



## บทที่ 2

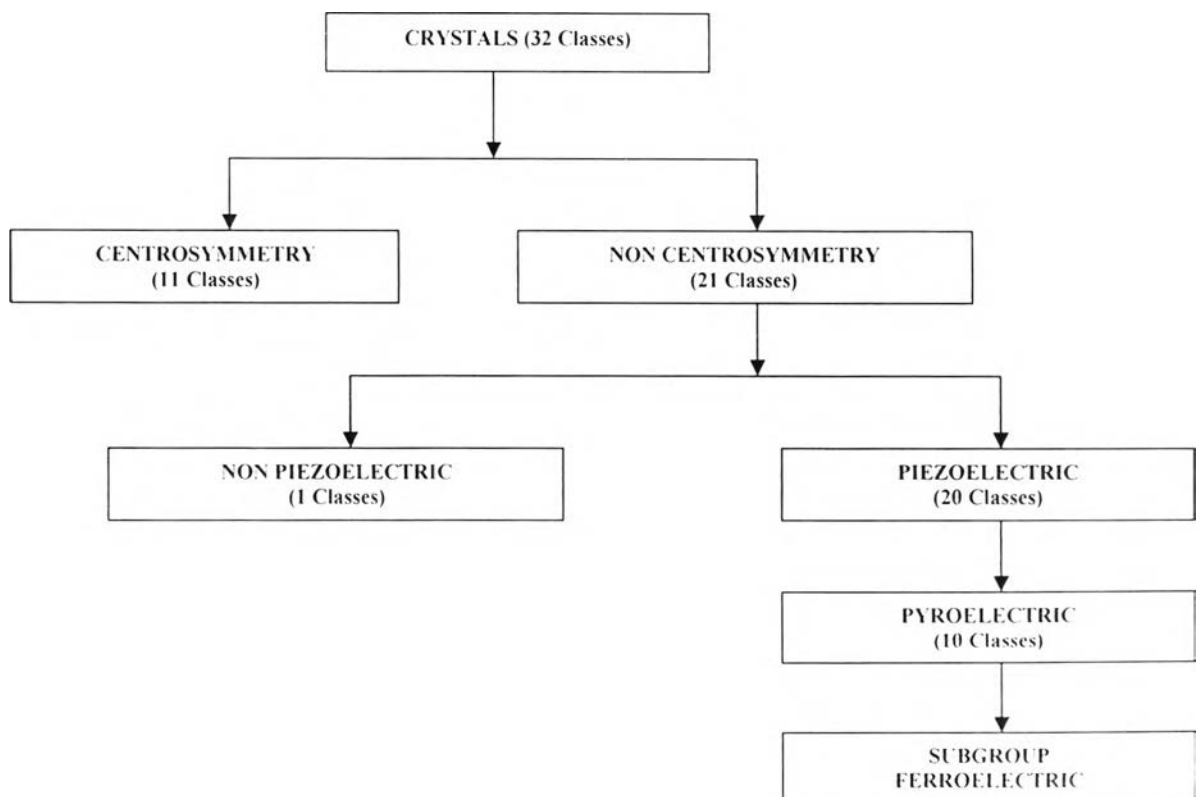
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์

##### 2.1.1 ทฤษฎีเฟอร์โรอิเล็กทริก

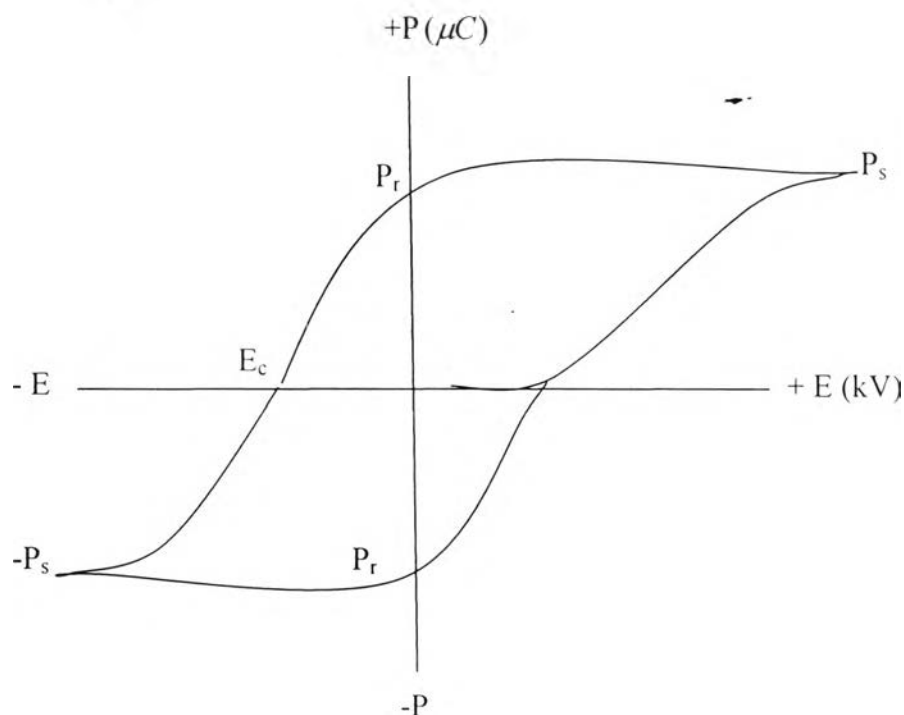
สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกหมายถึงลักษณะของสารบางชนิดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแล้วสารนั้นสามารถที่จะเกิดขั้วขึ้นได้ด้วยตัวเอง (spontaneous polarization) สำหรับระบบผลึกในธรรมชาติ นักฟิสิกส์ศาสตร์ได้มีการจำแนกผลึกตามลักษณะ โครงสร้างของผลึก (symmetry element) ได้เป็น 32 กลุ่ม ดังรูปที่ 2.1

พิจารณาจากรูป ลักษณะโครงสร้างของผลึกซึ่งมีทั้งหมด 32 กลุ่มโดยในจำนวนนี้จะมีผลึกที่มีความสมมาตร (centro symmetry) อยู่ 11 กลุ่ม และมีผลึกที่ไม่มีความสมมาตร (Non-Centro symmetry) 21 กลุ่ม และใน 21 กลุ่มนี้จะมี 20 กลุ่มที่มีคุณสมบัติเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกโดยยกเว้นผลึกในกลุ่ม 423 ที่ไม่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก จาก 20 กลุ่มจะมี 10 กลุ่มที่มีสมบัติเป็นไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric) ซึ่งจะมีลักษณะการเกิดขั้วเมื่อมีการให้ความร้อนหรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการแบ่งกลุ่มโครงสร้างของสารที่มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก

การพิจารณาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกหรือสภาพการเกิดขั้วได้เองเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าของสารนั้น สามารถที่จะอธิบายได้โดยใช้วงจรัสเทอร์รีซิส (hysteresis loop) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการเกิดขั้ว (polarization,  $P$ ) กับค่าสนามไฟฟ้า (electric field,  $E$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะวงจรัสเทอร์รีซิสของสารที่มีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก

พิจารณาจากรูปเป็นลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง  $P$  กับ  $E$  ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรัสเทอร์รีซิส (non-linear  $P$ - $E$  hysteresis loop) ที่จะเกิดขึ้นเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก จะทำให้เกิดการเรียงตัวของโดเมนจากที่ไม่เป็นระเบียบกลายเป็นโดเมนที่เป็นระเบียบ โดยทิศของโดเมนจะมีทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ซึ่งเรียกลักษณะนี้ว่าการเกิดขั้วทางไฟฟ้า (polarization) เมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในช่วงแรก โดเมนซึ่งมีลักษณะการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบจะเริ่มมีการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าและจะมีการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งโดเมนเกือบทั้งหมดมีการจัดเรียงตัวกันในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ที่บริเวณนี้จะได้จุดขั้วไฟฟ้าอิ่มตัว (saturation polarization,  $P_s$ ) หลังจากนั้นเมื่อมีการลดสนามไฟฟ้าลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ โดเมนบางส่วนพยายามที่จะเคลื่อนที่กลับทิศทางเดิมและยังมีโดเมนบางส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่กลับมามาทางเดิมได้ เรียกจุดนี้ว่าจุดขั้วไฟฟ้าคงตัว (remanent polarization,  $P_r$ ) และเมื่อมีการเพิ่มสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนเริ่มต้นจนจุดขั้วไฟฟ้าคงตัวเท่ากับศูนย์เรียกสนามไฟฟ้า ณ จุดนี้ว่าสนามไฟฟ้าบังคับ (coercive field,  $E_c$ ) เมื่อมีการเพิ่มสนามไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งโดเมนทั้งหมดมีการจัดเรียงตัวในทิศเดียวกันกับสนามไฟฟ้าอีกครั้งจะได้จุด- $P$  เครื่องหมายลบ

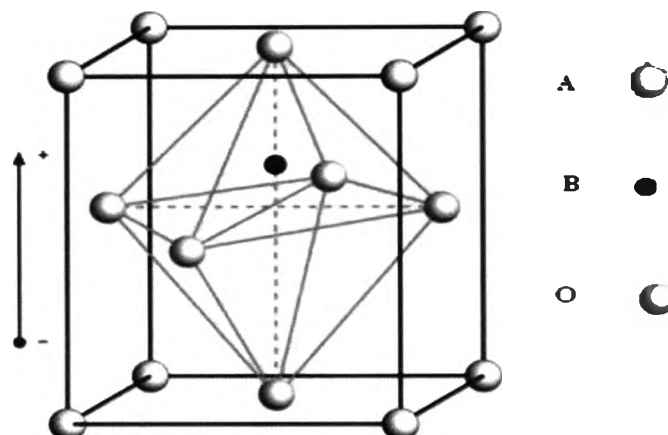
แสดงว่าโพลาริเซชันมีทิศตรงข้ามกับตอนแรก หลังจากนั้นก็ลดสนามไฟฟ้าลงมาให้เท่ากับศูนย์อีก จะมีโดเมนบางส่วนที่มีการกลับทิศแต่ยังมีค่าโพลาริเซชันบางส่วนเหลืออยู่ซึ่งที่จุดนี้เรียก  $-P$  และเมื่อมีการเพิ่มสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับตอนเริ่มต้น โดเมนก็จะมีการจัดเรียงตัวไปในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ทำให้ทำให้เกิดเป็นวงจรีสเทอร์ริซีสต์ดังรูป 2.2

### 2.1.2 ทฤษฎีเพียโซอิเล็กทริก

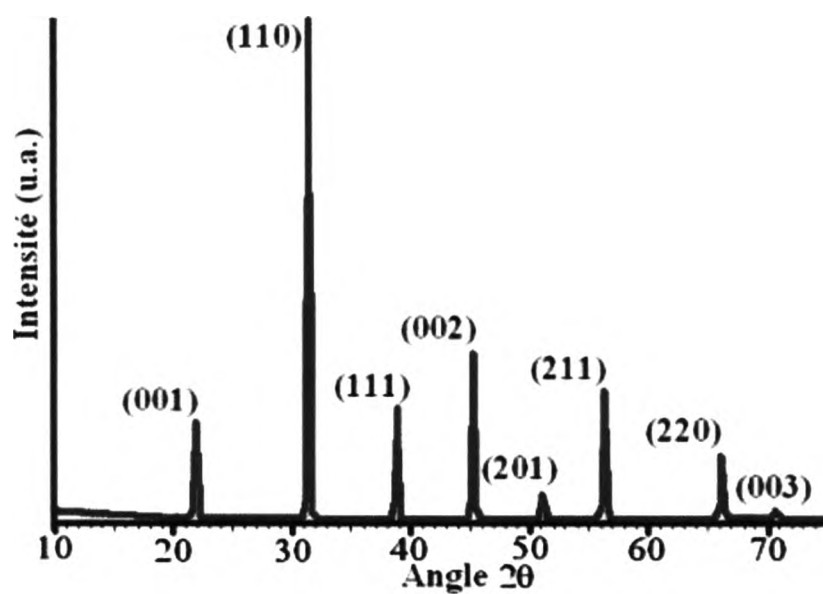
ในปี ค.ศ. 1880 เจ็ครอท และปีแอร์ ได้มีการค้นพบว่าวัสดุบางกลุ่มมีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกระหว่างการทดลองศึกษาผลของความดันต่อประจุไฟฟ้าของผลึกบางประเภทเช่น ควอทซ์ (quartz) ซิงค์เบลน (zincblende) และทัวร์มาลีน (tourmaline) เขาพบว่าเมื่อให้แรงกดกับผลึกดังกล่าวจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นและในทางตรงข้ามเมื่อให้สนามไฟฟ้าก็จะเกิดแรงขึ้น ต่อมาในปี 1881 เฮนเกน ได้ให้นิยามของปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectricity or pressure electricity)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกหมายถึงการเกิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการที่วัสดุได้รับแรงกดทำให้เกิดการจัดการเรียงตัวไปในทิศเดียวกันของขั้วไฟฟ้าเรียกว่าการโพลาริเซชัน (polarization) โดยปริมาณและเครื่องหมายของขั้วไฟฟ้าจะแปรผันตามแรงกดที่ได้รับและในทางตรงข้ามเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่ผลึกก็จะเกิดการยืดหรือหดตัวของผลึกซึ่งทำให้เกิดแรง สาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้เนื่องจากการไม่มีสมมาตรของประจุในศูนย์กลางผลึกทำให้ผลรวมของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและลบสามารถสร้างไดโพลขึ้นมานั่นเอง

