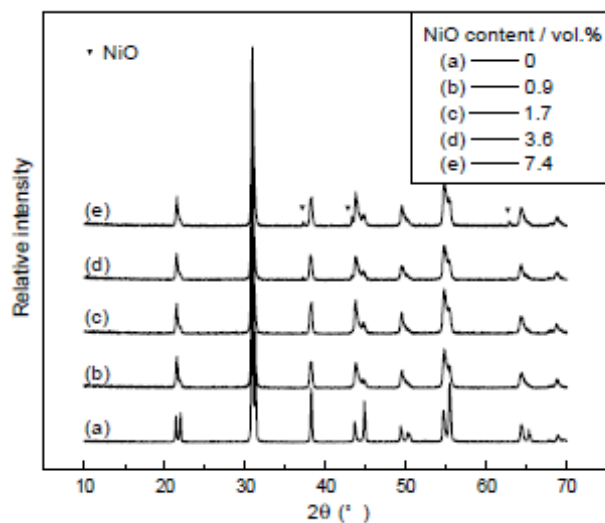
ในปีเดียวกัน Xiang และคณะ[26] ได้ศึกษาผลของพฤติกรรมการซินเตอร์ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกคอมโพสิต เลดเซอร์โคเนตไทเทเนตกับตัวเติมนิเกิลออกไซด์ (PZT/NiO) ของผงเคลือบที่ได้จากการตกตะกอน(heterogeneous precipitation) จากนั้นนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิปกติ โดยปริมาณของ NiO ที่เติมลงไปมีค่าเท่ากับ 0, 0.9, 1.7, 3.6, และ 7.4 vol% ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า จากเฟสองค์ประกอบที่ได้จากวิเคราะห์ XRD ไม่พบเฟสอื่นเจือปนมา กับเฟสของ PZT และ NiO และไม่พบเฟสที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PZT กับ NiO ดังรูปที่ 2.16 และจากการตรวจสอบค่าความเป็นเตตระโกนอล (c/a) ของเซรามิกคอมโพสิตพบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าความเป็นเตตระโกนอลลดลงคือ ความสามารถในการละลายของ NiO ในตัวกลาง PZT จากรูปที่ 2.17 พบว่า ความเป็นเตตระโกนอลลดลงเมื่อปริมาณ NiO ที่เติมลงไปมากกว่า 0.9 vol%

จากการศึกษาหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกคอมโพสิตที่เตรียมได้นั้น พบว่า ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ NiO ที่เติมลงไป อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้แก่เซรามิกที่ซินเตอร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ เมื่อเทียบกับเซรามิก PZT ดังแสดงในรูป 2.18 โดยจากรูปพบว่า ที่อุณหภูมิ 1120 °C และปริมาณ NiO เท่ากับ 3.6 vol% มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดที่ 98 %

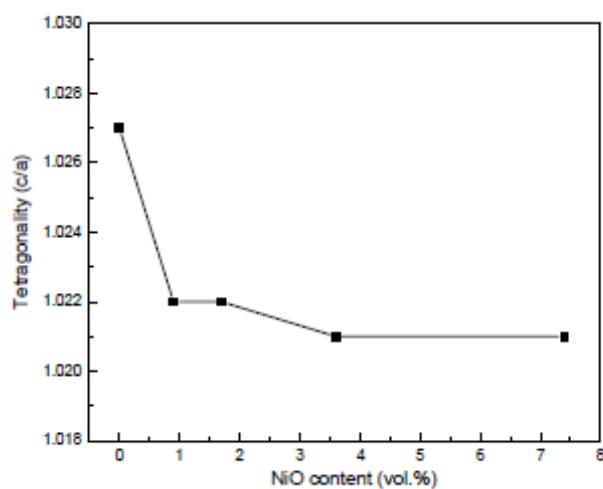
ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า ค่าความแข็ง(hardness) โมดูลัสของยัง ค่าความแข็งแรงของการแตกหัก และค่าความทนทานต่อการแตกหักนั้น เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ NiO ที่เติมลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งสมบัติเชิงกลของเซรามิกคอมโพสิตนั้น ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของ NiO ในตัวกลาง และขนาดเกรนโดยเฉลี่ยตามลำดับ

ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกคอมโพสิต PZT/NiO ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกทั้งก่อนและหลังการโพล กับค่า K_p พบว่า ค่าไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องทั้งก่อนและหลังการโพลีมีค่าลดลงที่ ปริมาณของ NiO เท่ากับ 0.9 vol% และหลังจากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณที่เพิ่มเข้าไป ในทางกลับกัน ค่า K_p มีค่าลดลงตามปริมาณของ NiO ที่เติมเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ดังนั้นสรุปได้ว่า เซรามิกคอมโพสิต PZT/NiO ที่ปริมาณ 3.6 vol% นั้น มีความเหมาะสม