สำหรับลักษณะโครงสร้างของผลึกวัสดุที่เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะโครงร่างเป็นแบบเพอร์รอฟสไกต์ (perovskite) หรือ  $ABO_3$  ดังรูป 2.3 และรูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของไดอะแกรมของผลึกที่มีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (x-ray diffraction, XRD)



รูป 2.3 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) ( $ABO_3$ ) ของสารเพียโซอิเล็กทริก [21]

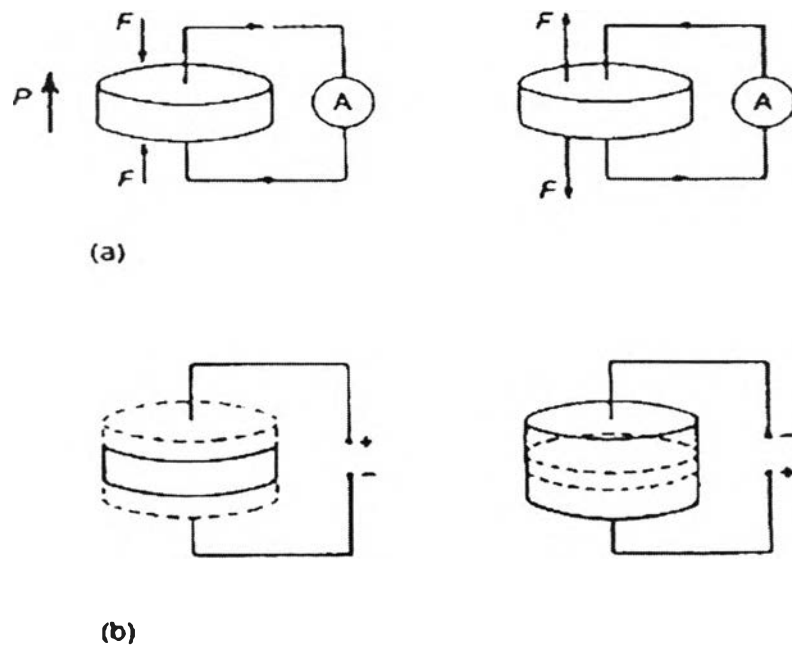


รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะพีคของสารเพียโซอิเล็กทริก PZT เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) [21]

ปรากฏการณ์ทางเพียโซอิเล็กทริกสามารถแบ่งเป็นสองรูปแบบคือ

- 1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (direct piezoelectric effect) คือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อให้แรงกด (compressive stress) แก่ผลึกทำให้เกิดสนามไฟฟ้า หรือในขณะเดียวกันเมื่อให้แรงดึง (tensile stress) ก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้งาน เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณ
- 2 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบกลับ (converse piezoelectric effect) คือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่ผลึกสารนั้นทำให้เกิดการขยายหรือการหดตัว ถ้าสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปมีทิศเดียวกับทิศของการโพลาไรเซชันชั้นชั้นงานก็จะเกิดการหดตัวแต่ถ้าทิศของสนามไฟฟ้ามีทิศตรงข้ามกับทิศของการโพลาไรเซชันชั้นชั้นงานก็จะเกิดการขยายตัว ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบกลับ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า (ultrasonic motor)

ลักษณะของปรากฏการณ์ทางเพียโซอิเล็กทริกทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกของสารเพียโซอิเล็กทริก

(a) แบบตรง (b) แบบกลับ [22]

พิจารณาจากรูป 2.5 (a) เมื่อมีแรงเค้นกระทำกับสารเพียโซอิเล็กทริกก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า หรือกลับกันจากรูป 2.5 (b) เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปก็จะทำให้เกิดการยืดหรือหด

### 2.3 ความสัมพันธ์พื้นฐานของสมบัติเพียโซอิเล็กทริก

จากปรากฏการณ์ทางตรงเมื่อให้แรงเค้นทางกล (mechanical stress,  $T$ ) จะทำให้สารเกิดค่าการกระจัดทางไฟฟ้า (dielectric displacement,  $D$ ) ส่วนปรากฏการณ์แบบกลับนั้นเมื่อผ่านสนามไฟฟ้า ( $E$ ) เข้าไปจะเกิดแรง หรือเกิดลักษณะความเครียดทางกล (mechanical strain,  $S$ ) ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ดังสมการ

$$D = dT + \epsilon^T E \dots\dots\dots (1)$$

$$S = s^E T + dE \dots\dots\dots (2)$$

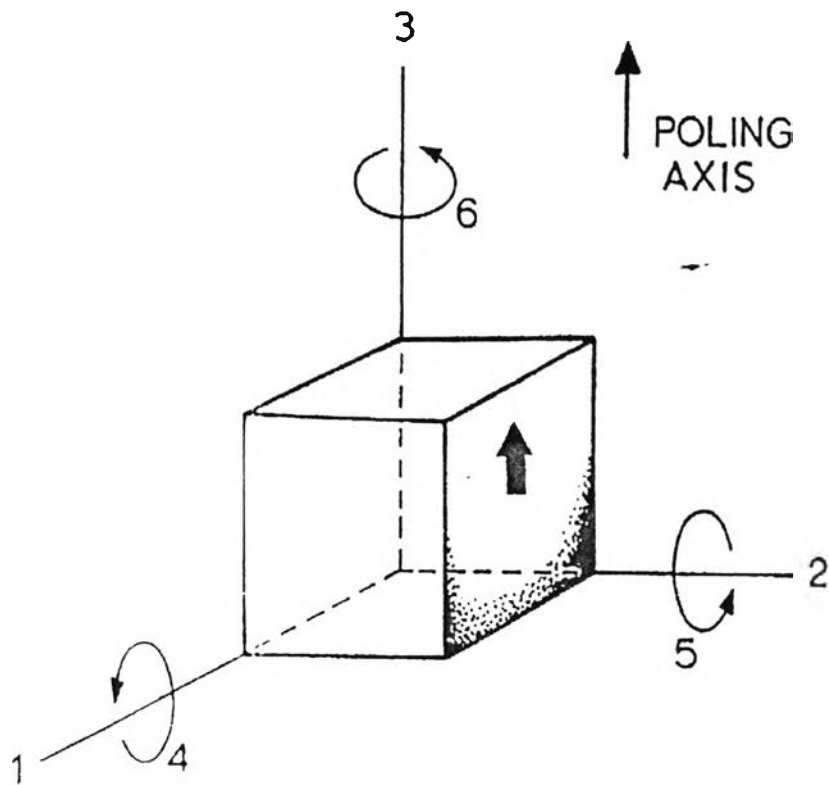
เมื่อ	$d$	คือค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient charge)
	$s^E$	คือค่าความสามารถยืดหยุ่นเชิงกล (mechanical compliance)
	$\epsilon^T$	คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อแรงเค้นคงที่ (dielectric constant permittivity)
	$T$	คือค่าความเค้น (stress)
	$S$	คือค่าความเครียด (strain)

สมการที่ 1 กับ 2 อธิบายถึงคุณสมบัติที่เกิดจากการเรียงทิศทางที่แตกต่างกันของวัสดุ ซึ่งจะไปเชื่อมโยงกับสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก โดยลักษณะทิศทางของผลึกพิจารณาได้จากรูปที่ 2.6 เช่นทิศทางของความเครียดและทิศทางในการโพลาริเซชัน สำหรับทิศทางจะระบุไว้เป็นตัวห้อย เช่นค่าสัมประสิทธิ์  $d_{31}$  แสดงค่าโพลาริเซชันที่เกิดในทิศทางที่ 3 เมื่อแรงกระทำในทิศทางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์  $d_{33}$  คือค่าประจุไฟฟ้าหรือค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทางที่สามเมื่อให้แรงกลในทิศทางที่สามเช่นเดียวกัน โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\text{ปรากฏการแบบตรง} \quad D_3 = d_{33} T_3 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ปรากฏการแบบกลับ} \quad S_3 = d_{33} E_3 \dots\dots\dots (4)$$

ค่า  $d_{33}$  จะมีค่าเท่ากันทั้งสองสมการ โดยจะอยู่ในช่วง  $10^{-12} \text{ C/N}$  สำหรับปรากฏการแบบตรง และมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-12} \text{ m/V}$  สำหรับปรากฏการแบบกลับ



รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางของผลึก [22]

นอกจากค่า  $d_{33}$  แล้วค่าสัมประสิทธิ์วงจรเปิด (open circuit electric field,  $g$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการให้ความต่างศักย์ต่อหน่วยของความเค้นที่ได้รับก็เป็นอีกค่าหนึ่งที่น่าสนใจพิจารณาด้วยค่า  $g$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $d$  ดังสมการ

$$g = \frac{d}{K\epsilon_0} \dots\dots\dots (5)$$

เมื่อ  $K$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant)

$\epsilon_0$  คือค่าสภาพยอม (Permittivity) ของอากาศ มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้า (piezoelectric coupling factor,  $k_p$ ) คือค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานหนึ่งไปเป็นอีกพลังงาน

หนึ่ง เช่นเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นไฟฟ้าเมื่อมีการให้แรงกับสารเพียโซอิเล็กทริกหรือไฟฟ้าเป็นกลเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าซึ่งค่าหาได้จาก

$$\text{สำหรับปรากฏการณ์แบบตรง } k_p = \sqrt{\frac{\text{พลังงานกลที่เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า}}{\text{พลังงานกลที่ให้}}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{สำหรับปรากฏการณ์แบบกลับ } k_p = \sqrt{\frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนเป็นพลังงานกล}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ให้}}} \dots\dots\dots (7)$$

หรือ ค่า  $k_p$  ยังสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการ

$$k_p = \left( \frac{f_u - f_r}{0.395 f_r + 0.547(f_u - f_r)} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

เมื่อ  $f_r$  คือความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นงาน

$f_u$  คือความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ของชิ้นงาน

ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor,  $Q_m$ ) คือค่าที่บอกถึงความสามารถในการส่งผ่านพลังงานระหว่างพลังงานกลและไฟฟ้าหรือค่าที่บอกถึงความสามารถในการสั้นด้วยความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ในวงจรสมมูล (equivalent series circuit) ซึ่งค่าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือส่งผ่านพลังงานได้ดีหรือไม่จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน ค่า  $Q_m$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_m = \frac{f_u^2}{2\pi f_r C Z_r (f_u^2 - f_r^2)} \dots\dots\dots (9)$$

เมื่อ  $Z_r$  คือค่าความต้านทานของชิ้นงานที่ความถี่เรโซแนนซ์

$C$  คือความจุไฟฟ้า



### 2.3 สารประกอบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric materials)

เราสามารถแบ่งชนิดของสารประกอบเพียโซอิเล็กทริกตามลักษณะสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก ได้เป็นสองชนิดคือ

- 1 สารประกอบเพียโซอิเล็กทริกแบบอ่อน (soft piezoelectric materials)  
ลักษณะของสารที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกแบบอ่อนก็คือจะมีอุณหภูมิคูรีหรืออุณหภูมิที่บ่งบอกขอบเขตของการแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกที่ต่ำ โดยทั่วไปจะต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส และมีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก, ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่สูง แต่จะมีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลที่ต่ำ
- 2 สารเพียโซอิเล็กทริกแบบแข็ง (hard piezoelectric materials)  
ลักษณะของสารเพียโซอิเล็กทริกแบบแข็งจะตรงข้ามกับสารเพียโซอิเล็กทริกแบบอ่อน คือจะมีอุณหภูมิคูรี, ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลที่สูง แต่จะมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก, ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ที่ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกทั้งสองแบบแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกแบบแข็งกับแบบอ่อน

สมบัติ	สารเพียโซอิเล็กทริก แบบอ่อน	สารเพียโซอิเล็กทริก แบบแข็ง
ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ )	สูง	ต่ำ
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $K$ )	สูง	ต่ำ
ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า ( $k_p$ )	สูง	ต่ำ
ค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $Z_r$ )	สูง	ต่ำ
ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล ( $Q_m$ )	ต่ำ	สูง
ค่าวงจรรีโซแนนซ์	กว้าง	แคบ

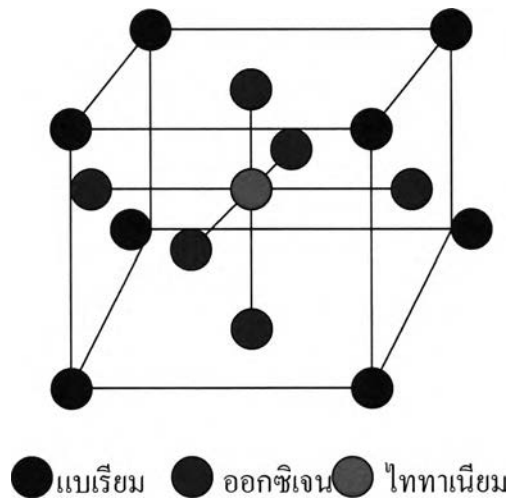
โดยทั่วไปแล้วสารเพียโซอิเล็กทริก PZT จะมีลักษณะสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบอ่อน ซึ่งการที่จะทำให้เปลี่ยนเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกแบบแข็งนั้นสามารถที่จะทำได้โดยการเติมตัวโด๊ป (dopant) เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น โดยสารที่เติมลงไปจะช่วยกระตุ้นการจัดทิศทางใหม่ของโดเมนทำให้สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก ค่า  $k_p$  และ  $Q_m$  มีค่าที่สูงขึ้น ตัวอย่างของสารที่เติม เช่น  $Nb^{+5}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Mn^{+3}$ ,  $Zn^{+2}$  เป็นต้น

2.3.1 สารแบเรียมไททานเนต (barium titanate)  $BaTiO_3$

สารเพียโซอิเล็กทริกที่มีการนำมาพัฒนาเป็นทรานสดิวเซอร์ในช่วงยุคแรกคือสารแบเรียมไททานเนตแต่การนำสารแบเรียมไททานเนตมาประยุกต์ใช้งานมีข้อจำกัดพื้นฐานคืออุณหภูมิคูรี (curie temperature,  $T_c$ ) ของแบเรียมไททานเนตมีค่าต่ำ คือประมาณ 120 องศาเซลเซียส ทำให้ไม่สามารถที่จะใช้งานในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ได้ นอกจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล – ไฟฟ้า มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสารประกอบ PZT โดยมีค่าประมาณ 0.35 ซึ่ง PZT มีค่าประมาณ 0.65

สำหรับข้อดีของสารแบเรียมไททานเนตที่ดีกว่าสารในกลุ่ม PZT เนื่องจากสารในกลุ่ม PZT จะมีตะกั่วซึ่งระเหยได้ง่ายเป็นส่วนประกอบจึงมีความเสถียรน้อยดังนั้นสารแบเรียมไททานเนตจะมีความเสถียรมากกว่า

โครงสร้างของสารแบเรียมไททานเนตนั้น มีลักษณะเป็น โครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะ โครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ของสารของแบเรียม ไททานเนต

พิจารณาจากรูปไอออนของแบเรียม( $Ba^{+2}$ ) จะอยู่ที่มุมทั้งแปดของโครงสร้าง ไอออนของออกซิเจน( $O^{2-}$ ) จะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของของแต่ละด้านและไอออนของไททานเนียม ( $Ti^{+4}$ ) จะอยู่ตรงกึ่งกลางของของโครงสร้าง โดยจะอยู่ในตำแหน่งออกตระฮีดรอล (octahedral site) ซึ่งจะดู

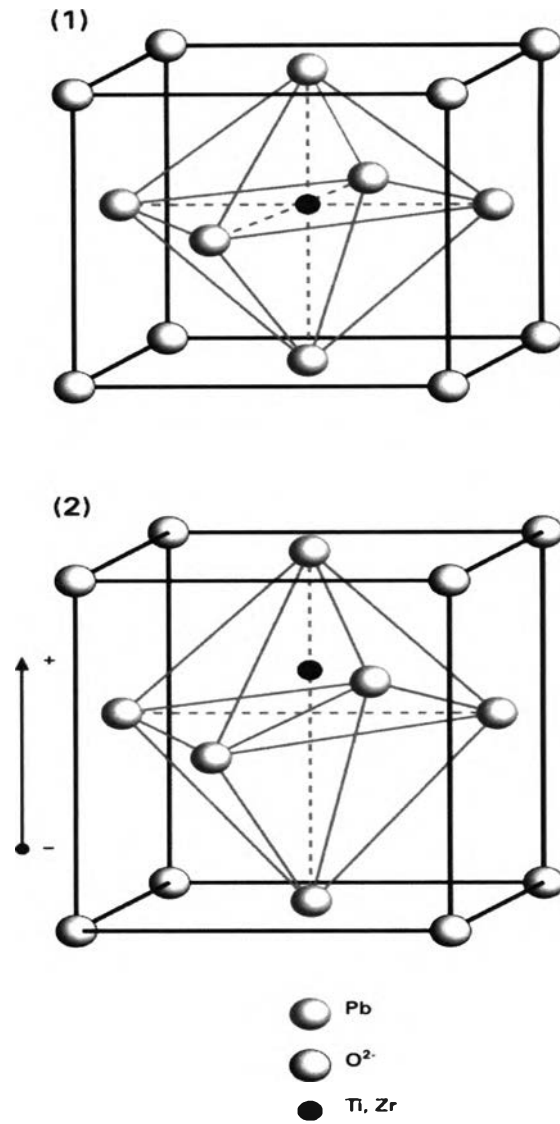
ล้อมรอบด้วยไอออนของออกซิเจนจำนวนหกไอออน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบเรียมไททานेटจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 130 องศาเซลเซียส แบเรียมไททานेटจะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก (cubic) ซึ่งจะมีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริกแต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 130 องศาเซลเซียส จะมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยจะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนทำให้เกิดไดโพลขึ้น และเรียกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนี้ว่าอุณหภูมิคูรี

### 2.3.2 สารเลดเซอร์โคเนตไททานेट ( $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ , PZT)

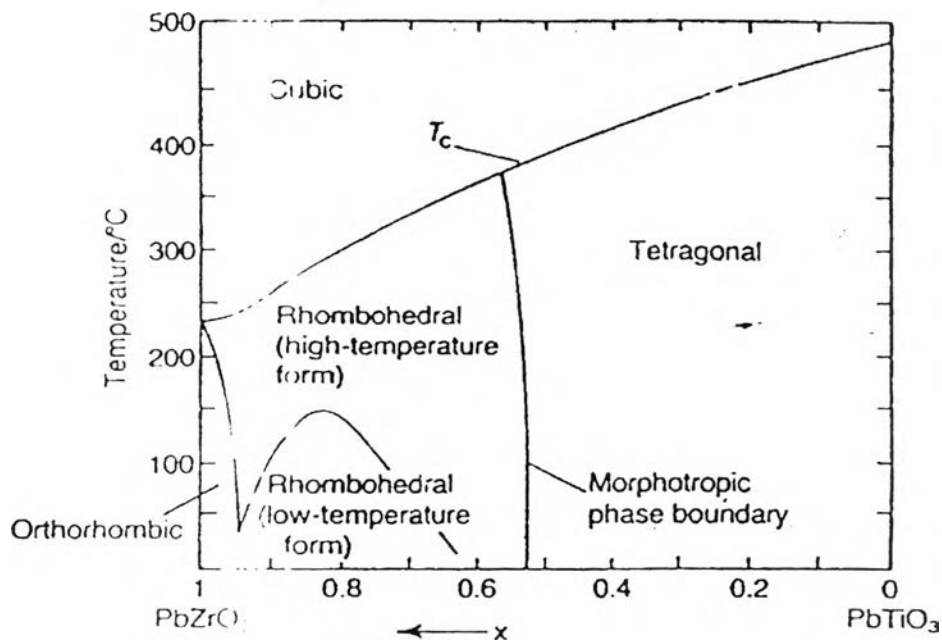
สารประกอบที่มีความโดดเด่นมากที่สุดในเรื่องของการประยุกต์ใช้งานคือสารเลดเซอร์โคเนตไททานेट (PZT) เนื่องจากมีจุดเด่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารแบเรียมไททานेटก็คือจะมีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้า และมีอุณหภูมิคูรีที่สูงกว่าสารแบเรียมไททานेट นอกจากนี้ยังมีช่วงของค่าไดอิเล็กทริกที่กว้างและมีอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่ต่ำกว่าด้วย

เลดเซอร์โคเนตไททานेटเป็นสารที่เกิดจากสารละลายของแข็ง (solid solution) ระหว่างเลดเซอร์โคเนต ( $\text{PbZrO}_3$ ) และเลดไททานेट ( $\text{PbTiO}_3$ ) โดยเกิดจากการแทนที่ไอออนไททานเนียม ( $\text{Ti}^{4+}$ ) ด้วยไอออนเซอร์โคเนียม ( $\text{Zr}^{4+}$ ) ดังรูปที่ 2.8

จากรูปในสถานะปกติไอออนที่ตำแหน่ง B จะไม่อยู่ในลักษณะสมมาตร ดังนั้นเมื่อมีการให้แรงหรือให้สนามไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้เกิดการเลื่อนของไอออนในตำแหน่ง B ทำให้เกิดเป็นลักษณะของไดโพลขึ้น และบริเวณที่มีอัตราส่วนระหว่าง  $\text{PbZrO}_3$  :  $\text{PbTiO}_3$  ประมาณ 0.52 : 0.48 จะเป็นช่วงที่สาร PZT มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่ดีซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 เนื่องจากบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่มีโครงสร้างผลึกเตตระโกนอลและโครงสร้างรอมโบฮีดรอลอยู่ร่วมกันหรือที่เรียกว่าบริเวณมอร์โฟโทรปิกเฟสบาเดอร์รี (morphotropic phase boundary :MPB) โดยจะแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้า ที่สูง เนื่องจากโครงสร้างเตตระโกนอลสามารถที่จะมีทิศทางในการไดโพลที่เรียงตัวไปสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้ 6 ทิศทาง ส่วนโครงสร้างรอมโบฮีดรอลมี 8 ทิศทาง ดังนั้นบริเวณมอร์โฟโทรปิกเฟสบาเดอร์รีจึงมีทิศทางในการจัดเรียงตัวได้ถึง 14 ทิศทาง ทำให้มีโอกาสเกิดขั้วได้ง่าย