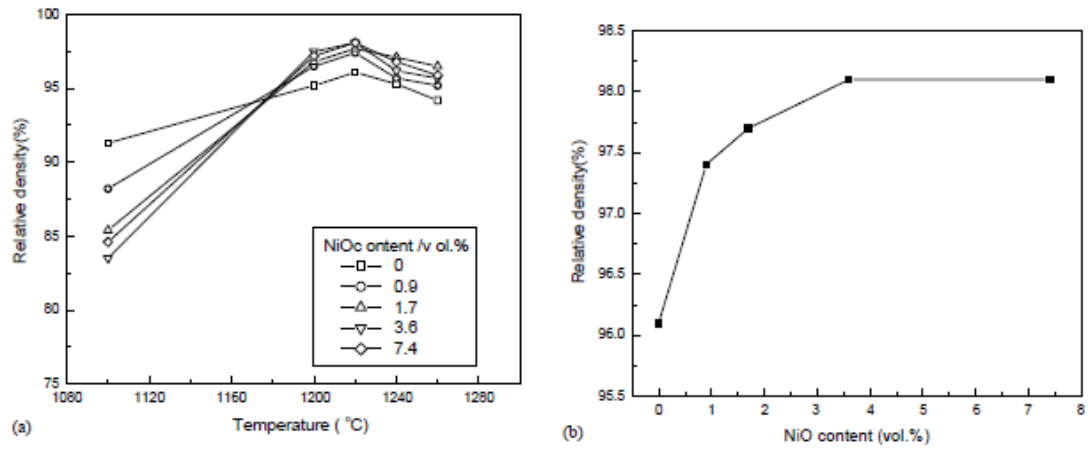
สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องแอคชูเอเตอร์ เนื่องจากมีสมบัติทางไฟฟ้าที่สามารถยอมรับได้ และสมบัติเชิงกลที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง



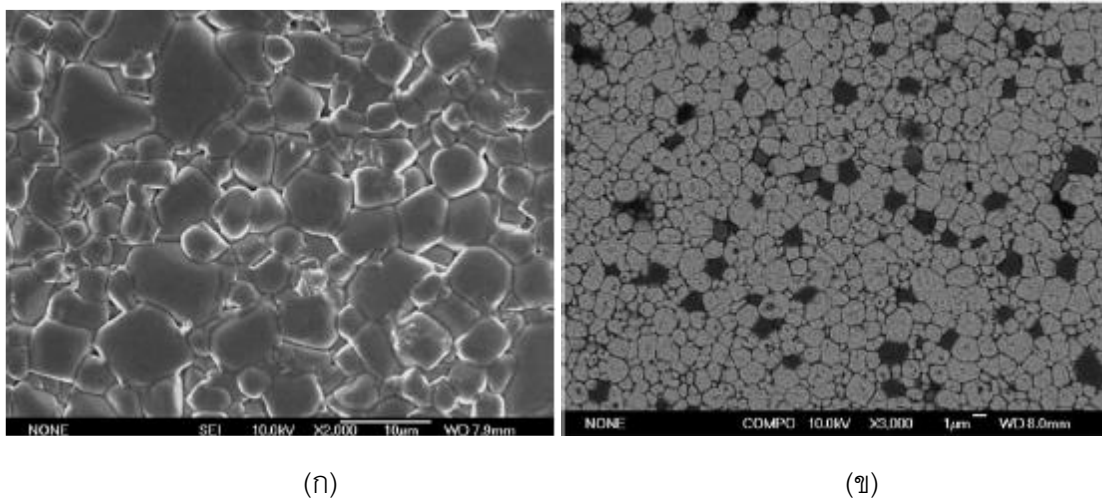
รูปที่ 2.16 แสดง XRD pattern ของเซรามิกคอมโพสิต PZT/NiO เทียบกับปริมาณของ NiO ที่เติมลงไป [26]



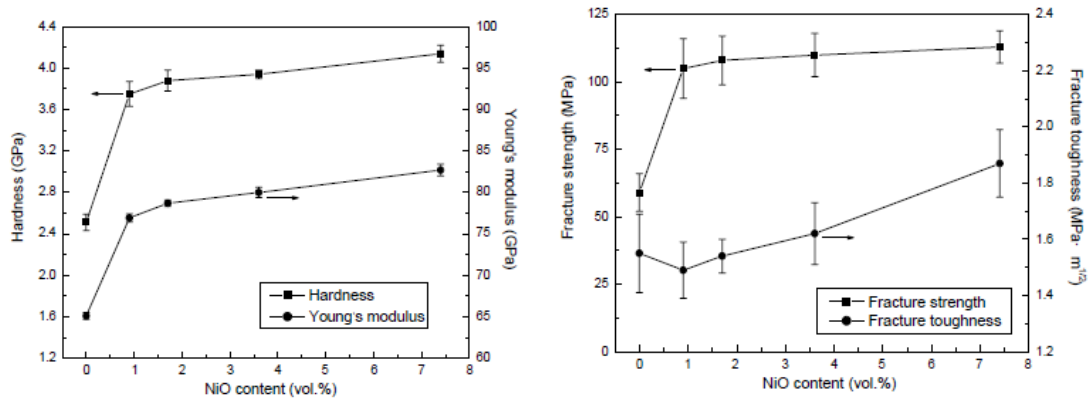
รูปที่ 2.17 แสดงค่าความเป็นเตตระโกนอล (c/a) ของเซรามิกคอมโพสิต PZT/NiO เทียบกับปริมาณของ NiO ในสัดส่วนต่างๆกัน [26]