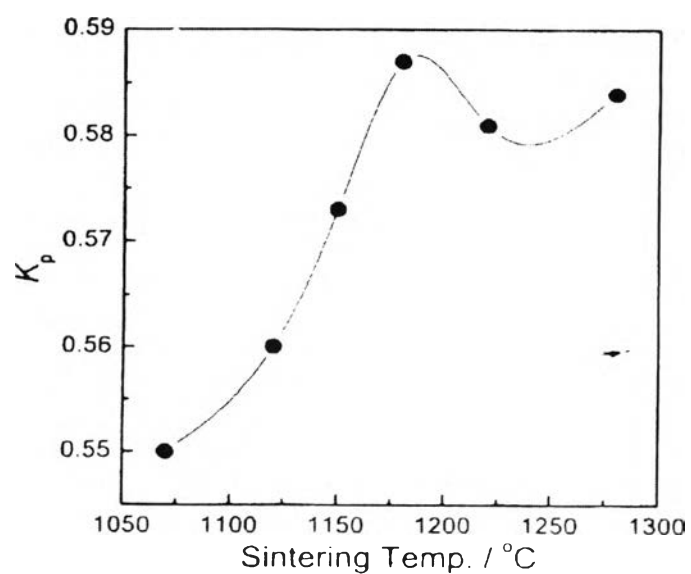
รูปที่ 2. 8 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ของสาร PZT  
 (1) ในสภาวะปกติ (2) ขณะมีการให้แรง [23]



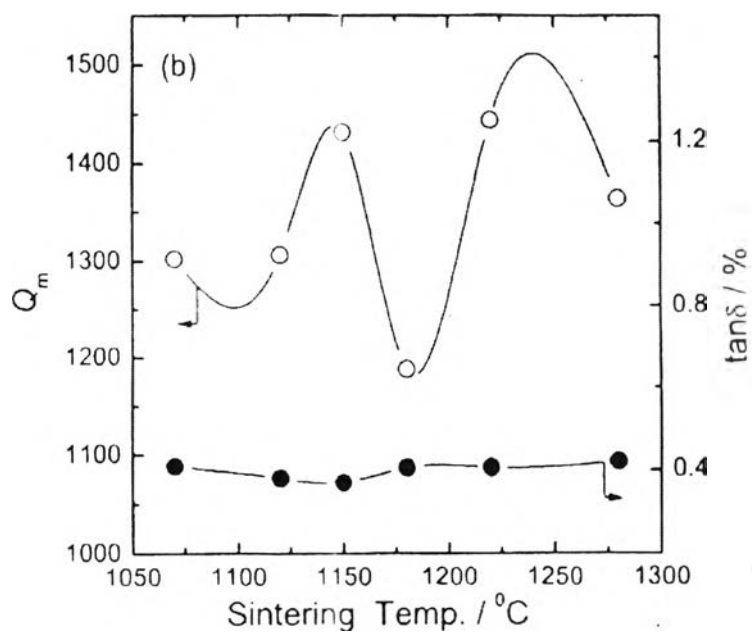
รูปที่ 2.9 แสดงบริเวณที่มีลักษณะของเฟสสองเฟสอยู่ร่วมกันคือ มอร์โฟโทรปิกเฟสบาวาเรีย [23]

### 2.3.3 สารเลดแมงกานีสไนโอเบทเซอร์โคเนทไทนาเนียมออกไซด์ ( $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{PbTiO}_3$ - $\text{PbZrO}_3$ , PMnN - PZT)

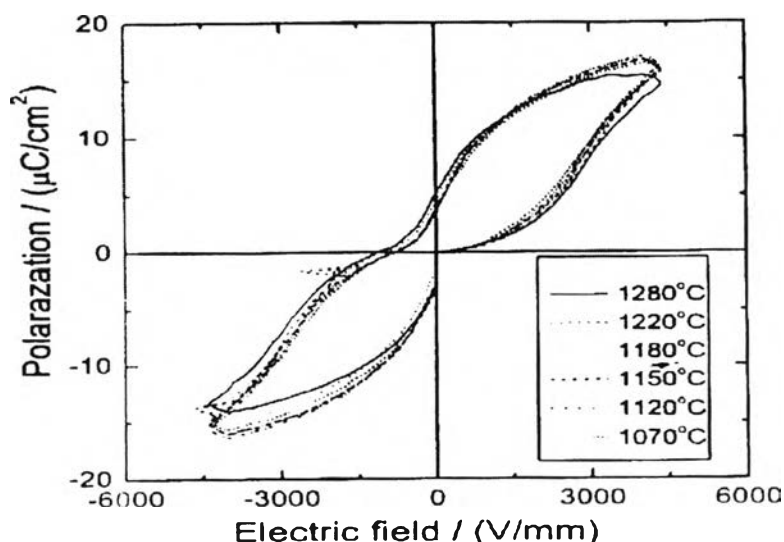
สารเพียโซอิเล็กทริก  $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{PbTiO}_3$ - $\text{PbZrO}_3$  (PMnN-PZT) เป็นกลุ่มของสารที่เกิดจากการนำสารประกอบในกลุ่ม  $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  ซึ่งมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นคือมีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลที่สูงมารวมกับสารประกอบในกลุ่ม  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  (PZT) ซึ่งมีสมบัติเด่นคือมีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้า, ค่าไดอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่สูง ทำให้ได้สารเพียโซอิเล็กทริกที่มีสมบัติที่โดดเด่นคือมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่ดี ซึ่งแสดงดังรูปกราฟที่ 2.10 - 2.12



รูปที่ 2.10 แสดงค่า  $k_p$  ของ PMnN - PZT ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน [24]



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงค่า  $Q^E$  และค่า  $\tan \delta$  ของ PMnN - PZT ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน [24]



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงค่าวงฮิสเทอริซิสของ PMnN – PZT ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน [24]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากลุ่มของสารเซรามิก PMnN – PZT มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้งานทำเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ต้องใช้งานที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูง (high power application) เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าหรือมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากมีค่าที่แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านพลังงานที่แปลงแล้วคือค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลและค่าที่แสดงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลคือค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้าที่สูง สมบัติโดยทั่วไปของสารในกลุ่ม  $Pb(Mn_{1-x}Nb_x)_2O_3-PbTiO_3-PbZrO_3$  (PMnN-PZT) แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของสารในกลุ่ม PMnN – PZT [1-9]

สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก	ค่า
สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล ( $Q_m$ )	1000 - 1700
สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้า ( $k_p$ )	0.50 - 0.55
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $K$ )	600 - 1200
สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ )	230 - 280 pC/N

นอกจากนี้ที่ผ่านมามีความพยายามที่จะปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของสาร PMnN – PZT ให้ดีขึ้นโดยการเติมสารเติมแต่งตัวอื่นเข้าไป พร้อมทั้งปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งทำให้ได้สมบัติเพียโซอิเล็กทริกดังตารางที่ 2.3

นอกจากนี้ที่ผ่านมามีความพยายามที่จะปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของสาร  $PMnN - PZT$  ให้ดีขึ้นโดยการเติมสารเติมแต่งตัวอื่นเข้าไป พร้อมทั้งปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งทำให้ได้สมบัติเพียโซอิเล็กทริกดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของสาร  $PMnN - PZ$  ที่มีการเติมสารเติมแต่ง [1-9]

สารเติมแต่ง	วิธีการสังเคราะห์	$k_p$	$Q_m$
-	columbite	0.57	1950
$CaO - Fe_2O_3$	columbite	0.6	2150
-	Mixed oxide	0.54	1455
NiO	Mixed oxide	0.56	1632
CeO	Mixed oxide	0.55	1792.55
NiO - WO	Mixed oxide	0.5	1866

## 2.4 การเตรียมชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริก

### 2.4.1 การเตรียมผงเซรามิก

โดยทั่วไปการเตรียมผงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมักจะมีวิธีการเตรียมโดยใช้ผงที่ทำจากออกไซด์หลายชนิดมาผสมกันเรียกวิธีนี้ว่าวิธีผสมสารออกไซด์ (mixed - oxide ,MO) ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดและมีความง่ายในการเตรียมสาร สำหรับกระบวนการผสมสารโดยใช้ออกไซด์จะเริ่มจากการชั่งสารออกไซด์แต่ละชนิดหรือองค์ประกอบอื่นๆ เช่นคาร์บอนเนต หรือไนเตรท ซึ่งจะสลายตัวกลายเป็นออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800 - 900 องศาเซลเซียส ให้ได้อัตราส่วนตามที่ต้องการหลังจากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปทำการบดเปียก (wet milling) สำหรับขั้นตอนในการบดเปียกนั้นถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งการใช้เวลาในการบดไม่เพียงพออาจทำให้เกิดผลเสียหายเนื่องจากเกิดความไม่สม่ำเสมอทางเคมีในระดับที่ต้องการหรือถ้าหากใช้เวลาในการบดมากเกินไปอาจจะทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างลูกบดกับอนุภาคของสาร ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของส่วนผสมได้ โดยส่วนใหญ่แล้วลูกบดที่ใช้จะต้องทำจากวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น อะลูมินาหรือเซอร์โคเนียร์ หม้อที่ใช้บดส่วนใหญ่จะทำจากพลาสติก และของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดต้องเป็นของเหลวที่สามารถที่จะระเหยออกไปได้ง่าย เช่นแอลกอฮอล์ สำหรับเวลาในการบดของสารเพียโซอิเล็กทริกนั้นจะอยู่ที่ช่วงประมาณ 24 - 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นผงที่ได้จากการบดจะนำไปเผาแคลไซน์เพื่อให้สารผสมเกิดปฏิกิริยากันซึ่งโดยทั่วไปสารที่มีตะกั่วเป็น



องค์ประกอบมักจะใช้อุณหภูมิในการเผาเคลือบที่อุณหภูมิประมาณ 850 องศาเซลเซียส เนื่องจากถ้าใช้อุณหภูมิในการเคลือบสูงเกินไปจะเกิดการระเหยของตะกั่วซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 880 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านการเคลือบเรียบร้อยแล้วก็จะนำผงเซรามิกที่ได้ไปกรองผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดของอนุภาคตามที่ต้องการก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปต่อไป

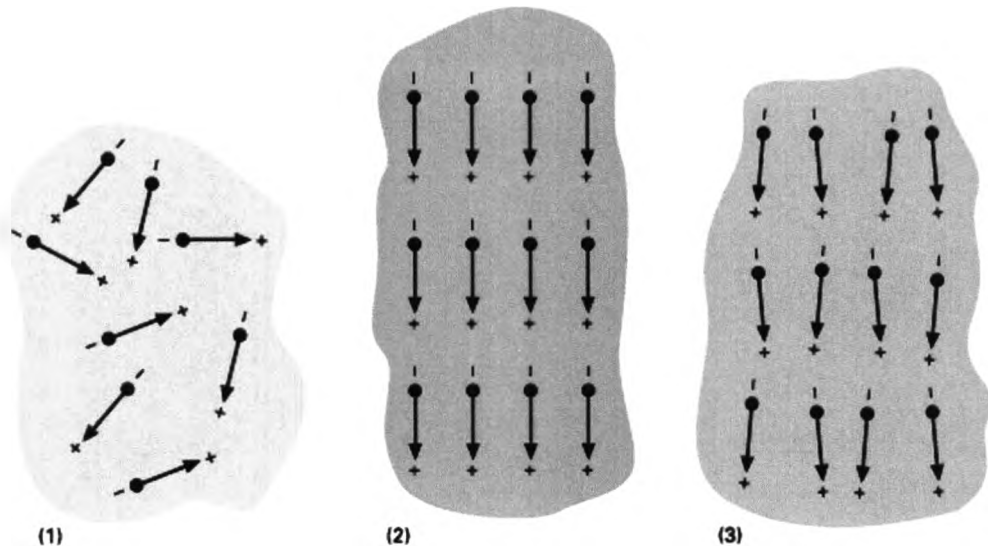
#### 2.4.2 การขึ้นรูป และการเผา

การขึ้นรูปเป็นการเตรียมชิ้นงานจากผงที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมอนุภาคไปขึ้นรูปให้ได้รูปร่างและขนาดของชิ้นงานตามที่ต้องการ สำหรับวิธีการขึ้นรูปที่สะดวกและนิยมที่สุดคือวิธีการขึ้นรูปโดยการอัดแบบไม่ใช้ความร้อน (cold pressing) นอกจากนี้ยังมีวิธีการขึ้นรูปแบบอื่นอีกเช่น การขึ้นรูปแบบเทปคาสติง (tape casting) การขึ้นรูปแบบโรลคอมแพคชัน (roll compaction) การหล่อขึ้นรูป (slip casting) เป็นต้น วิธีในการขึ้นรูปเหล่านี้จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งการที่จะเลือกใช้วิธีใดจะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความซับซ้อนของชิ้นงานรวมทั้งค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตชิ้นงาน

นอกจากวิธีการเตรียมผงและขึ้นรูปแล้ว การเผาผนึกเพื่อให้ชิ้นงานมีความหนาแน่น และไม่มีรูพรุนก็เป็นขั้นตอนที่สำคัญ สำหรับวิธีการเผาชิ้นงานโดยทั่วไปจะใช้วิธีการเผาแบบดั้งเดิม (conventional sintering) เนื่องจากเป็นวิธีการเผาที่ง่าย และมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำโดยการเผาจะเผาในบรรยากาศที่ปิดเพื่อป้องกันการระเหยของตะกั่วซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ หลังจากชิ้นงานได้ผ่านการเผาแล้วขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกคือการนำชิ้นงานมาตัดเป็นแผ่นเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ หลังจากนั้นก็นำชิ้นงานไปขัดและทำขั้วอิเล็กโทรดเพื่อที่จะนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกก่อนที่จะมีการนำชิ้นงานไปใช้งานต่อไป

#### 2.4.3 กระบวนการในการทำให้เกิดการเรียงตัวของไดโพลในทิศทางเดียวกัน

เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการในการขึ้นรูปแล้วทิศทางในการเรียงตัวของไดโพลยังมีทิศทางไม่แน่นอนดังนั้นแล้วก่อนนำชิ้นงานไปทดสอบหรือนำไปใช้งานจะต้องนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการจัดเรียงขั้ว (poling process) เพื่อให้ทิศทางของไดโพลเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน โดยการนำชิ้นงานไปให้สนามไฟฟ้าในอ่างน้ำมันซิลิกอลที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งลักษณะทิศทางของไดโพลของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังจากผ่านกระบวนการจัดเรียงขั้วแล้วเป็นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะทิศทางการเรียงตัวของชิ้นงาน [23]

(1) ก่อนการโพล (2) ขณะโพล (3) หลังการโพล

## 2.5 การประยุกต์และการใช้งานสารเพียโซอิเล็กทริก

ลักษณะการใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถที่จะแบ่งเป็น 4 ประเภทได้แก่

- 1 เครื่องมือควบคุมความถี่ (frequency control devices) ซึ่งจะอาศัยหลักการสั่น โดยลักษณะการสั่นจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของสารเพียโซอิเล็กทริก ผลของความถี่ที่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของสารตัวนั้นจะทำให้สารเกิดการสั่นอย่างแรง ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถที่จะกรองคลื่นบริเวณพื้นผิว (surface acoustic) ในบางความถี่ได้
- 2 ทรานสดิวเซอร์ (transducer) เป็นลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้หลักการในการแปลงสัญญาณจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งของสารเพียโซอิเล็กทริก ตัวอย่างเช่น ไฮโดรโฟนซึ่งสารเพียโซอิเล็กทริกจะทำหน้าที่รับคลื่นเสียงหรือเก็บสัญญาณ โดยการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้า
- 3 เซ็นเซอร์ (sensor) หลักการทำงานคือทำให้เกิดความต่างศักย์ของสารเพียโซอิเล็กทริกซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นและจะส่งคลื่นเหนือเสียงออกไป ตัวอย่างของแผ่นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้งานเป็นตัวเซนเซอร์ เช่น เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่ติดไว้ที่ท้ายรถยนต์เวลาารถถอยจะเกิดความต่างศักย์ของสารเพียโซอิเล็กทริกซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นออกไปและเมื่อคลื่นวิ่งชนวัตถุด้านหลังรถจะสะท้อนกลับผ่านสารเพียโซอิเล็กทริกที่จะแปลงสัญญาณเป็นแสงหรือสัญญาณเสียงอีกครั้ง
- 4 แอคชูเอเตอร์ (actuator) ใช้หลักการของการที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและรูปร่างของวัสดุนั้นภายใต้สนามไฟฟ้าหรือ

ความเค้นที่วัสดุได้รับเครื่องกำเนิดที่ความต่างศักย์สูง (high voltage generators) เป็นลักษณะของสารเพียโซอิเล็กทริกที่ต้องใช้งานที่ความต่างศักย์สูง เช่น อุลตราโซนิคมอเตอร์ (ultrasonic motor) สำหรับหลักการทำงานของอูลตราโซนิคมอเตอร์นั้นใช้หลักการของการรวมคลื่นนิ่งสองคลื่นที่มีเฟสแตกต่างกัน 90 องศา เข้าด้วยกันในเวลาและตำแหน่งเดียวกัน โดยลักษณะการหมุนของมอเตอร์จะหมุนได้สองทางทั้งตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาโดยใช้หลักการยึดหยุ่นของคลื่นที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นของแข็งซึ่งถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นโดยวงแหวนบางๆของสารเพียโซอิเล็กทริกแผ่นวงแหวนบางๆของสารเพียโซอิเล็กทริกที่ผ่านการโพลในทิศทางขึ้นลงจะถูกนำมายึดติดกับแผ่นวงแหวนทองเหลืองที่มีคุณสมบัติในการยึดหยุ่นได้เป็นอย่างดีแล้วนำมาประกอบเป็นมอเตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเพียโซอิเล็กทริกคือทำให้ด้านที่ป้อนพลังงานของหม้อแปลงไฟฟ้ามีทิศทางของขั้วประจุ (polarization direction) ตั้งอยู่ในทิศทางตามความหนาของชิ้นงาน ในขณะที่ทางด้านจ่ายพลังงานทิศทางของขั้วประจุจะอยู่ในทิศขนานกับชิ้นงานเมื่อมีการให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของด้านป้อนพลังงาน ชิ้นงานจะเกิดการสั่น พลังงานกลที่เกิดจากการสั่นดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปยังด้านจ่ายพลังงาน และจะถูกแปลงกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งเป็นต้น

## 2.6 การลดอุณหภูมิในการซินเทอ์สารเพียโซอิเล็กทริก

เนื่องจากอุณหภูมิในการซินเทอ์สารเพียโซอิเล็กทริกที่สูงคือประมาณ 1250 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดปัญหาตามมาได้แก่

- 1 สารเพียโซอิเล็กทริกส่วนใหญ่จะประกอบด้วยตะกั่ว (PbO) ที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ ทำให้เกิดปัญหาในขณะซินเทอ์ที่อุณหภูมิที่สูงคือเกิดการระเหยของตะกั่ว ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราส่วนของสารประกอบที่ได้เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปด้วย
- 2 การระเหยของตะกั่วก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม
- 3 การใช้อุณหภูมิในการซินเทอ์ที่สูงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต

ดังนั้นจึงได้มีการพยายามที่จะลดอุณหภูมิซินเทอ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกให้ต่ำลง โดยสามารถที่จะทำได้ 3 วิธีคือ [15]

- 1 โดยการเติมออกไซด์ของโลหะที่มีขนาดของไอออนใกล้เคียงกับขนาดของไอออนที่ตำแหน่ง B ลงไปในโครงสร้าง ABO<sub>3</sub> เพื่อแทนที่ตรงตำแหน่ง B ของโครงสร้างทำให้

เกิดช่องว่าง (vacancy defect) ในโครงสร้างของชิ้นงาน ส่งผลให้อัตราในการแพร่ (diffusion rate) ขณะซินเทอร์เกิดได้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง

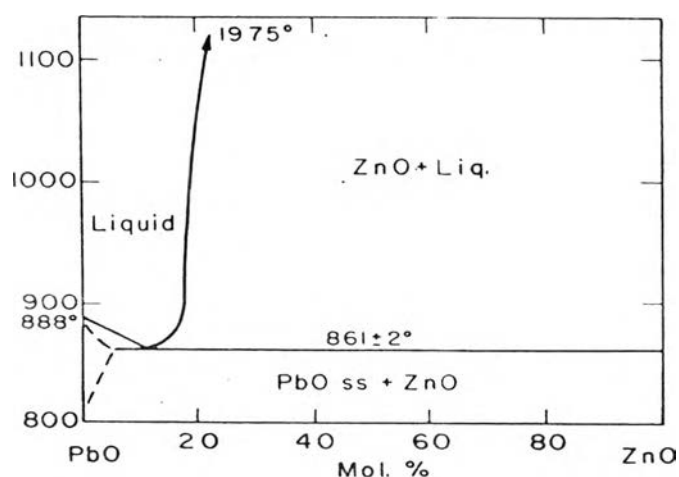
- 2 โดยการเติมออกไซด์ของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำลงไปเพื่อทำให้เกิดเฟสของเหลว ในขณะที่ซินเทอร์ ทำให้สามารถที่จะใช้อุณหภูมิซินเทอร์ที่ต่ำลง แต่ปัญหาส่วนใหญ่ที่ตามมาคือออกไซด์ของโลหะจุดหลอมเหลวต่ำเมื่อเติมลงไปแล้วส่งผลทำให้สมบัติเพียโซอิเล็กทริกลดลง
- 3 ทำอนุภาคของชิ้นงานให้มีขนาดเล็กโดยใช้วิธีโซเจล (sol – gel) หรือใช้วิธีอัดพร้อมกับให้ความร้อน (hot – pressing) แต่ทั้งสองวิธีนี้เป็นกระบวนการที่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

## 2.7 สารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริก

สารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์คือสารที่เติมลงไปเพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ให้ต่ำลง ซึ่งมักจะใช้สารประกอบของโลหะออกไซด์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำลงไป หรืออาจจะเติมสารประกอบโลหะออกไซด์ที่มีขนาดรัศมีไอออนใกล้เคียงกับสารประกอบเพียโซอิเล็กทริกเพื่อให้เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งต่างๆ ทำให้เกิดช่องว่างและทำให้อัตราการแพร่ของอะตอมเร็วขึ้นส่งผลให้ซินเทอร์ชิ้นงานได้เร็วขึ้นตามไปด้วย

### 2.7.1 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นออกไซด์ของโลหะที่มีลักษณะเฉพาะคือที่มีจุดหลอมเหลวสูง (มากกว่า 1900 องศาเซลเซียส) แต่เมื่อรวมตัวกับสารประกอบที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบมันสามารถที่จะลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวลงมาได้ที่อุณหภูมิประมาณ 850 องศาเซลเซียส โดยเฟสไดอะแกรมของซิงค์ออกไซด์กับตะกั่วเป็นดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงเฟสไดอะแกรมของตะกั่วกับซิงค์ออกไซด์ [25]

โดยเมื่อพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมจะเห็นว่าที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่ำๆจะเกิดเป็นลักษณะเฟสของเหลว

ลักษณะพิเศษของซิงค์ออกไซด์อีกอย่างหนึ่งคือมีขนาดของรัศมีไอออน (ionic radius) ของ  $Zn^{+2}$  ( $0.74 \text{ \AA}$ ) ใกล้เคียงกับรัศมีไอออนที่ตำแหน่ง  $B^{+4}$  ของสารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเพอร์รอฟสไกต์หรือ  $ABO_3$  เช่น  $Zr^{+4}$  ( $0.74 \text{ \AA}$ ),  $Nb^{+5}$  ( $0.69 \text{ \AA}$ ) ทำให้สามารถที่จะเข้าไปแทนที่สารเหล่านี้ที่ตำแหน่ง B ได้ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงผลของการลดอุณหภูมิของสารเพียโซอิเล็กทริกในกลุ่ม PZT โดยการใส่ซิงค์ออกไซด์เติมลงไปเพื่อให้เข้าไปแทนที่ในตำแหน่ง  $B^{+4}$  ของโครงสร้างซึ่งส่งผลให้เกิดช่องว่าง (vacancy defect) ขึ้นในชิ้นงานทำให้ซินเทอร์ได้ที่อุณหภูมิต่ำลง