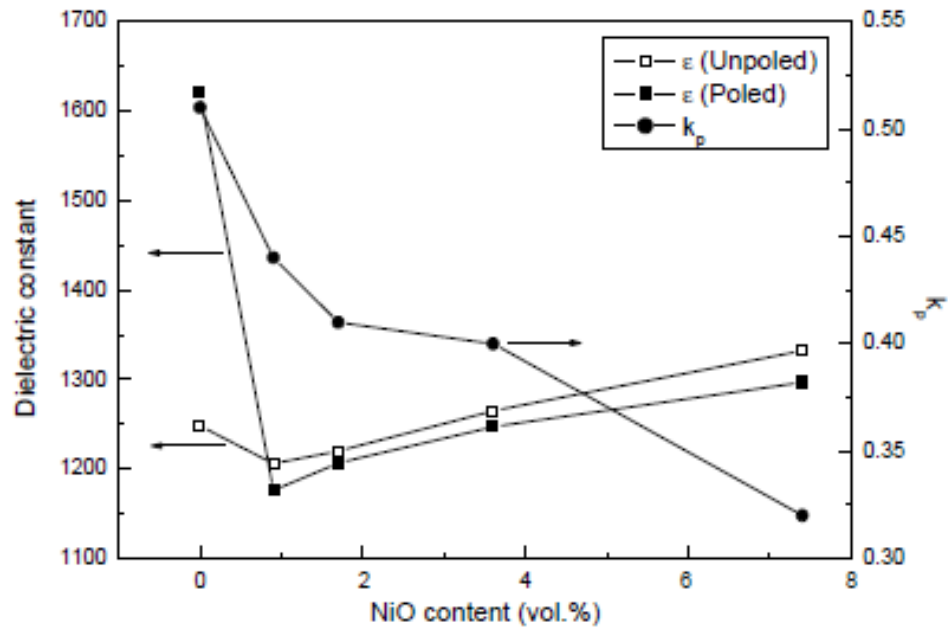
รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้เทียบกับอุณหภูมิซินเตอร์ และ ปริมาณของ NiO ที่เติมลงไปในส่วนต่างๆกัน [26]



รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้อง SEM (ก) เซรามิก PZT (ข) เซรามิกคอมโพสิต PZT/NiO ที่ปริมาณของ NiO 7.4 vol% ณ อุณหภูมิ 1120 °C [26]



รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง ค่าโมดูลัสของยัง และค่าความทนทานต่อการแตกหักเทียบของเซรามิกคอมโพสิต PZT/NiO เทียบกับปริมาณของ NiO ที่เติมลงไปในส่วนต่างๆกัน [26]

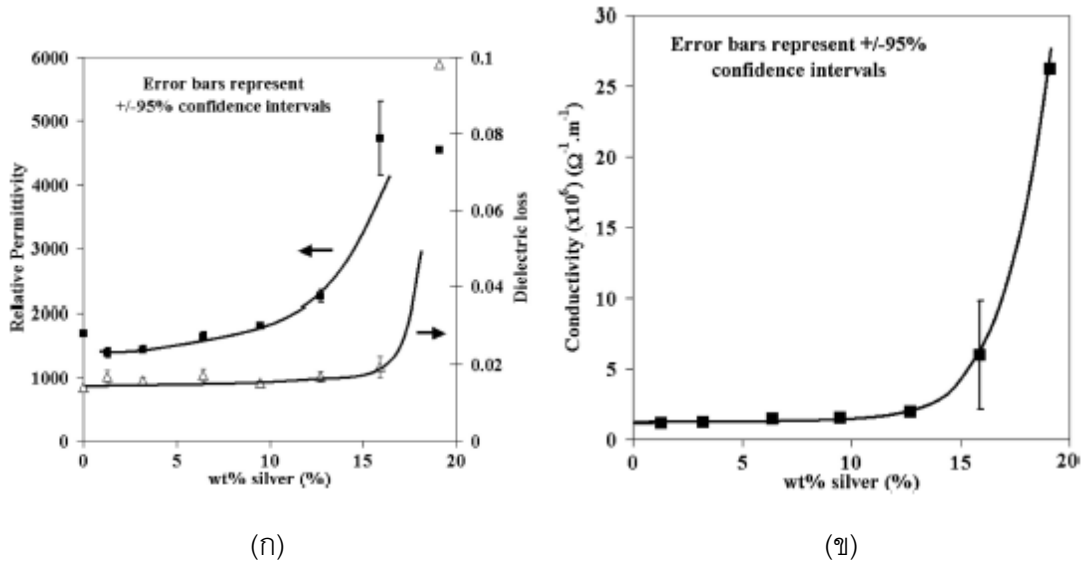


รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกทั้งก่อนและหลังการโพลลิง กับค่า k_p ที่อุณหภูมิ 1120 °C เทียบกับปริมาณของ NiO ที่เติมลงไป [26]

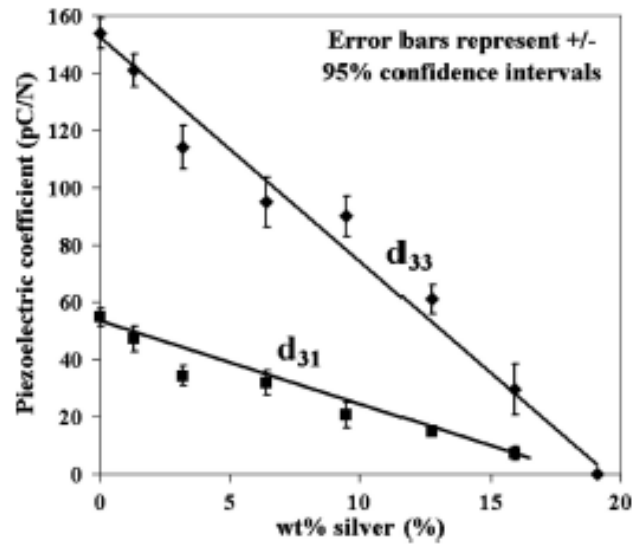
ต่อมาในปี พ.ศ. 2549 Panteny และคณะ [27] ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกคอมโพสิตแบบเรียบไทเทเนต/ซิลเวอร์ (BT/Ag) ที่ปริมาณ Ag เท่ากับ 0, 1.3, 3.2, 6.4, 9.5, 12.7, 15.7 และ 19.1 wt% ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ปริมาณ Ag น้อยๆ (<10 wt%) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตามปริมาณที่เติมลงไป แต่ในทางกลับกันค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของ Ag ที่เติมลงไปมากกว่า 20 wt% ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งในทำนองเดียวกันกับ ค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ณ ปริมาณเดียวกันกับค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคาดว่าอนุภาคของ Ag เกิดการเชื่อมต่อกันเองภายใน ระหว่างเกรน ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าที่มากขึ้นนั่นเอง

สำหรับค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริก (d_{33} และ d_{31}) ที่ได้จากการทดลองพบว่า มีค่าลดลงในเชิงเส้นตามปริมาณของ Ag ที่เติมลงไป ดังรูปที่ 2.23 เนื่องจากเฟสของ Ag ที่เกิดขึ้นนั้นไม่มีสมบัติเพียโซอิเล็กตริก ($d_{33} = 0$) และเกิดจากผลของการโหลดเชิงกล (mechanical load) ในระหว่างการโพลิ่ง และอาจเป็นไปได้ว่า เกิดจากปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้น จากปริมาณของ Ag ที่เติมลงไปนั่นเอง

ในส่วนของการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า-โพลาริเซชันของเซรามิกคอมโพสิตนั้น ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1 ที่ปริมาณของ Ag เท่ากับ 0, 1.3 และ 6.4 wt% ที่สนามไฟฟ้าภายนอกเท่ากับ 1.5 kV/mm ตามลำดับ พบว่า ค่าโพลาริเซชันคงเหลือมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวเติมที่เติมลงไป เช่นเดียวกันกับค่าสนามหักล้างและการสูญเสียฮิสเทอรีซิสที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยพบว่าจากการเติม Ag ลงไปทำให้เซรามิก BT มีแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกชนิด Hard ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก)ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง (ข)สภาพการนำไฟฟ้า เมื่อเทียบกับ ปริมาณของ Ag ที่เติมลงไป [27]