### 2.7.2 ลิเทียมออกไซด์ ( $Li_2O$ )

ลิเทียมออกไซด์ ( $Li_2O$ ) เป็นสารที่มีสมบัติเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สารเซรามิก โดยมีสมบัติทางฟิสิกส์คือมีความถ่วงจำเพาะ 2.01 จุดหลอมเหลวสูงกว่า 1700 องศาเซลเซียส มีแร่จากธรรมชาติที่มีองค์ประกอบทางเคมีของลิเทียมออกไซด์คือเลพิโดไลต์ (lepidolite) เพตาไลต์ (petalite) สโปดิวมิน (spodumene) และแอมบลิโกไนต์ (amblygonite) โดยแร่ทุกชนิดที่กล่าวมาจะมีลิเทียมออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 10 ทำให้ลิเทียมออกไซด์เป็นสารที่มีราคาแพง

ลิเทียมออกไซด์ที่นำมาใช้ในงานเซรามิกจะช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมตัวและลดความพรุนตัวของเนื้อเซรามิกพอร์สเลนได้เป็นอย่างดี แต่การใช้ลิเทียมออกไซด์ไม่ควรเกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเพราะจะมีผลต่อการหดและการขยายตัวของชิ้นงานเซรามิก นอกจากนี้เมื่อเติมลิเทียมออกไซด์ลงไปในสารเซรามิกที่มีส่วนผสมของเซอร์โคเนียและไททานเนียมจะทำให้เนื้อเซรามิกเกาะตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม

สำหรับในการวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลของซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปเพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ โดยที่ผ่านมามีการศึกษาหาสารที่ช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์รวมทั้งปริมาณที่เหมาะสมที่เติมลงไปแล้วสามารถที่จะซินเทอร์ได้ที่อุณหภูมิต่ำลงโดยที่สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลง สารที่มักจะใช้เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงสารที่ใช้ลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ และอุณหภูมิที่ซินเทอร์ได้ โดยที่สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลง [10-18]

สารเพียโซอิเล็กทริก	สารช่วยลดอุณหภูมิ	อุณหภูมิที่ซินเทอร์ ( $^{\circ}\text{C}$ )
PZT	$\text{Li}_2\text{O} - \text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{CdO}$	960
PNS - PZT	$\text{V}_2\text{O}_5$	975
PNN - PZT	$\text{LiBiO}_2$	800
PZT	$\text{LiBiO}_2 - \text{CuO}$	900
PNN - PZT	$\text{ZnO}$	950
PNN - PZT	$\text{ZnO} - \text{CuO}$	900
PZT	$\text{ZnO} - \text{Li}_2\text{CO}_3$	1100

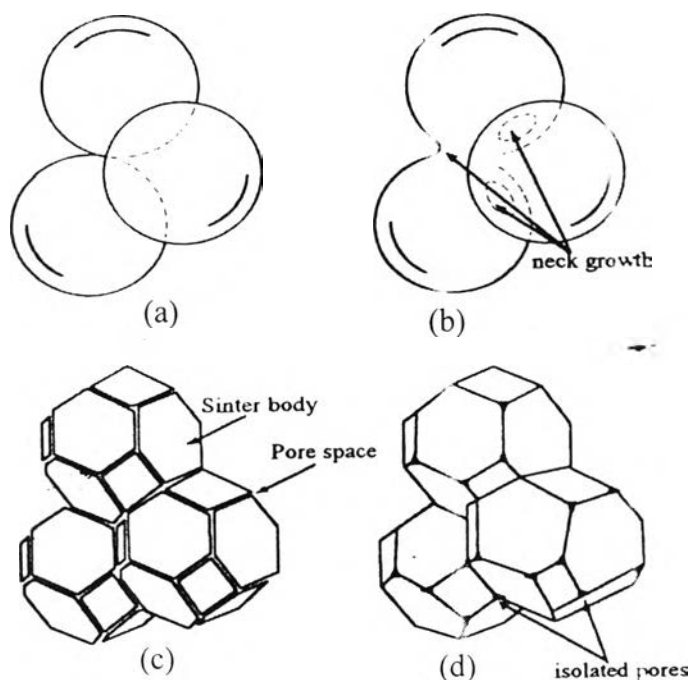
## 2.8 การซินเทอร์ (sintering)

การซินเทอร์ (sintering) คือกระบวนการในการเผาผนึกเพื่อให้อนุภาคของวัสดุคืบหลอมเป็นเนื้อเดียวกันทำให้เกิดพันธะยึดเหนี่ยวต่อกันซึ่งการซินเทอร์นั้นเป็นกระบวนการที่สำคัญที่จะช่วยกำหนดสมบัติของสาร

สำหรับกลไกในการเกิดซินเทอร์ของสารแบ่งได้เป็นสามขั้นตอนคือ

- 1 ขั้นเริ่มต้น (initial stage) ในขั้นตอนนี้อนุภาคจะเริ่มขยับตัวเพื่อให้มีจุดสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่รอบๆข้างให้มากที่สุด หลังจากนั้นก็จะเริ่มเกิดรอยต่อระหว่างอนุภาค (neck)
- 2 ขั้นตอนกลาง (intermediate stage) ในขั้นตอนนี้จะมีการโตขึ้นของรอยต่อระหว่างอนุภาคทำให้รูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคลดลงซึ่งงานเริ่มหดตัว ในขณะเดียวกันจุดศูนย์กลางของอนุภาคก็จะเริ่มเคลื่อนเข้าหากัน
- 3 ขั้นตอนสุดท้าย (final stage) ขั้นตอนนี้จะเริ่มต้นจากการที่รูพรุนเริ่มเคลื่อนที่ออกไปจากชิ้นงาน และระบบของชิ้นงานก็จะมีการลดพลังงานพื้นผิว (surface energy) ลง โดยลักษณะของเกรนที่มีขนาดเล็กจะโดนเกรนที่มีขนาดใหญ่กลืนเพื่อเป็นการลดพลังงานพื้นผิวดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานมีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น

โดยขั้นตอนในการเกิดกระบวนการซินเทอร์แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงขั้นตอนในการเกิดกระบวนการซินเทอร์ (a) ขั้นตอนเริ่มต้น (b) และ (c) ขั้นตอนกลาง (d) ขั้นตอนสุดท้าย [26]

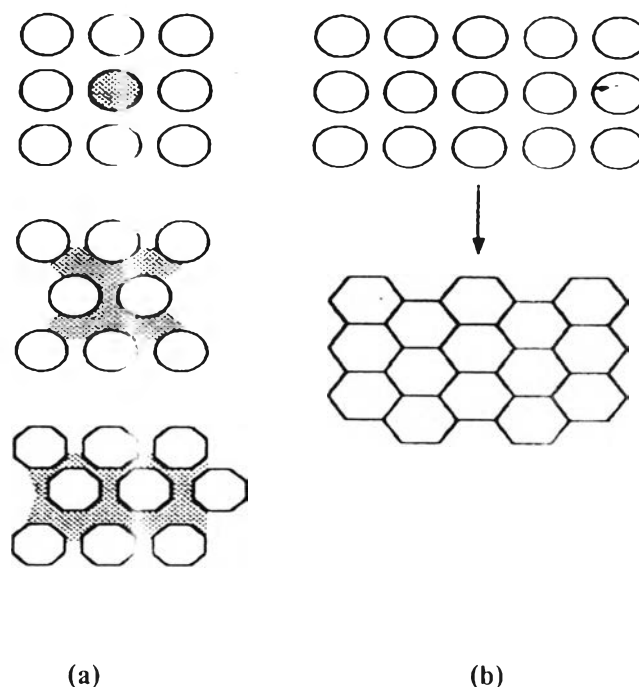
สามารถที่จะจำแนกชนิดของการซินเทอร์ได้เป็นสองชนิดคือ

#### 2.8.1 การเกิดเฟสของเหลวขณะซินเทอร์ (liquid phase sintering)

การเกิดเฟสของเหลวขณะซินเทอร์ (liquid phase sintering) คือลักษณะของการซินเทอร์ที่มีเนื้อสารบางส่วนหรือทั้งหมดอยู่ในสภาพของเหลวซึ่งลักษณะการเกิดเฟสของเหลวในขณะซินเทอร์เป็นกลไกที่สำคัญในการซินเทอร์สารเนื่องจากขณะเกิดเฟสของเหลวในขณะซินเทอร์จะทำให้ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคเกิดได้ง่ายขึ้น และนอกจากนั้นยังทำให้กลไกในการเคลื่อนที่เข้าหากัน (diffusion) เกิดได้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นแล้วข้อดีของการเกิดเฟสของเหลวในขณะซินเทอร์ก็คือสามารถที่จะช่วยการซินเทอร์ชิ้นงานให้เกิดได้เร็วขึ้นและใช้อุณหภูมิในการซินเทอร์ที่ต่ำลง ในกระบวนการเกิดเฟสของเหลวขณะซินเทอร์นั้นมี 3 กระบวนการ ได้แก่

- 1 การฟอร์มตัวของของเหลว (liquid formation) คือการเกิดเฟสของของเหลวในระหว่างกระบวนการซินเทอร์
- 2 การเรียงตัวกันของอนุภาค (particle rearrangement) เฟสของเหลวที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่หนึ่งจะช่วยทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้อนุภาคสามารถที่จะจัดเรียงตัวใหม่ได้อย่างรวดเร็วขึ้น
- 3 การตกผลึกของสารละลาย (solution reprecipitation) เป็นขั้นตอนสุดท้าย

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเกิดเฟสของเหลวขณะซินเทอร์กับการเกิดเฟสของแข็ง แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการซินเทอร์แบบ Liquid phase sintering (a) กับ Solid state sintering (b) [26]

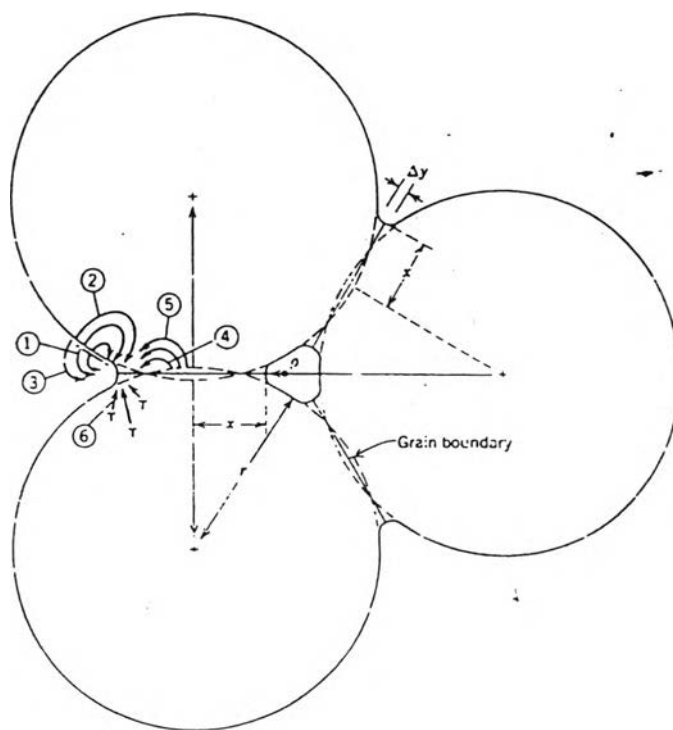
### 2.8.2 การเกิดเฟสของแข็งขณะซินเทอร์ (solid state sintering )

คือกระบวนการในการซินเทอร์สารที่มีลักษณะการเกิดเป็นเฟสของแข็งอย่างเดียวโดยจะเกิดจากการที่อนุภาคเกิดการแพร่ (diffusion) ในบริเวณพื้นผิวของมันเองซึ่งจะเกิดจากความแตกต่างของพลังงานที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาค การเกิดเฟสของแข็งมีขั้นตอนดังนี้

- 1 การแพร่ที่บริเวณพื้นผิว (surface diffusion) โดยอะตอมจะแพร่จากบริเวณพื้นผิวไปยังรอยต่อ (neck) ของอนุภาค
- 2 การแพร่ของแลตติซ (lattice diffusion) อะตอมจะแพร่จากแลตติซไปยังรอยต่อของอนุภาค
- 3 การระเหย (vapor transportation) อะตอมจะเกิดการระเหยจากพื้นผิวไปยังรอยต่อของอนุภาค
- 4 การแพร่บริเวณขอบเกรน (boundary diffusion) อะตอมจะแพร่จากบริเวณขอบเกรนไปยังรอยต่อของอนุภาค
- 5 และ 6 การแพร่ของแลตติซเหมือนกรณีข้อสอง