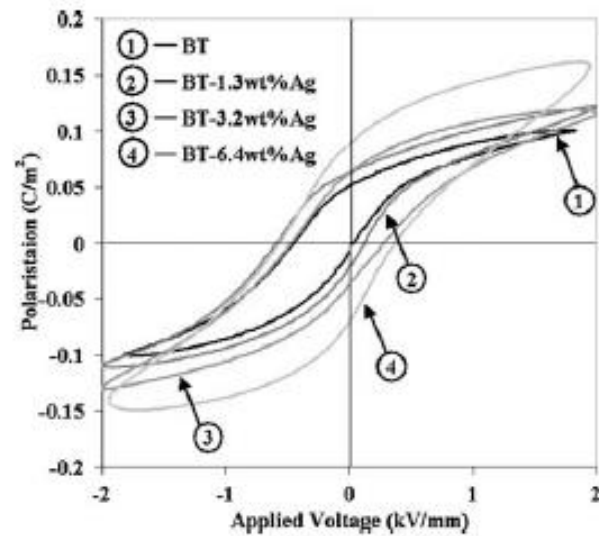


รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก เทียบกับปริมาณของ Ag ที่เติมลงไปในส่วนต่างๆกัน [27]

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าทางไฟฟ้าของเซรามิกคอมโพสิต BT/Ag ที่ได้จากการวัดวง ฮิสเทอรีซิส ที่ความต่างศักย์ 1.5 kV/mm [27]

TABLE I Measured property responses for an electric field amplitude of 1.5 kVmm^{-1}

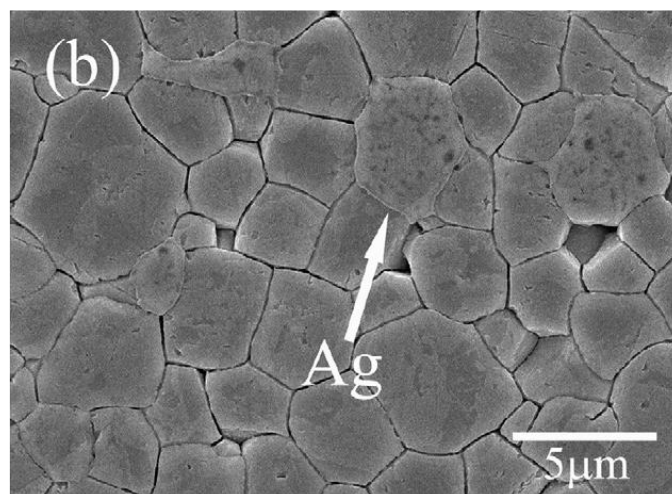
Property	0 wt.% silver	1.3 wt.% silver	6.4 wt.% silver
Maximum polarisation (Cm^{-2})	0.095	0.086	0.126
Remnant polarisation (Cm^{-2})	0.025	0.026	0.056
Coercive field (kVmm^{-1})	0.23	0.30	0.35
Hysteresis loss (Jm^{-3}) ($\times 10^4$)	7.2	7.5	18.0



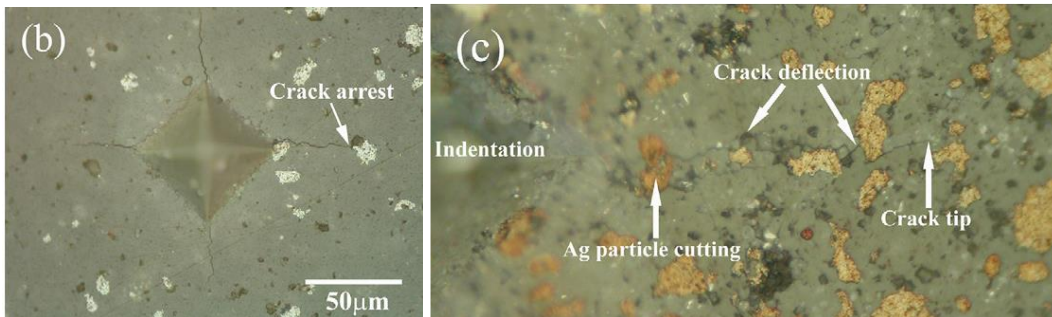
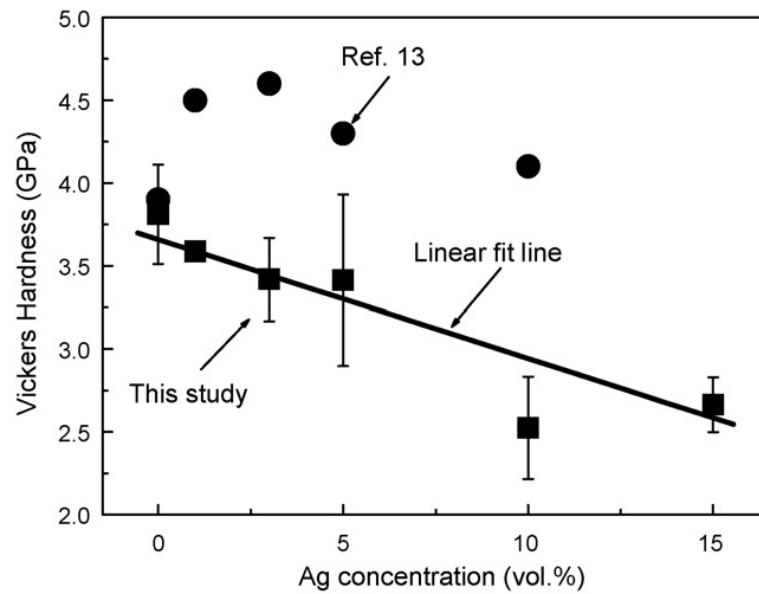
รูปที่ 2.24 แสดงผลของการวัดวง ฮิสเทอรีซิส ที่สนามไฟฟ้า 1.5 kV/mm เทียบกับปริมาณของ Ag ที่เติมลงไปในส่วนต่างๆกัน [27]

ต่อมาในปี พศ. 2551 Zhang และคณะ[28] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต PZT/Ag สำหรับการประยุกต์ใช้ในเครื่องแอคชูเอเตอร์ โดยปริมาณของ Ag ที่เติมลงไปมีค่าเท่ากับ 0 5 10 และ 15 vol% ตามลำดับ เตรียมโดยวิธี CIP (cold isostatically pressed) ที่ 200 MPa จากผลการศึกษาพบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้ในรูป 2.25 นั้น อนุภาคของ Ag กระจายอยู่ทั่วไปในระหว่างเกรนของเซรามิก PZT โดยขนาดของอนุภาคนั้นมีค่าระหว่าง 2-30 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับปริมาณที่เติมลงไป

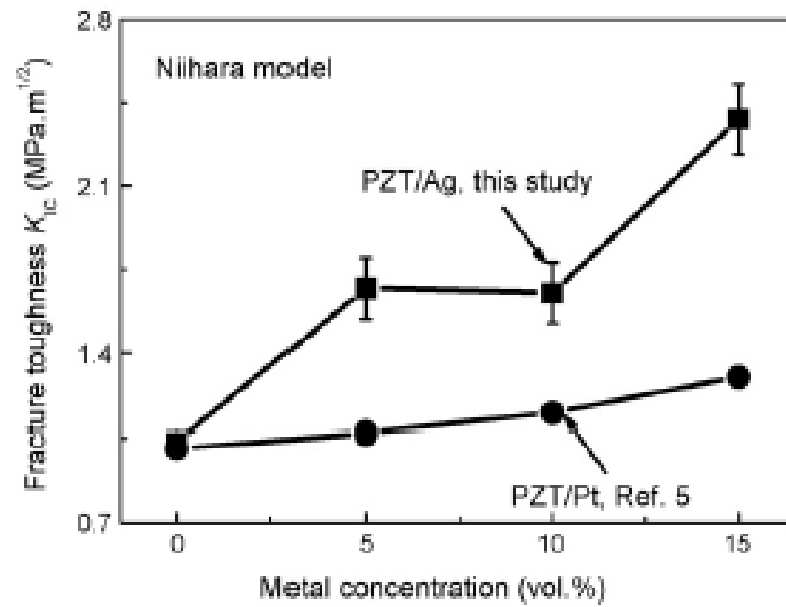
สำหรับผลการศึกษาค่าความแข็งของวิกเกอร์ (Vicker's hardness) พบว่า มีค่าลดลงตามปริมาณของ Ag ที่เติมลงไปดังรูปที่ 2.26 โดยคาดว่า ขนาดของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของ PZT นั้น มีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มเข้าไป รวมทั้งการทดสอบก็กระทำแบบสุ่ม ทำให้มีความเป็นไปได้ที่หัววัดอาจสัมผัสกับส่วนของอนุภาค Ag ที่รวมตัวกันก็เป็นได้ อย่างไรก็ตามหากขนาดของอนุภาคที่กระจายตัวมีขนาดลดลงอยู่ในระดับนาโน อาจมีผลทำให้ค่าความแข็งที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้นก็เป็นได้ และในส่วนของค่าความทนทานต่อการแตกหักนั้น พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Ag ที่เติมลงไปดังแสดงในรูป 2.27



รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกคอมโพสิต PZT/Ag [28]



รูปที่ 2.26 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของวิกเกอร์เทียบกับปริมาณของ Ag ที่เติมลงไปและภาพแสดงหัววัดที่ทำการทดสอบสัมผัสกับผิวหน้าของเซรามิก [28]



รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อการแตกหักของเซรามิกคอมโพสิต PZT/Ag เทียบกับปริมาณของ Ag ที่เติมลงไป โดยเปรียบเทียบกับงานวิจัย PZT/Pt [28]