โดยขั้นตอนที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงขั้นตอนการเกิด Solid state sintering [27]

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการซินเทอร์แบบการเกิดของเหลวในขณะซินเทอร์และการซินเทอร์แบบการเกิดของแข็ง ได้ผลดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบลักษณะการซินเทอร์แบบเกิดเฟสของแข็งและเฟสของเหลว  
ในขณะซินเทอร์

ลักษณะเฉพาะ	การซินเทอร์แบบเกิดเฟส ของแข็ง	การซินเทอร์แบบเกิดเฟส ของเหลว
เวลาที่ใช้ในการซินเทอร์	มาก	น้อย
อุณหภูมิที่ใช้	สูง	ต่ำ
ความหนาแน่น	น้อย	มาก
การหดตัว	น้อย	มาก
สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน	ไม่เปลี่ยน	เปลี่ยนแปลง
สมบัติทางกลของชิ้นงาน	ไม่เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง

### 2.8.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการซินเทอร์

- 1 Green density ยิ่ง green density สูงเท่าไรจะยิ่งทำให้เกิดการซินเทอร์ได้ดียิ่งขึ้น  
เนื่องจากอนุภาคจะอยู่ใกล้ชิดกันมากทำให้มีช่องว่าง (pore) น้อย
- 2 ความเป็นเนื้อเดียวกันของสาร (uniformity of green microstructure) การที่ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันจะทำให้กระบวนการซินเทอร์เกิดได้ดีเนื่องจากไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น
- 3 รูปร่างของอนุภาค (particle shape) ถ้ารูปร่างของอนุภาคมีลักษณะแบนหรือเป็นแท่งยาวโอกาสที่อนุภาคจะเกาะติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบจะมีมากขึ้นซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ทำให้ยากต่อการซินเทอร์
- 4 ขนาดของอนุภาค และการกระจายตัว (particle size and particle size distribution) ขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวมีผลต่อการซินเทอร์เนื่องจากถ้าอนุภาคมีขนาดเดียวกันหมดจะทำให้ความหนาแน่นในการเกาะตัว (packing density) ต่ำทำให้ยากต่อการซินเทอร์ แต่ถ้าขนาดของอนุภาคมีหลายขนาดจะทำให้ซินเทอร์ได้ง่ายกว่าเนื่องจากอนุภาคมีการเกาะตัวกันได้ดี
- 5 บรรยากาศในการซินเทอร์ (atmosphere effect) บรรยากาศในการซินเทอร์จะมีผลต่อการเกิดการซินเทอร์ เนื่องจากการซินเทอร์ในบางบรรยากาศจะเกิดความผิดปกติแบบช่องว่างในชิ้นงานทำให้การแพร่ของอะตอมเกิดได้เร็วขึ้นซึ่งจะส่งผลทำให้กระบวนการซินเทอร์เกิดได้เร็วขึ้นตามไปด้วย

- 6 สิ่งปนเปื้อน (impurity) มีผลต่อการเกิดกระบวนการซินเทอร์ดังนี้
- ใช้เป็นสารช่วยซินเทอร์ โดยสารที่เติมลงไปจะไปช่วยให้เกิดเฟสของเหลว ซึ่งจะทำให้กระบวนการเกิดได้ง่าย แต่จะส่งผลกระทบต่อสมบัติของชิ้นงานถ้าเติมมากเกินไป
  - ใช้ยับยั้งการเกาะตัวกันของอนุภาค จะทำให้อะตอมเกิดการแพร่เข้าหากันได้ดีขึ้น
  - ใช้ยับยั้งในการโตของเกรน เนื่องจากถ้าขนาดของเกรน โตเร็วไปจะส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน
  - ใช้เป็นสารช่วยซินเทอร์เพื่อช่วยให้เกิดการแพร่ได้เร็วขึ้น สารที่เติมลงไปบางตัวจะไปทำให้เกิดความผิดปกติในชิ้นงานเช่นเกิดเป็นช่องว่าง (vacancy defect) ซึ่งส่งผลให้การแพร่ของไอออนในชิ้นงานเกิดได้เร็วขึ้นทำให้กระบวนการซินเทอร์เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำลงได้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

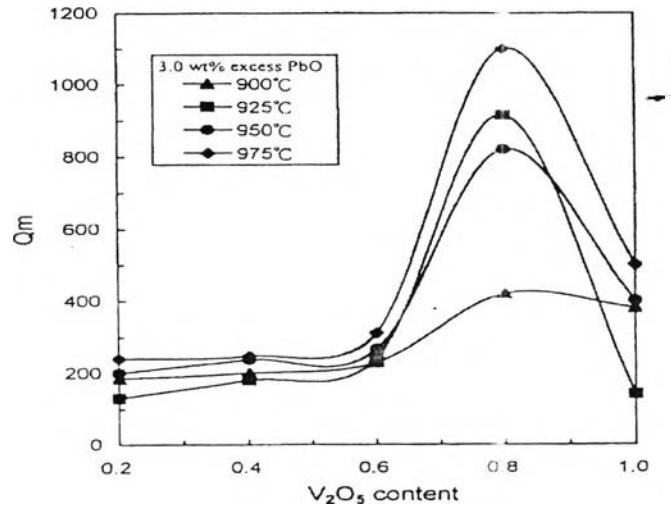
Xiaoxing Wang และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาผลของการลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สาร PZT โดยการเติม  $\text{CdCO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  และ  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  จากผลการวิจัยเขาพบว่าสารที่เติมลงไปทุกตัวสามารถที่จะช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ได้และมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกแสดงดังตารางที่ 2.5 เนื่องจากเกิดเฟสของเหลวในขณะซินเทอร์ แต่อย่างไรก็ตามสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงานที่ได้มีค่าต่ำกว่าเดิม และยังพบว่าเมื่อเติมสารในกลุ่ม  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{CdO}$  ทำให้สามารถที่จะลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ชิ้นงานลงมาได้ที่อุณหภูมิ 960 องศาเซลเซียส โดยมีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกใกล้เคียงกับการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส และสารทุกตัวที่เติมลงไปทำให้ขนาดเกรนของชิ้นงานโตขึ้นทั้งหมด

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงาน PZT ที่เติมสารช่วยลดอุณหภูมิ

ตัวเติม	จำนวน (Wt %)	อุณหภูมิซินเทอร์ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\%k_p$	$K$	$\% \tan \zeta$
-	-	1250	68	2550	1.65
$\text{CdCO}_3$	1.0	1150	62	2000	1.65
$\text{CdCO}_3$	2.5	1100	63	2260	1.75
$\text{CdCO}_3$	5.0	980	58	2250	1.85
$\text{Li}_2\text{CO}_3$	0.1	1150	69	2250	2.20
$\text{Li}_2\text{CO}_3$	0.3	1100	68	2570	1.80
$\text{Bi}_2\text{O}_3$	1.0	1150	58	1850	2.00
$\text{Bi}_2\text{O}_3$	3.0	1100	46	1600	2.10
$\text{V}_2\text{O}_5$	0.5	1150	31	1400	1.60
$\text{V}_2\text{O}_5$	2.0	1250	24	900	1.45

Moo-Chin Wang และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการเติม  $\text{V}_2\text{O}_5$  และเติม PbO เกินลงไปในสารในกลุ่ม  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Sb}_x)_3\text{O}_9 - \text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  (PNS - PZT) จากผลการวิจัยเขาพบว่าเมื่อเติม  $\text{V}_2\text{O}_5$  ลงไปในปริมาณ 0.8 % โดยน้ำหนัก และเติม PbO เกิน 3% โดยน้ำหนักสามารถที่จะลด

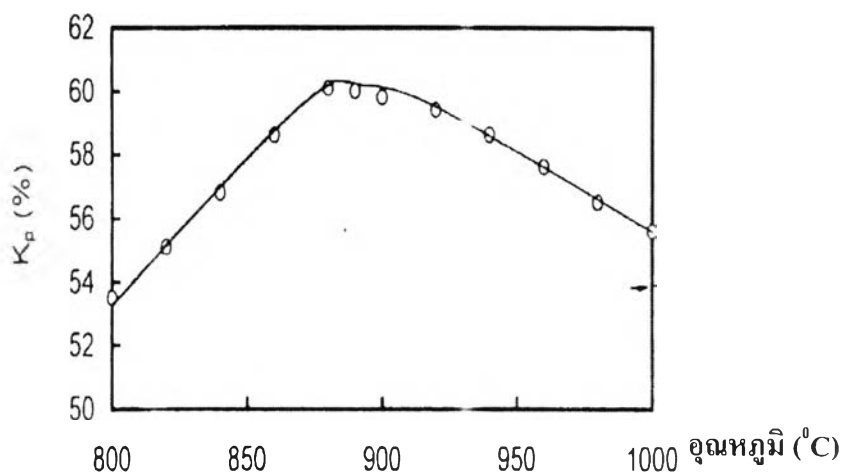
อุณหภูมิซินเทอร์ซิงงานลงมาได้ที่อุณหภูมิ 975 องศาเซลเซียส โดยมีค่า  $Q_m$  แสดงดังรูปที่ 2.18 สาเหตุเนื่องจาก  $V_2O_5$  ที่เติมลงไปไปช่วยให้เกิดเฟสของเหลวในขณะซินเทอร์ โดยซินงานเพียงโซอิเล็กทริกที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor  $Q_m$ ), มากที่สุดคือ 1100



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ  $V_2O_5$  กับค่า  $Q_m$  ของซินงาน PNS-PZT ที่ได้จากการศึกษาของ Moo-Chin Wang และคณะ [11]

TaKaShi Hayashi และคณะ [12] ได้ทำการศึกษถึงผลของการลดอุณหภูมิในการเผาซินเทอร์สารในกลุ่ม  $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - Pb(Zr,Ti)O_3$  (PZT) โดยการเติม  $LiBiO_2$  ลงไป 1% โดยน้ำหนัก จากผลการวิจัยเขาพบว่าสามารถที่จะลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สารในกลุ่มนี้ลงมาได้ที่อุณหภูมิต่ำคือ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจาก  $LiBiO_2$  ที่เติมลงไปทำให้เกิดลักษณะเฟสของเหลวขณะซินเทอร์ และยังพบอีกว่าสารช่วยซินเทอร์ที่เติมลงไปไม่ได้ทำให้ขนาดเกรนของซินงานโตขึ้นแต่อย่างไร โดยสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของซินงานที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิซินเทอร์ปกติเล็กน้อย

X.X Wang และคณะ [13] ได้ทำการศึกษถึงผลของการลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริกในกลุ่ม PZT โดยการเติม  $LiBiO_2$  1% และ  $CuO$  0.6% โดยน้ำหนักพบว่าสารที่เติมลงไปช่วยทำให้ซินงานมีความหนาแน่นสูงขึ้นที่อุณหภูมิซินเทอร์ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดเฟสของเหลวขึ้น และยังพบว่าสารที่เติมลงไปยังไปช่วยให้ขนาดของเกรนของซินงานโตขึ้น โดยค่า  $k_p$  มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิซินเทอร์ประมาณ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.19

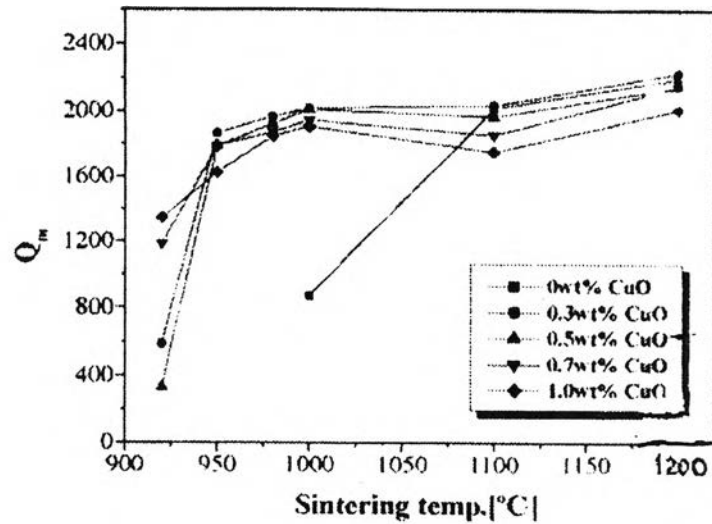


รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $k_p$  กับอุณหภูมิซินเทอร์ของชิ้นงาน PZT ที่ได้จากการศึกษาของ X.X Wang และคณะ [13]