ต่อมาในปี พศ. 2552 Tuan และ Huang [29] ได้ศึกษาสมบัติของเซรามิกนาโนคอมโพสิต BaTiO₃ (BT)/Ni ที่มีค่าเพอร์โกลเลทิฟ สูง โดยปริมาณของ Ni ที่เติมลงไปเท่ากับ 0 1 5 35 และ 50 vol% ตามลำดับ จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็น ถึงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Ni ที่เติมลงไป และในปริมาณมากกว่า 5 vol% ขึ้นไป ยังตรวจพบสภาพความเป็นแม่เหล็กได้อีกด้วย ดังแสดงในรูป ที่ 2.30

สำหรับโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้อง SEM พบว่า อนุภาคของ Ni กระจายตัวอยู่ทั่วไปในเฟสของ BT และจะรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มเข้าป้ดังรูป ที่ 2.28

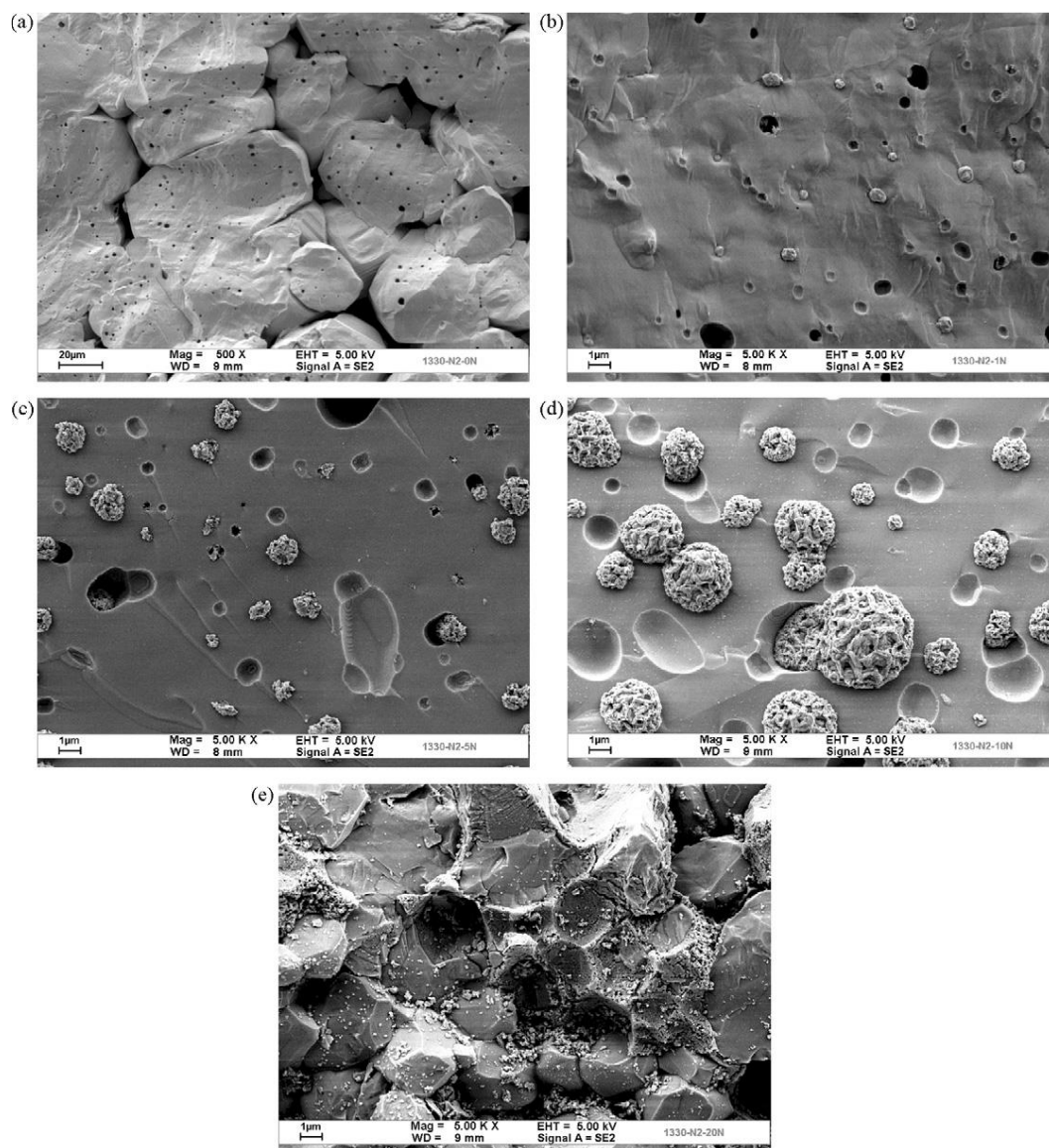
จากการศึกษาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้นั้น พบว่า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของคอมโพสิตที่ปริมาณ Ni ตั้งแต่ 0-10 vol% มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงสุดที่ 35 vol% โดยจะมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ 28800 และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ประมาณ $1 \text{ M}\Omega/\text{cm}$ ดังรูปที่ 2.29

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และสภาพความเป็นแม่เหล็กของเซรามิกนาโนคอมโพสิต BT/Ni [29]

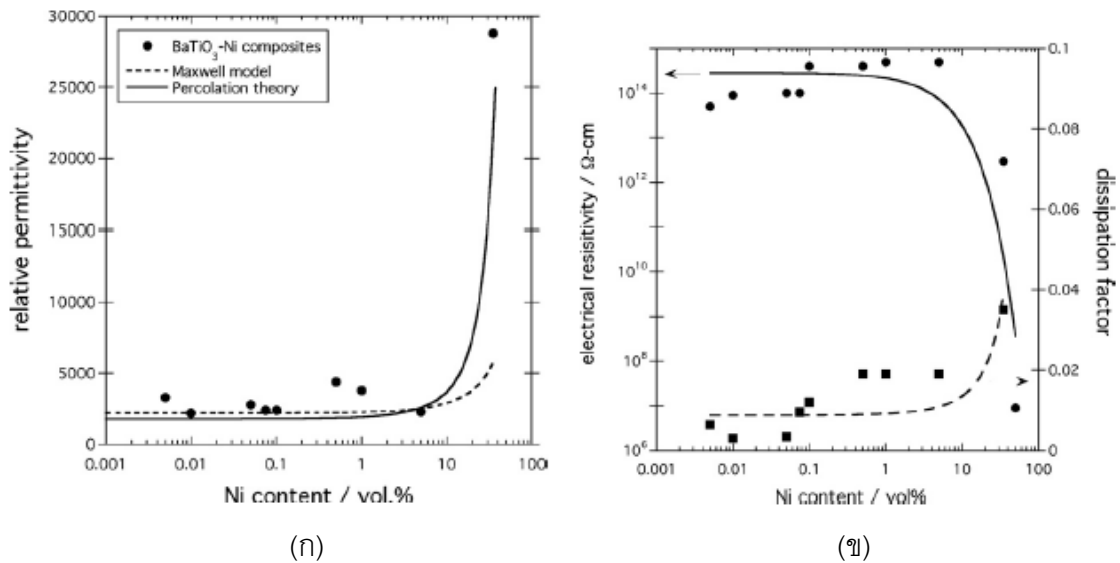
Table 1

Relative density and saturated magnetization of BaTiO₃–Ni composites after sintering at 1330 °C for 2 h in N₂.

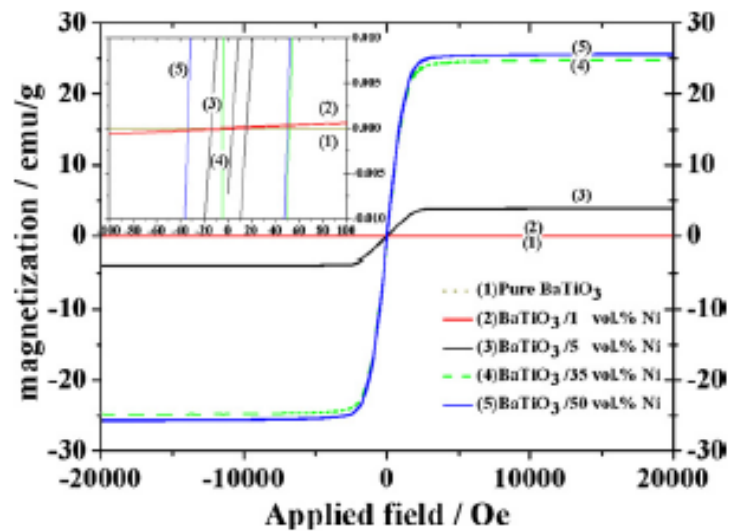
Ni content/vol%	0	1	5	35	50
Relative density/%	96	96	95	98	97
Saturated magnetization/emu g ⁻¹	–	–	4	25	26



รูปที่ 2.28 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้อง SEM ของเซรามิกนาโนคอมโพสิต BT/Ni (a) 0 vol% (b) 1 vol% (c) 5 vol% (d) 35 vol% และ (e) 50 vol% ตามลำดับ [29]



รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) สภาพยอมสัมพัทธ์ และ (ข) สภาพต้านทานไฟฟ้า เทียบกับ ปริมาณ Ni ที่เติมลงไปในส่วนต่างๆกัน [29]



รูปที่ 2.30 แสดงสภาพความเป็นแม่เหล็กที่วัดได้จากเซรามิกนาโนคอมโพสิต BT/Ni ที่ปริมาณ Ni ใน ส่วนต่างๆกัน [29]