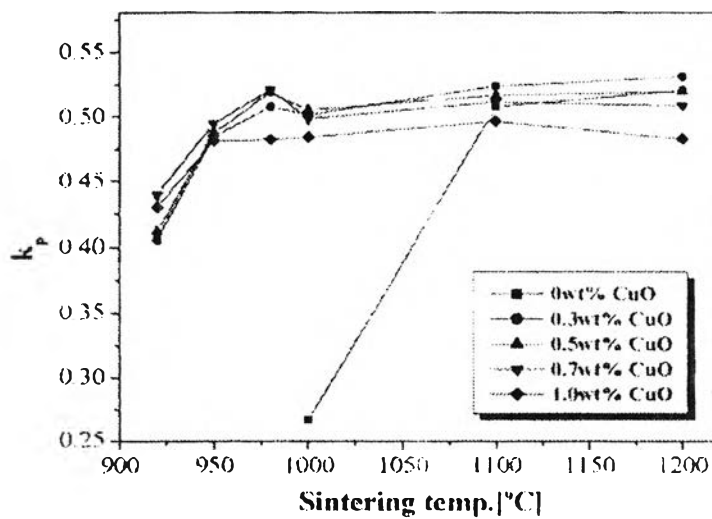
Tontrakoon [14] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สารในกลุ่ม PZT ที่มีคาร์บอนเติม PbO ลงไปเกิน 2% โดยน้ำหนัก โดยการเติมสาร  $\text{LiCO}_3$  และ  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  พบว่าที่ปริมาณ  $\text{LiCO}_3$  และ  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  อย่างละ 3% โดยน้ำหนัก สามารถที่จะลดอุณหภูมิในการเผาซินเทอร์ลงมาได้ที่อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียสเนื่องจากเกิดเฟสของเหลวขณะซินเทอร์ โดยที่สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปจากการซินเทอร์ที่อุณหภูมิปรกติเล็กน้อยเท่านั้น

Yuan Chu [15] ได้ศึกษาถึงผลของการเติม  $\text{BiFeO}_3$  และ  $\text{Ba}(\text{Cu}_{0.5}\text{W}_{0.5})\text{O}_3$  (BF - BCW) ลงไปในสาร กลุ่ม  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1-x}\text{Nb}_{2x})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  (PZT) พบว่าที่ปริมาณ BF 1% และ BCW 9% โดยน้ำหนัก สามารถที่จะลดอุณหภูมิซินเทอร์ชิ้นงานลงมาได้ที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส โดยที่สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกมีค่าใกล้เคียงกับการซินเทอร์ที่อุณหภูมิปกติ

Kwanghyun Chung [16] และคณะ ได้ทำการศึกษาถึงผลการลดอุณหภูมิซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริกในกลุ่ม  $\text{Pb}(\text{Co}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Mn}_{1-x}\text{Nb}_{2x})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zr}_{0.48}\text{Ti}_{0.52})\text{O}_3$  โดยการใช้  $\text{CuO}$  เป็นสารช่วยลดอุณหภูมิ จากการศึกษเขาพบว่าเมื่อเติมสาร  $\text{CuO}$  ลงไปจะช่วยให้เกิดเฟสของเหลวในขณะซินเทอร์ โดยสามารถลดอุณหภูมิซินเทอร์ลงมาได้ที่ 980 องศาเซลเซียส และชิ้นงานมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกดีที่สุดเพื่อเติม  $\text{CuO}$  ลงไป 0.3% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความหนาแน่น  $7.84 \text{ g/cm}^3$  ค่า  $k_p$  และ  $Q_m$  เท่ากับ 0.50 และ 1967 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2.20 และ 2.21



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงค่า  $Q_m$  ของชิ้นงาน  $\text{Pb}(\text{Co}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr}_{0.48}\text{Ti}_{0.52})\text{O}_3$  ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน [16]



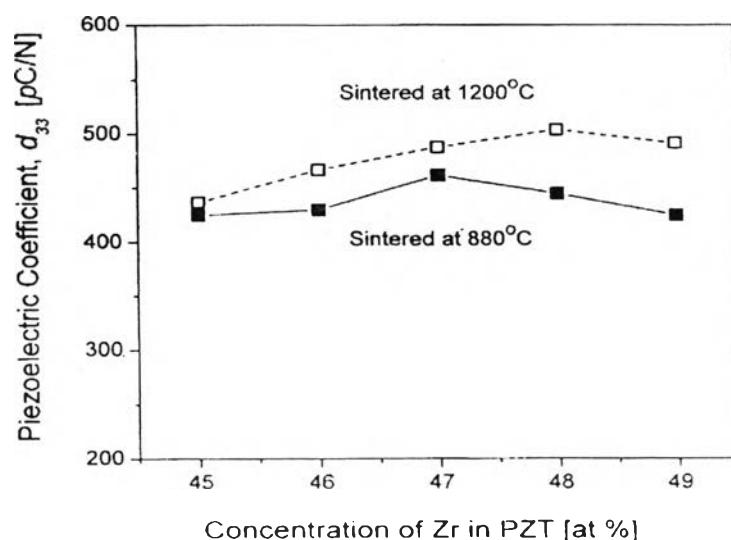
รูปที่ 2.21 กราฟแสดงค่า  $k_p$  ของชิ้นงาน  $\text{Pb}(\text{Co}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr}_{0.48}\text{Ti}_{0.52})\text{O}_3$  ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน [16]

Woo Ahn และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริกในกลุ่ม  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  (PNN - PZT) โดยการเติม ZnO ลงไปในปริมาณที่แตกต่างกัน จากผลการวิจัยเขาพบว่าเมื่อเติม ZnO ที่ปริมาณ 3 % โดยโมล ชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะโครงสร้างที่เหมือนเดิมคือเป็นโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ และสามารถที่จะลดอุณหภูมิซินเทอร์ชิ้นงานลงมาได้ที่อุณหภูมิต่ำสุดคือ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการซินเทอร์ 1 ชั่วโมง ได้ค่า  $d_{33}$ ,  $k_p$ , K เท่ากับ 525 pC/N, 0.53 และ 3400 ตามลำดับ

Woo Anh และคณะ [18] ได้ศึกษาถึงผลของการลดอุณหภูมิซินเทอร์ของสารในกลุ่ม  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PZT}$  โดยปรับปรุงงานวิจัยเดิมด้วยการเติมสาร  $\text{CuO}$  และ  $\text{ZnO}$  เพื่อที่จะลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สาร PNN - PZT ให้ต่ำกว่า 950 เซลเซียส เนื่องจากสารช่วยซินเทอร์  $\text{ZnO}$  ช่วยลดอุณหภูมิได้ต่ำสุด 950 องศาเซลเซียสเท่านั้น จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อเติมสาร  $\text{CuO}$  1% และ  $\text{ZnO}$  3% โดยโมล สามารถที่จะลดอุณหภูมิในการเผาซินเทอร์ได้ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เนื่องจาก  $\text{CuO}$  ที่เพิ่มเข้าไปทำให้เกิดลักษณะเฟสของเหลวขึ้น โดยที่สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิซินเทอร์ปกติ

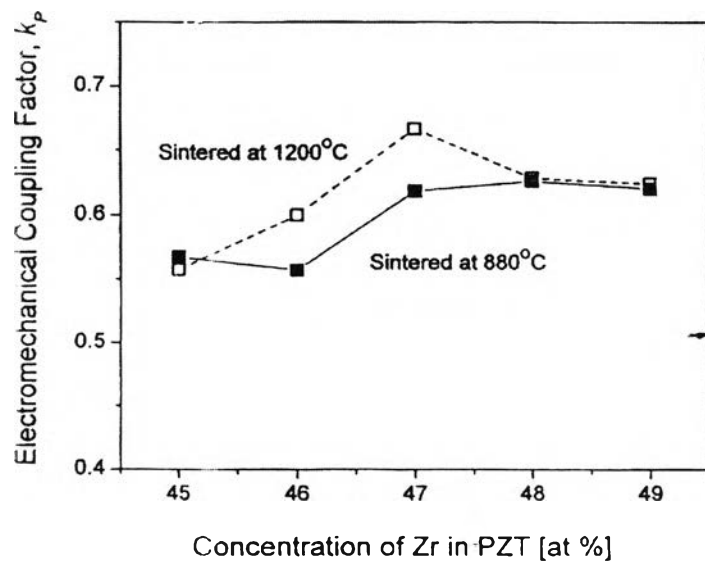
Seung-Be OmSeo และคณะ[19] ได้ศึกษาถึงผลของการลดอุณหภูมิซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริกในกลุ่ม  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.47}\text{Ti}_{0.53})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  (PZN - PZT) โดยการเพิ่มอัตราส่วนของ PZT ต่อ PZN ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากผลการวิจัยพบว่า เมื่อเติม PZN 40 % สามารถที่จะลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ลงมาได้ที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส โดยชิ้นงานมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดีคือค่าสัมประสิทธิ์คู่ควมการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้า ( $k_p$ ) เท่ากับ 0.6 และค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ( $d_{33}$ ) เท่ากับ 460 pC/N โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.22 - 2.23

Woo Ahn [20] และคณะได้ทำการศึกษาถึงผลของการลดอุณหภูมิซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริกในกลุ่ม  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  โดยการใช้  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{CuO}$ , และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 0.5%, 0.%, 0.3% โดยน้ำหนักตามลำดับ สามารถที่จะลดอุณหภูมิลงมาได้ที่ 920 องศาเซลเซียส โดยสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.24

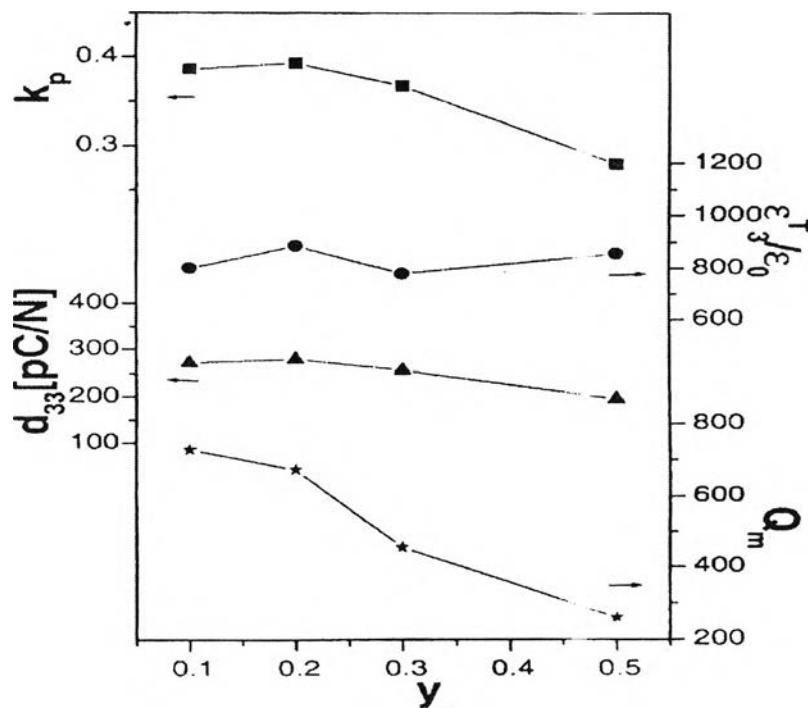


รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ Zr ใน PZT กับค่า  $d_{33}$  ของชิ้นงาน PZT ที่ได้จากการศึกษาของ Seung-BcOmSeo และคณะ [19]





รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ Zr ใน PZT กับค่า  $k_p$  ของชิ้นงาน PZT ที่ได้จากการศึกษาของ Seung-BeOmSeo และคณะ [19]



รูปที่ 2.24 แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงาน  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  เมื่อเติม  $\text{MnO}_2$  0.5%,  $\text{CuO}$  0.2% และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยน้ำหนัก เมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 920 องศาเซลเซียส [20]